

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Применение муравьиного алгоритма в интеллектуальной системе диспетчеризации дискретного производства <b>А.Д. Данилов, В.А. Ломакин.....</b>	<b>7</b>
Особенности оценки числовых характеристик времени выполнения комплекса последовательно-параллельных работ <b>С.А. Олейникова.....</b>	<b>12</b>
Исследование процесса переработки промпродуктов во вращающихся печах в производстве цинка с целью оптимизации <b>А.Л. Рутковский, М.А. Ковалева, В.М. Алкацев, А.К. Макоева.....</b>	<b>18</b>
Применение имитационного моделирования в среде MATLAB+Simulink для параметрического синтеза систем управления <b>А.М. Литвиненко, Л.Б. Афанасьевский, А.Н. Горин, М.А. Чурсин.....</b>	<b>23</b>
Разработка структуры оптимального управления движением летательного аппарата на основе алгоритма оценивания навигационной информации <b>С.В. Иванов, Н.Я. Половинчук, Е.В. Маркин, В.И. Тимофеев.....</b>	<b>28</b>
Частично автономный робот-телеприсутствия как элемент мультиагентного взаимодействия <b>А.Ю. Соловьев, М.А. Цуканов.....</b>	<b>35</b>
Исследование следящей системы в MATLAB при воздействии возмущения в системе управления <b>А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, Ю.Н. Каревская.....</b>	<b>41</b>
Оценка устойчивости системы «Водитель - Транспортное средство - Среда» <b>В.Л. Бурковский, Д.А. Андриков, Ю.А. Халин, Е.А. Титенко, А.Г. Курочкин.....</b>	<b>46</b>
Разработка специализированной библиотеки для реализации серверного приложения на языке Java <b>В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Галамага, С.Л. Кенин.....</b>	<b>52</b>
Построение нечеткой интеллектуальной системы при хранении криогенных жидкостей <b>М.В. Богданова.....</b>	<b>60</b>

### Энергетика

Определение оптимальных параметров теплоносителя в технологии управления качеством пшеничных зародышей <b>О.А. Орловцева, В.В. Портнов, Л.И. Назина, Н.Л. Клейменова.....</b>	<b>66</b>
--	-----------

### Радиотехника и связь

Система атмосферной оптической связи OFDM-типа на базе кода LDPC с перемежением в турбулентном канале <b>Р.П. Краснов.....</b>	<b>71</b>
Результаты применения эволюционного алгоритма для параметрического синтеза неэквидистантных антенных решеток <b>И.А. Кирпичева, А.В. Останков.....</b>	<b>77</b>
Методика оптимального проектирования системы охлаждения электронного модуля <b>Н.В. Ципина, С.С. Потапов, И.В. Чепрасов.....</b>	<b>81</b>
Разработка моделей и алгоритмов проектирования цифровых устройств с использованием программируемых логических интегральных схем <b>А.А. Пирогов, А.Б. Буслаев, А.С. Костюков.....</b>	<b>88</b>
Фронтальные акустические системы для домашнего кинотеатра <b>А.С. Бадаев.....</b>	<b>96</b>

Оптимизация радиоэлектронных устройств по критериям внутриаппаратурной электромагнитной совместимости <b>В.В. Глотов, М.А. Ромашенко.....</b>	<b>103</b>
Быстрый цифровой алгоритм демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией <b>В.П. Литвиненко, Е.А. Бокова, А.О. Апалихин, С.В. Шкильная.....</b>	<b>108</b>
Разработка и анализ модели, имитирующей помехи приема фазоманипулированных сигналов для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств <b>А.Л. Неклюдов, А.А. Пирогов, Н.В. Ципина, И.С. Бобылкин.....</b>	<b>113</b>
Система мониторинга подвижной радиосвязи 2G-4G сетей <b>О.В. Бойко, Д.В. Журавлев, И.А. Сафонов.....</b>	<b>117</b>

### Машиностроение и машиноведение

Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий <b>А.Н. Гречухин, В.В. Куц, М.С. Разумов.....</b>	<b>122</b>
Диффузионная сварка титановых тонкостенных конструкций с тавровым соединением <b>В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин, С.М. Ларсов.....</b>	<b>130</b>
Пути повышения стойкости червячных фрез <b>О.И. Попова, М.И. Попова, Л.С. Печенкина.....</b>	<b>134</b>
Технико-экономическое обоснование использования новых методов обработки и результатов научных исследований в машиностроении <b>О.В. Скрыгин, А.В. Мандрыкин, В.П. Смоленцев.....</b>	<b>140</b>

### Физика

Этапы развития научно-исследовательской работы на кафедре общей химии ВГТУ (обзор) <b>Б.А. Спиридонов.....</b>	<b>147</b>
Циклические испытания углепластиков на основе клеевого эпоксидного связующего Т-107 <b>А.М. Кудрин, К.С. Габриельс.....</b>	<b>162</b>
Структура тонких пленок широкозонных полупроводников $In_2O_3$ , $ZnO$ , модифицированных углеродом <b>О.В. Жилова, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков.....</b>	<b>168</b>
Влияние режимов электролиза на фазовый состав и структуру пленок оксида титана <b>В.А. Небольсин, Б.А. Спиридонов, В.А. Юрьев, Н.А. Свайкат, А.В. Макарова.....</b>	<b>174</b>

CONTENTS

**Informatics, computer engineering and control**

Using ant colony optimization algorithm in the intellectual scheduling system of discrete production	
<b>A.D. Danilov, V.A. Lomakin.....</b>	<b>7</b>
Numerical characteristics estimation features of the duration of complex of sequence-parallel works	
<b>S.A. Oleynikova.....</b>	<b>12</b>
Research of industrial products processing in the rotary kilns in zinc production	
<b>A.L. Rutkovskiy, M.A. Kovaleva, V.M. Alkatsev, A.K. Makoeva.....</b>	<b>18</b>
Use of simulation in the MATLAB+Simulink for the parametric synthesis of control systems	
<b>A.M. Litvinenko, L.B. Afanas'evskiy, A.N. Gorin, M.A. Chursin.....</b>	<b>23</b>
Method of optimal control of aircraft movement on the algorithm of optimal estimation of navigation information	
<b>S.V. Ivanov, N.Ya. Polovinchuk, E.V. Markin, V.I. Timofeev.....</b>	<b>28</b>
Partially autonomous robot-telepresence as an element of multiagent interaction	
<b>A.Yu. Solov'ev, M.A. Tsukanov.....</b>	<b>35</b>
Study of tracking systems in MATLAB when exposed to disturbances in the control circuit	
<b>A.P. Kharchenko, Yu.S. Slepokurov, Yu.N. Karevskaya.....</b>	<b>41</b>
Estimation of the stability of the system "Driver - Vehicle - Environment"	
<b>V.L. Burkovskiy, D.A. Andrikov, Yu.A. Khalin, E.A. Titenko, A.G. Kurochkin.....</b>	<b>46</b>
Development of specialized libraries for implementing server applications in Java	
<b>V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, D.S. Galamaga, S.L. Kenin.....</b>	<b>52</b>
Construction of fuzzy intelligent system of cryogenic liquids storage	
<b>M.V. Bogdanova.....</b>	<b>60</b>

**Energetics**

Determination of the optimum parameters of the heat-transfer agent in the technology of quality management of wheat germs	
<b>O.A. Orlovitseva, V.V. Portnov, L.I. Nazina, N.L. Kleimenova.....</b>	<b>66</b>

**Radio engineering and communication**

OFDM free space optical system based on LDPC code with interleaving in turbulent atmospheric channel	
<b>R.P. Krasnov.....</b>	<b>71</b>
Results of application of evolutionary algorithm for parametric synthesis of not-equidistant antenna arrays	
<b>I.A. Kirpicheva, A.V. Ostankov.....</b>	<b>77</b>
Technique of optimum designing of an electronic module cooling system	
<b>N.V. Tsipina, S.S. Potapov, I.V. Cheprasov.....</b>	<b>81</b>
Development of models and design algorithms for digital devices with the use of programmable logical integral schemes	
<b>A.A. Pirogov, A.B. Buslaev, A.S. Kostyukov.....</b>	<b>88</b>
Front acoustic systems for home cinema	
<b>A.S. Badaev.....</b>	<b>96</b>
Optimization of radioelectronic components according to criteria for intra-apparatus-electromagnetic compatibility	
<b>V.V. Glotov, M.A. Romashchenko.....</b>	<b>103</b>
Fast digital signal demodulation algorithm with quadrature amplitude manipulation	
<b>V.P. Litvinenko, E.A. Bokova, A.O. Apalikhin, S.V. Shkil'naya.....</b>	<b>108</b>

Development and analysis of the model imitating interference of reception of phase-animated signals to provide electromagnetic compatibility of radio electronic devices <b>A.L. Neklyudov, A.A. Pirogov, N.V. Tsipina, I.S. Bobylkin.....</b>	<b>113</b>
Monitoring system of mobile radio communication of 2G-4G networks <b>O.V. Boyko, D.V. Zhuravlev, I.A. Safonov.....</b>	<b>117</b>

#### Mechanical engineering and science of machines

Control of spatial orientation of robot's nodes in the process of additive product forming <b>A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov.....</b>	<b>122</b>
Diffusion welding of titanium thin-walled structures with t-joints <b>V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.B. Korchagin, S.M. Larsov.....</b>	<b>130</b>
Ways of increasing the resistance of hob cutter <b>O.I. Popova, M.I. Popova, L.S. Pechenkina.....</b>	<b>134</b>
Techno-economic substantiation of the use of new methods of processing and results of scientific research in machine-building <b>O.V. Skrygin, A.V. Mandrykin, V.P. Smolentsev.....</b>	<b>140</b>

#### Physics

Stages of development of scientific research work at the department of general chemistry of the VSTU (overview) <b>B.A. Spiridonov.....</b>	<b>147</b>
Cyclic tests of carbon fiber reinforced plastics based on hot-melt epoxy binder T-107 <b>A.M. Kudrin, K.S. Gabriels.....</b>	<b>162</b>
Structure of thin films of wide-zone semiconductors $\text{In}_2\text{O}_3$ , $\text{ZnO}$ , modified by carbon <b>O.V. Zhilova, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov.....</b>	<b>168</b>
The influence of electrolysis modes on the phase composition and structure of titanium oxide films <b>V.A. Nebol'sin, B.A. Spiridonov, V.A. Yur'ev, N. Swaikat, A.V. Makarova.....</b>	<b>174</b>

## *Информатика, вычислительная техника и управление*

УДК 658.5

### **ПРИМЕНЕНИЕ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

**А.Д. Данилов, В.А. Ломакин**

**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматриваются проблемы и узкие места создания календарных планов металлообрабатывающего производства, а также сложности синтеза интеллектуальной системы управления гибкими автоматизированными производствами, позволяющей оптимально распределять нагрузку между технологическими единицами. Для решения проблем, возникающих в процессе составления графиков и расписаний дискретного производства, предлагается интерпретировать задачу распределения заданий между станками и прочим технологическим оборудованием в виде взвешенного графа, вершинами которого будут являться операции над деталями. В данной ситуации в качестве эффективного метода оптимизации графика запуска деталей в обработку на технологическом оборудовании был использован алгоритм муравьиных колоний, который отлично справляется с задачами большой размерности. Для применения данного метаэвристического подхода в интеллектуальной системе диспетчеризации гибкого автоматизированного производства была проведена адаптация алгоритма муравьиных колоний к особенностям задачи календарного планирования. Данная интеллектуальная система в целях тестирования была реализована в математическом пакете MATLAB, результатом её работы является сориентированный граф, иллюстрирующий распределение оборудования между операциями над деталями, очередность выполнения заданий станками с числовым программным управлением, время выполнения блока операций

**Ключевые слова:** гибкие автоматизированные производства, диспетчеризация, календарное планирование, муравьиный алгоритм

#### **Введение**

Как известно, соблюдение правил и расписаний во многих областях деятельности человека приводит к ускоренному достижению поставленных целей. Особым образом стоит отметить предприятия, ориентирующиеся на запросы рынка, в частности, машиностроительные заводы, оснащенные большим количеством технологического оборудования. Актуальными вопросами функционирования предприятий данного типа являются создание оптимального календарного плана, который позволит равномерно распределить нагрузку между обрабатывающим оборудованием; улучшение работы служб складской логистики; возможность оперативной корректировки заданий для машин в случае плановых ремонтных работ или форс-мажорных обстоятельств [3].

В конечном итоге все сводится к процессу распределения во времени ограниченного числа ресурсов, выделяемых для выполнения проекта, который включает заданный перечень взаимосвязанных работ. В данном случае ресурсами являются складское оборудование, рабочие центры, станки, ЭВМ [2]. К работам относятся

действия для достижения результата, такие как проведение технологических расчетов, обработка партии деталей, сборка узла.

Предприятия, на которых осуществляется эффективное календарное планирование, значительно экономят время и ресурсы на производство продукции, оперативно реагируют на изменяющийся спрос рынка [1]. Однако для реального производства характерны нарушения производственного процесса, связанные со скрытым браком заготовок, который обнаруживается на различных стадиях обработки деталей, с нестабильной работой отдельных видов оборудования, которая ведет к браку, с выходом из строя инструмента и оборудования, с несвоевременной подачей заготовок и инструмента, что ведет неизбежной корректировке существующего календарного плана [6]. Всё это существенно увеличивает издержки производства.

#### **Постановка задачи оптимизации**

Таким образом, одной из актуальных проблем в области улучшения функционирования гибкого автоматизированного производства является создание интеллектуальной системы диспетчеризации, способной создать качественный календарный план и оперативно реа-

гировать на проблемы, возникающие в процессе производства изделий [4].

Для того чтобы эффективно решить данную проблему, необходимо комплексно подойти к понятию календарного планирования. Распределение технологического оборудования по выполняемым операциям можно наглядно представить в виде графа (1):

$$G = (V, D), \quad (1)$$

где  $V$  – множество вершин, каждая из которых представляет тип операции над определенным видом детали;

$D$  – множество дуг графа, представляющих время перехода от одной технологической операции на другую.

Перед началом выполнения плана по производству продукции, например, в начале смены, всё оборудование находится в вершине «старт», далее осуществляются переходы в нижестоящие вершины, данные действия представляют собой обработку некой технологической единицы заготовки. В определенный момент времени машина может выполнять только один тип операции. Переход в следующую вершину осуществляется после обработки всех заготовок вершины, в которой находится технологическая единица. Закончив обработку всех деталей, оборудование переходит в вершину «финиш». Таким образом, происходит распределение заданий между технологическим оборудованием, план составляется на смену, неделю, месяц, декаду, год или на другой временной норматив, принятый на предприятии.

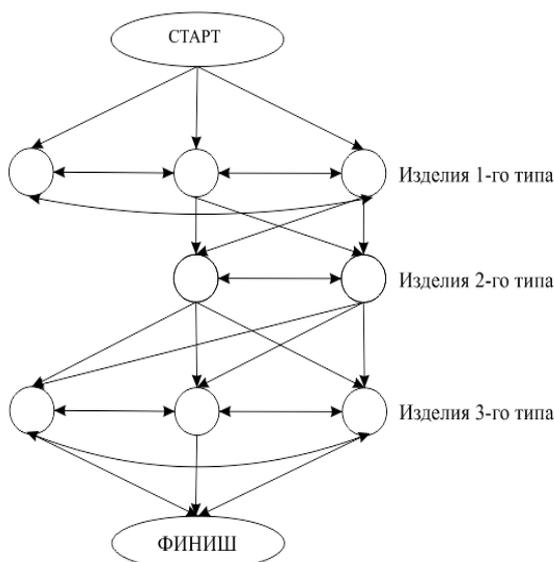


Рис. 1. Представление задачи календарного планирования в виде графа

Поскольку задача календарного планирования имеет графовую интерпретацию, муравьиный алгоритм становится эффективным способом поиска рациональной загрузки оборудования [5]. Также известно, что эффективность муравьиных алгоритмов растёт с ростом размерности решаемых задач оптимизации. Хорошие результаты получаются при использовании в динамических приложениях (в данном случае календарный план адаптируется к изменениям количества изготавливаемых деталей или выходу из строя технологических единиц).

### Описание алгоритма работы интеллектуальной системы

Далее проведем адаптацию муравьиного алгоритма к параметрам календарного планирования. Переход оборудования между вершинами осуществляется на основании матрицы вероятностей, рассчитанной по формуле:

$$P_{ij} = \frac{K_{ij}}{\sum K_{ij}}, \sum P_{ij} = 1, \quad (2)$$

где  $K_{ij}$  – вычисляется по формуле (3)

$$K_{ij} = \frac{To_{ij} \cdot k_f}{Ts_i}, \quad (3)$$

где  $To_{ij}$  – время, затраченное на технологическую операцию  $O_{ij}$  над партией деталей  $i$ -ого типа (4), является параметром, характеризующим количество феромона на соответствующем ребре;

$k_f$  – коэффициент, характеризующий возможность перехода ( $k_f = 1$ , если количество необработанных деталей в вершине больше нуля), является альтернативой параметра жадности алгоритма;

$Ts_i$  – срок изготовления партии деталей  $i$ -ого типа (5), параметр показывает привлекательность ребра, в которое осуществляется переход.

$$To_{ij} = \sum_{j=1}^m Tn_{ij} + Tv_{ij} \cdot n_{ij}, \quad (4)$$

где  $Tv_{ij}$  – время, затраченное на технологическую операцию  $O_{ij}$  над деталью  $i$ -ого типа;

$n_{ij}$  – количество деталей, ожидающих обработку  $d_i$  (партия запуска);

$Tn_{ij}$  – время, затраченное на наладку ГПМ для выполнения технологической операции  $O_{ij}$ .

$$Ts_i = k_i \cdot dl, \quad (5)$$

где  $k_i$  – количество дней на выполнение заказа;

$d_l$  - длительность рабочего дня, ч.

При переходе между узлами графа в вершине, в которую перешло оборудование, количество запланированных деталей уменьшится, а число выпущенных деталей увеличится на величину предметов, содержащихся в лотке для заготовок.

Также для технологической единицы определяется время, за которое она освободится (6).

$$Tos_{ij} = Tn_{ij} + Tnp_{ij} + n_{ij} \cdot Tv_{ij}. \quad (6)$$

Затем определяются вероятности перехода из начала графа в вершины 1-го уровня, учитывая тот факт, что некоторое количество заготовок ушло на обработку. По формуле (7) определяется время выполнения технологической операции:

$$Tv_{ij} = \sum_{j=1}^m Tn_{ij} + Tv_{ij} \cdot (n_{inn} - n_{ij}), \quad (7)$$

где  $n_{ij}$  - количество обрабатываемых деталей на данный момент времени  $d_i$  (партия деталей).

Выбрав максимальную вероятность перехода для каждой единицы оборудования, осуществляется переход в вершины 1-го уровня.

Затем для гибкого производственного модуля, у которого время выполнения операций над партией деталей минимально, рассчитываются вероятности перехода в доступные вершины. Однако, если количество деталей в вершине, в которой находится машина, больше нуля, то алгоритм становится жадным ( $k_i=0$  для остальных вершин), и продолжается обработка заготовок в текущей вершине – переход по пет-

ле. Далее цикл повторяется до тех пор, пока технологическая единица не окажется в вершине последнего уровня и количество выпущенных деталей не будет равно плановым заказам. Затем происходит переход оборудования в финишную вершину и расчет времени, затраченного на обработку.

### Моделирование работы интеллектуальной системы в среде MATLAB

Для исследования интеллектуальной системы диспетчеризации было разработано и реализовано программное приложение в среде MATLAB. Основные функции приложения:

- редактирование файлов с исходными данными (количество изготавливаемых изделий, единиц технологического оборудования);
- поиск наилучшего решения задачи планирования;
- вывод полученного решения в виде графа и таблицы.

В процессе апробации программы был получен граф, иллюстрирующий распределение заданий между технологическим оборудованием.

На рис. 2 отслеживается оптимальная последовательность переходов станков между операциями над деталями для скорейшего достижения выполнения плана по выпуску деталей. Тестирование программной модели на контрольных примерах показало высокие результаты по выравниванию нагрузки на станочный парк, а также минимизировало время, отведенное на обработку всех деталей.

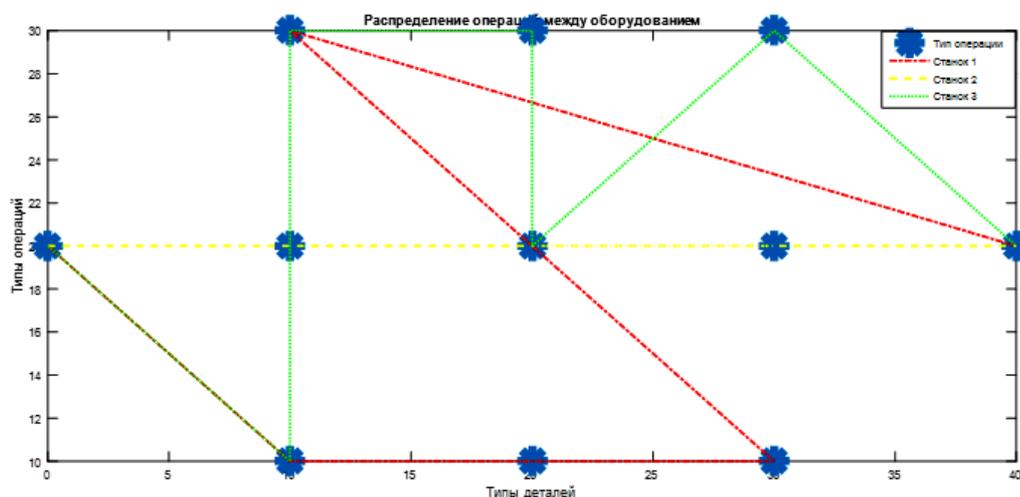


Рис. 2. Граф переходов оборудования между изделиями

Однако созданная модель предназначена для дискретного производства, в её функционал не вложена возможность оперативного перепланирования нагрузки на производственные единицы в случае нештатных ситуаций или изменения производственного плана по выпуску продукции. В случае отказа оборудования необходимо вновь производить расчет календарного плана с обновленным числом исправных технологических единиц.

### Заключение

В данной статье предложена программная реализация в среде MATLAB интеллектуальной системы диспетчеризации гибких автоматизированных производств. Представленная модель использует возможности муравьиного алгоритма для оптимизации календарного планирования.

Дальнейшим развитием данной модели считается введение в её структуру случайной

величины, описывающей отказы оборудования, и оперативное изменение производственного плана в режиме реального времени.

### Литература

1. Данилов А.Д., Головнев В.Н. Цифровые системы управления. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 235 с.
2. Данилов А.Д. Модели для автоматизированного проектирования поточных производств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т.6. № 6. С. 163-166.
3. Данилов А.Д. Технические средства автоматизации. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 340 с.
4. Данилов А.Д., Ломакин В.А. Интеграция САМ-элементов в структуру управления гибким автоматизированным производством// ПМТУКТ-2016: сб. тр. IV междунар. конф. Воронеж: Научная книга, 2016. С. 110-112.
5. Данилов А.Д., Ломакин В.А. Интеллектуализация управления гибким автоматизированным производством// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 60-64.
6. Краснопрошина А.А. Системы управления гибкими автоматизированными производствами. К.: Высш. шк., Главное издательство, 1987. 383 с.

Поступила 12.04.2018; принята к публикации 16.07.2018

### Информация об авторах

**Данилов Александр Дмитриевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: danilov-ad@yandex.ru, тел. 8920-430-74-54

**Ломакин Владислав Андреевич** – аспирант кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vldlmkn@rambler.ru, тел. 8950-769-42-27

## USING ANT COLONY OPTIMIZATION ALGORITHM IN THE INTELLECTUAL SCHEDULING SYSTEM OF DISCRETE PRODUCTION

A.D. Danilov, V.A. Lomakin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** problems and bottlenecks in the creation of calendar plans for metalworking production are considered, as well as the complexity of synthesizing an intelligent control system for flexible automated production facilities, which makes it possible to optimally distribute the load among technological units. To solve the problems arising in the process of drawing up schedules of discrete production, it is proposed to interpret the task of distributing tasks between machines and other technological equipment in the form of a weighted graph whose vertices will be operations on details. In this situation, as an effective method for optimizing the start-up schedule of parts for processing on the equipment, an algorithm of ant colonies was used, which copes well with large-dimensional problems. To apply this meta-heuristic approach in the intelligent dispatching system of flexible automated production, the algorithm of the ant colonies was adapted to the features of the scheduling task. This intellectual system, for testing purposes, was implemented in MATLAB, the result of its work is a structured graph illustrating the distribution of equipment between operations on parts, the sequence of tasks by machines with numerical control, the execution time of the operation block

**Key words:** flexible manufacturing system, scheduling, ant algorithm

### References

1. Danilov A.D. Golovnev V.N. "Digital control systems" ("Tsifrovye sistemy upravleniya"), Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007, 235 p.

2. Danilov A.D. "Models for automated designing of line productions", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 6, pp. 163-166.
3. Danilov A.D. "Technical means of automation" ("Tekhnicheskie sredstva avtomatizatsii"), Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007, 340 p.
4. Danilov A.D., Lomakin V.A. "The integration of CAM-elements into the control system of the flexible automated manufacture", Proc. of the Int. Conf. (PMTUKT-2016: sb. tr. IV mezhdunar. konf.), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2016, pp. 110-112.
5. Danilov A.D., Lomakin V.A. "Intellectualization of management of flexible automated production", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 60-64
6. Krasnoproshina A.A. "The control system of flexible automated production" ("Sistemy upravleniya gibkimi avtomatizirovannymi proizvodstvami"), Vysshaya shkola, 1987, p. 387.

Submitted 12.04.2018; revised 16.07.2018

#### Information about the authors

**Aleksandr D. Danilov**, Dr.Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**Vladislav A. Lomakin**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vldlmkn@rambler.ru

## ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РАБОТ

С.А. Олейникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** объектом исследования в данной работе являются стохастические многостадийные системы, процесс обслуживания в которых представляет собой выполнение множества последовательно-параллельных работ со случайной длительностью обслуживания. В этом случае время обслуживания всей заявки является случайной величиной. Несомненный интерес представляет оценка числовых характеристик случайной величины, описывающей данную длительность. В настоящее время существует подход PERT, позволяющий получить искомые оценки. Однако предположения, на основании которых получены данные оценки, не для всех систем могут иметь место. Более того, в некоторых случаях эти предположения неправомерны. В связи с этим возникает вопрос о точности предлагаемых оценок метода PERT. Целью работы является оценка аналитических возможностей, позволяющих максимально точно оценить характеристики исследуемой величины. Анализ специфики исследуемых систем позволил аналитически описать искомую случайную величину как максимум из множества величин, представляющих собой длительности последовательности работ, стоящих на данном пути. В работе исследована возможность аналитического получения характеристик случайной величины, в результате чего сделан вывод о целесообразности подключения аппарата численных методов. Таким образом, проанализированы особенности оценки числовых характеристик случайной величины, описывающей длительность выполнения комплекса последовательно-параллельных работ

**Ключевые слова:** стохастические многостадийные системы, длительность обслуживания, PERT, математическое ожидание, дисперсия

### Введение

Рассматривается процесс функционирования сложных обслуживающих систем, обеспечивающих возможность выполнения комплекса последовательно-параллельных работ для обслуживания заявки. Время выполнения каждой отдельной работы является случайной величиной. Необходимо оценить длительность обслуживания всей заявки.

Данная задача относится к классу задач сетевого планирования и управления (управления проектами). Для задач со случайной длительностью работ разработан метод PERT, позволяющий не только оценить время выполнения отдельных работ, но и длительность обслуживания всей заявки [1, 2].

Однако, как показали исследования, предположения метода не всегда имеют место в реальных условиях. В связи с этим формулы PERT также будут обладать некоторой погрешностью. Для минимизации данной погрешности необходима разработка нового аналитического аппарата, позволяющего оценить числовые характеристики искомой случайной величины с наивысшей точностью.

В данной работе описана постановка задачи; экспериментальным путем показана не-

точность оценок метода PERT, которая будет увеличиваться при наличии нескольких критических путей. Далее предлагается описание длительности обслуживания, которая есть максимум из случайных величин, каждая из которых представляет собой суммарное время выполнения работ, стоящих на определенном пути. Описав числовые характеристики данной случайной величины, проанализировали возможности для аналитического нахождения математического ожидания и дисперсии.

### Постановка задачи и ее особенности

Рассматривается многостадийная система, на вход которой поступает поток заявок. Каждая заявка для своего обслуживания должна пройти множество взаимно зависимых (последовательно-параллельных) работ. Каждая работа задается своей длительностью, которая является случайной величиной, и взаимной зависимостью (множеством предшествующих или последующих работ). Требуется оценить числовые характеристики (математическое ожидание и дисперсию) случайной величины, описывающую длительность обслуживания всего комплекса работ.

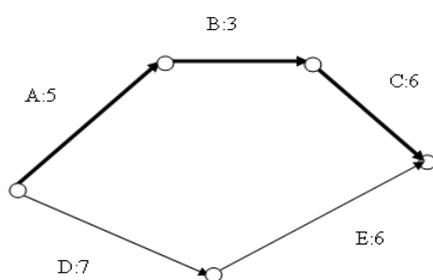
Проанализируем особенности данной задачи. В детерминированном случае, когда время выполнения каждой работы заранее из-

вестно и неизменно, значение длительности обслуживания можно оценить следующим образом:

$$T_{\text{факт}} = \sum_{w_k \in K} t_k. \quad (1)$$

Здесь  $K$  – множество работ, образующих критический путь,  $w_k$  – очередная работа, принадлежащая критическому пути;  $t_k$  – длительность этой работы.

В стохастическом случае возникает неопределенность, связанная с возможностью изменения критического пути в процессе обслуживания. Поясним это на простом примере. Рассмотрим сетевой график, представленный на рисунке.



Пример сетевого графика

На данном рисунке буквами отмечены работы, а через двоеточие представлена их ориентировочная длительность (оценка математического ожидания). Как можно видеть из данного рисунка, критический путь составляют работы А, В и С. Однако если, например, работа С завершится на 2 единицы раньше, то критическими будут уже работы D и E. Таким образом, нельзя заранее однозначно определить ни критический путь, ни множество работ, лежащих на нем.

Кроме того, специфика длительности работ и их взаимной зависимости может быть такова, что у задачи может существовать два критических пути. В этом случае возникают определенные сложности с оценкой числовых характеристик искомой случайной величины.

Проанализируем наиболее распространенный метод решения данной задачи PERT. Его расчетные формулы для математического ожидания и дисперсии искомой длительности следующие:

$$M\xi = M\xi_1 + \dots + M\xi_k, \quad (2)$$

$$D\xi = D\xi_1 + \dots + D\xi_k. \quad (3)$$

Здесь  $\xi_1, \dots, \xi_k$  – случайные величины, описывающие работы, которые стоят на критическом пути.

Как было отмечено ранее, могут возникнуть случаи, когда сетевой график будет содержать два и более критических пути. В этом случае для расчета математического ожидания останется пригодна формула (2) (поскольку все критические пути будут иметь одно и то же математическое ожидание). Однако формула для дисперсии претерпит изменения. В [1] предлагается оценка дисперсии как максимума из всех дисперсий, каждая из которых будет рассчитана для своего критического пути:

$$D\xi = \max(D\eta_1, \dots, D\eta_n). \quad (4)$$

Здесь  $\xi$  – искомая величина;  $n$  – количество критических путей;  $\eta_1, \dots, \eta_n$  – случайные величины, представляющие суммарную длительность всех работ, стоящих на пути  $1, \dots, n$  соответственно.

### Экспериментальные оценки длительности обслуживания

Проведем эксперимент, целью которого является оценка длительности обслуживания в случае, если необходимо выполнить множество последовательно-параллельных работ. На вход эксперимента будем подавать сетевой график, представляющий собой множество взаимно зависимых работ. Целью эксперимента является получение выборки, каждый элемент которой представляет собой длительность обслуживания заявки (при розыгрыше всех случайных величин, описывающих длительности отдельных работ). На основании этой выборки оцениваются такие числовые характеристики, как математическое ожидание (выборочное среднее) и дисперсия (выборочная дисперсия). Полученные результаты сравниваются с предполагаемыми аналитическими результатами, полученными по формулам (2) и (3) (или (4) при равенстве дисперсий).

Без ограничения общности приведем небольшой фрагмент результатов для тривиального случая, когда заявка задана множеством из двух параллельных работ. В частности, в случае одинакового ожидаемого значения данных работ результаты были следующими (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент результатов эксперимента для двух случайных величин

Исходные данные			Плановые характеристики		Фактические характеристики	
M	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	M*	D*	M*	D*
15	2,97	3,78	15	3,78	16,05	2,449
12	0,33	0,22	12	0,33	12,33	0,23
13	0,75	0,5	13	0,75	13,44	0,432
16	3	2	16	3	16,90	1,795
16	3	2	16	3	16,90	1,767

Из данной таблицы очевидно, что фактическое математическое ожидание оказалось существенно выше запланированного, а дисперсия – ниже.

Рассмотрим результат трех параллельных работ. Пусть из трех случайных величин одна имеет ожидаемое значение 5.5, а две остальные – 5. Согласно методу PERT, ожидаемое значение результирующей случайной величины будет равно 5.5. Представим фрагмент результатов опытов, каждый из которых отличается диапазоном определения случайных величин (табл. 2).

Таблица 2

Фрагмент результатов эксперимента для трех случайных величин

Плановые характеристики		Фактические характеристики	
M*	D*	M*	D*
5,5	0,6944	5,9454	0,6216
5,5	0,4444	5,7971	0,2345
5,5	1	6,0323	0,3399
5,5	1,7778	6,3417	0,9126
5,5	1	6,0089	0,472
5,5	0,6944	5,7223	0,2309
5,5	1	5,8526	0,4434
5,5	1	5,8805	0,2962
5,5	1,3611	6,0444	0,4638
5,5	1	5,9636	0,5404

Проведем эксперимент в абсолютно аналогичных условиях за исключением значений математических ожиданий случайных величин. Пусть теперь две случайные величины имеют математическое ожидание 5.5, а одна – 5. Это будет аналогично случаю, когда сетевой график имеет два критических пути. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Фрагмент результатов эксперимента для трех случайных величин

Плановые характеристики		Фактические характеристики	
M*	D*	M*	D*
5,5	0,6944	6,113	0,5553
5,5	0,4444	5,9484	0,2081
5,5	1	6,177	0,3074
5,5	1,7778	6,5067	0,8757
5,5	1	6,1602	0,3931
5,5	0,6944	5,8768	0,3048
5,5	1	6,0245	0,3709
5,5	1	6,0634	0,3505
5,5	1,3611	6,2112	0,4066
5,5	1	6,1143	0,4878

По сравнению с предыдущим случаем можно видеть, что фактическое математическое ожидание увеличено, а дисперсия уменьшена.

Таким образом, на основании экспериментальных данных, фрагменты которых представлены в табл. 1, 2 и 3, можно сделать следующие выводы:

- оценка длительности обслуживания заявки, предлагаемая методом PERT, ниже, чем реальная длительность обслуживания;

- дисперсия случайной величины, описывающей длительность обслуживания, ниже, чем оценка, приведенная в методе PERT;

- с увеличением числа критических путей ожидаемое математическое ожидание случайной величины, описывающей длительность, растет (в отличие от метода PERT);

- с увеличением числа критических путей ожидаемая дисперсия случайной величины, описывающей длительность, уменьшается (в отличие от метода PERT).

Таким образом, необходима разработка математического аппарата, позволяющего получить более точные оценки по сравнению с методом PERT.

### Аналитическое описание исследуемой случайной величины

Приведем аналитическое описание случайной величины, представляющей длительность обслуживания для стохастических систем. Для этого рассмотрим все пути сетевого графика (т.е. все цепочки, позволяющие перейти из начального в конечное состояние). Каждый путь будет определяться множеством работ. Пусть  $\xi_i, i=1, \dots, n$  – случайная величина,

определяющая суммарную длительность всех работ, стоящих на пути  $i$ . Тогда искомую случайную величину  $\xi$  можно описать следующим образом:

$$\xi = \max(\xi_1, \dots, \xi_n). \quad (5)$$

С учетом данного выражения сформулируем следующую задачу. Пусть имеется множество случайных величин. Необходимо найти математическое ожидание и дисперсию случайной величины, которая задана формулой (5).

Аналогичные задачи рассмотрены в [3, 4]. Однако принципиальным отличием исследуемых задач, которые относятся к теории экстремальных значений, является идентичность случайных величин, входящих в формулу (5). Случай, когда каждая отдельная случайная величина имеет свой интервал распределения и свои параметры, до сих пор не исследовался.

Рассмотрим частную задачу. Пусть

$$\eta = \max(\xi_1, \xi_2). \quad (6)$$

Случайные величины распределены в интервалах  $[a_1, b_1]$  и  $[a_2, b_2]$  соответственно. Необходимо найти математическое ожидание и дисперсию случайной величины (6). Согласно формулам теории вероятностей, получим [5]:

$$M\eta = \int_{a_1}^{b_1} \int_{a_2}^{b_2} \max(x, y) f_{\xi_1}(x) f_{\xi_2}(y) dx dy \quad (7)$$

и

$$D\eta = \int_{a_1}^{b_1} \int_{a_2}^{b_2} (\max(x, y))^2 f_{\xi_1}(x) f_{\xi_2}(y) dx dy - (M\eta)^2 \quad (8)$$

Известно, что интервалы  $[a_1, b_1]$  и  $[a_2, b_2]$  перекрывающиеся, т.е.  $b_2 > a_1$  и  $b_1 > a_2$ . Без ограничения общности предположим, что  $a_2 < a_1$ . Тогда:

$$\begin{aligned} M\eta &= \int_{a_1}^{b_1} \int_{a_2}^{b_2} \max(x, y) f_{\xi_1}(x) f_{\xi_2}(y) dx dy = \\ &= \int_{a_1}^{b_1} f_{\xi_1}(x) \left( \int_{a_2}^{a_1} \max(x, y) f_{\xi_2}(y) dy + \right. \\ &\quad \left. + \int_{a_1}^{b_2} \max(x, y) f_{\xi_2}(y) dy \right) dx \end{aligned}$$

Далее необходимо определить функцию максимума:

$$\max(x, y) = \begin{cases} x, & x \geq y \\ y, & x < y \end{cases} \quad (9)$$

и разбить интеграл на составляющие в зависимости от того, какой из аргументов больше.

Вместо формулы (9) для нахождения максимума можно воспользоваться следующей формулой:

$$\max(x, y) = \frac{x + y + |x - y|}{2}. \quad (10)$$

В этом случае необходимо разрешать интеграл от модуля разности.

Перейдем к определению плотностей в формулах (7) и (8). Поскольку каждая случайная величина  $\xi_i, 1, 2$  представляет собой множество последовательных работ, то она будет определяться формулой:

$$\xi_i = \xi_{i1} + \xi_{i2} + \dots + \xi_{ik}. \quad (11)$$

В [2] было показано, что сумма бета-величин может быть аппроксимирована бета-величиной. В частности, если  $\xi_1, \dots, \xi_n$  имеют бета-распределение в интервалах  $[a_1, b_1], [a_2, b_2], \dots, [a_n, b_n]$  с параметрами  $(p_1, q_1), (p_2, q_2), \dots, (p_n, q_n)$  соответственно, то итоговая плотность будет иметь вид:

$$f_{\xi}(x) = \frac{(x-a)^{p-1} \cdot (b-x)^{q-1}}{(b-a)^{p+q-1}}. \quad (12)$$

В [3] найдены параметры  $p$  и  $q$  данной случайной величины, а также интервал  $[a, b]$ , в котором она определена. Поэтому будем считать, что плотность распределения случайной величины (11) оценена с точностью до параметров.

Далее рассмотрим случай  $n$  различных путей. В общем случае пусть случайная величина  $\xi$  это функция случайных величин  $\xi_1, \dots, \xi_n$ . Будем предполагать на основании [2], что каждая из этих случайных величин имеет бета-распределение в интервале  $[a_i, b_i]$ . Тогда ее числовые характеристики будут определяться следующим образом [5]:

$$M\xi = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} \max(x_1, \dots, x_n) f_{\xi}(x) dx_1 \dots dx_n \quad (13)$$

и

$$\begin{aligned} D\xi &= \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} (\max(x_1, \dots, x_n))^2 \times \\ &\quad \times f_{\xi}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n - (M\xi)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

По сравнению с формулами (7) и (8), в  $n$ -мерном случае возникают следующие сложности:

- заметно усложняется (с точки зрения интегрирования) функция модуля от нескольких аргументов;

- очевидно, что функция плотности станет более громоздкой.

Найдем плотность распределения случайной величины  $\xi$ , описанной формулой (5). Функция распределения  $\xi$  будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} F_{\xi}(x) &= P(\xi < x) = P(\xi_1 < x_1, \xi_2 < x_2, \dots, \xi_n < x_n) = \\ &= P(\xi_1 < x_1)P(\xi_2 < x_2) \dots P(\xi_n < x_n) = \\ &= F_{\xi_1}(x_1) \cdot F_{\xi_2}(x_2) \cdot \dots \cdot F_{\xi_n}(x_n) \end{aligned}$$

Взяв производную, получим:

$$\begin{aligned} f_{\eta}(x) &= F_{\xi_1}'(x_1) \cdot f_{\xi_2}(x_2) \cdot \dots \cdot f_{\xi_n}(x_n) + \\ &+ F_{\xi_2}'(x_1) \cdot f_{\xi_1}(x_1) \cdot \dots \cdot f_{\xi_n}(x_n) + \dots \\ &+ F_{\xi_n}'(x_n) \cdot f_{\xi_1}(x_1) \cdot \dots \cdot f_{\xi_{n-1}}(x_{n-1}) \end{aligned} \quad (15)$$

Подставим в формулу (15) значения функции и плотности бета-распределения. Выпишем первое слагаемое:

$$\begin{aligned} &F_{\xi_1}'(x_1) \cdot f_{\xi_2}(x_2) \cdot \dots \cdot f_{\xi_n}(x_n) = \\ &= \frac{1}{(b_1 - a_1)^{p_1 + q_1 - 1}} \times \\ &\times \int_{a_1}^{x_1} (t - a_1)^{p_1 - 1} \cdot (b_1 - t)^{q_1 - 1} dt \times \\ &\times \frac{(x_2 - a_2)^{p_2 - 1} \cdot (b_1 - x_2)^{q_2 - 1}}{(b_2 - a_2)^{p_2 + q_2 - 1}} \cdot \dots \times \\ &\times \frac{(x_n - a_n)^{p_n - 1} \cdot (b_n - x_n)^{q_n - 1}}{(b_2 - a_2)^{p_n + q_n - 1}} \end{aligned} \quad (16)$$

Остальные слагаемые будут иметь аналогичный вид. Как видно из полученных результатов, аналитический подход к нахождению числовых характеристик случайной величины (5) сопряжен с целым рядом сложностей. Они вызваны, в частности:

- громоздкостью выражений (16) (как составляющих интегральных выражений (13) и (14));

- сложностями, возникающими при интегрировании плотности (12);

- сложностями, возникающими при аналитическом описании функции максимума от  $n$  величин.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что для нахождения числовых характеристик по формулам (13) и (14) необходимо подключить численный аппарат.

## Выводы

Целью работы являлись описание случайной величины, характеризующей длительность обслуживания комплекса последовательно-параллельных работ, и нахождения ее числовых характеристик. В результате были решены следующие задачи:

1. С помощью вычислительного эксперимента проанализирован существующий подход к оценке числовых характеристик длительности обслуживания в стохастических системах. По сравнению с оценками метода PERT было выявлено, что фактическое математическое ожидание превышает предполагаемые оценки, а дисперсия, наоборот, меньше плановой оценки. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки собственных подходов для оценивания числовых характеристик длительности обслуживания, отличающихся повышенной точностью.

2. Предложено аналитическое описание исследуемой случайной величины, основанное на использовании аппарата теории вероятностей. В частности, было показано, что она может быть описана формулой (5).

3. Исследованы аналитические подходы к нахождению числовых характеристик описанной случайной величины. В общем случае они описываются с помощью формул (13) и (14). В результате сделан вывод о целесообразности поиска численных подходов (или комбинации численных и аналитических подходов) для решения данной задачи.

## Литература

1. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования. М.: Прогресс, 1968. 182 с.
2. Oleinikova S.A., Kravets O.Ja. Approximation of the distribution law of the sum of random beta values // International Journal of Information Technologies and Security. 2017. V. 9. № 2. Pp. 53-64.
3. Олейникова С.А. Вычислительный эксперимент для анализа закона распределения случайной величины, описывающей длительность проекта в задачах сетевого планирования и управления // Экономика и менеджмент систем управления. 2013. Т. 9. № 3. С. 90-96.
4. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 452 с.
5. Невзоров В.Б. Рекорды: математическая теория. М.: ФАЗИС, 2000. 256 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

**Информация об авторах**

**Олейникова Светлана Александровна** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

**NUMERICAL CHARACTERISTICS ESTIMATION FEATURES OF THE DURATION OF COMPLEX OF SEQUENCE-PARALLEL WORKS**

**S.A. Oleynikova**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the object of the research in this paper is stochastic multi-stage systems, in which the process of servicing is the execution of a set of sequentially parallel works with a random execution time. In this case, the service time of the entire application is a random variable. The estimation of the numerical characteristics of a random variable describing a given duration is of undoubted interest. At present, there is an approach PERT that allows one to obtain the required estimates. However, the assumptions on the basis of which these estimates were obtained are not available for all systems. Moreover, in some cases, these assumptions are unjustified. In this connection, the question about accuracy of the proposed estimates of the PERT method is arises. The aim of the paper is to evaluate the analytical capabilities that allow one to estimate the characteristics of the investigated quantity as accurately as possible. The analysis of the specifics of the systems under study made it possible to analytically describe the unknown random quantity as a maximum of a set of quantities representing the duration of the sequence of works on the given path. In the article, the possibility of analytical obtaining of characteristics of a random variable was investigated. As a result, it was concluded that the apparatus of numerical methods should be connected. Thus, the features of an estimation of numerical characteristics of the random variable describing duration of performance of a complex of consecutive-parallel works are analyzed

**Key words:** stochastic multi-stage systems, service time, PERT, expected value, variance

**References**

1. Kofman A, Debazey G. "Network planning methods" ("Setevye metody planirovaniya"), Moscow, Progress, 1968, 182 p.
2. Oleynikova S.A., Kravets O.Ya. "Approximation of the distribution law of the sum of random beta values", *International Journal of Information Technologies and Security*, 2017, vol. 9, no 2, pp. 53-64.
3. Oleynikova S.A. "Computer experiment for the analysis of the distribution law of the random quantity that determines the duration of the project in problems of network planning and management", *Economics and Management of Control Systems (Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya)*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 90-96.
4. Gumbel E. "Statistics of extremes" ("Statistika ekstremalnykh znachenii"), Moscow, Mir, 1965, 452 p.
5. Nevzorov V.B. "Records: mathematical theory" ("Rekordy: matematicheskaya teoriya"), Moscow, FAZIS, 2000, 256 p.
6. Ventcel E.S. "Theory of probabilities" ("Teoriya veroyatnostey"), Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 576 p.

Submitted 10.05.2018; revised 16.07.2018

**Information about the author**

**Svetlana A. Oleynikova**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026 Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМПРОДУКТОВ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИНКА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Л. Рутковский<sup>1</sup>, М.А. Ковалева<sup>1,2</sup>, В.М. Алкацев<sup>1</sup>, А.К. Макоева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

<sup>2</sup>Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Владикавказский филиал, г. Владикавказ, Россия

**Аннотация:** основным объектом анализа является поиск оптимальной температуры отходящих газов в вельц-печи, при которой достигается максимальная производительность процесса. Изменение расхода кека оказывает влияние на температурный режим печи, а также на качественные показатели процесса. Увеличение расхода кека приводит к увеличению общего объема сырых материалов, поступающих в печь, на их подогрев и испарения влаги требуется больше. Приведены результаты исследования влияния загрузки шихты и коксика, собраны среднесуточные данные за длительный период работы вельц-печи, которые соответствуют нормальной работе печи, и был проведен анализ влияния расхода кека на температуру отходящих газов, с помощью программного продукта MathCad. Рассмотрены модели взаимосвязи: линейная, кубическая, квадратичная, и для каждого вида модели произведен расчет остаточной дисперсии. Было выявлено, что наименьшая остаточная дисперсия – при кубической регрессионной модели. Полученные результаты являются основой для построения автоматизированной системы регулирования температуры отходящих газов. При автоматизации управления вельц-процессом наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать оперативную задачу оптимизации режимов. При этом режиме обеспечена максимальная производительность печи, следовательно, нагрузка на окружающую среду снижается

**Ключевые слова:** вельц-процесс, регулирование температуры, оптимизация, восстановление, отходящие газы, регрессионный анализ

### Введение

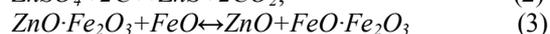
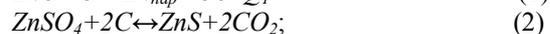
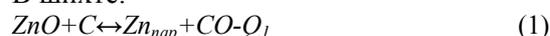
Вельц-процесс применяется для переработки материалов с низким содержанием летучих металлов, руды, хвосты, промпродуктов, шламы, золы, шлаков и всякого рода отходов путем нагрева их во вращающейся печи до температуры, при которой извлекаемый металл восстанавливается, в качестве восстановителя используется коксик.

Вельц-процесс представляет собой непрерывный цикл работы трубчатой вращающейся печи барабанного типа, располагающейся под углом  $3^{\circ}$ , для создания направленного перемещения шихты от верхнего загрузочного торца к нижнему торцу, через который выгружают твердый остаток перерабатываемой шихты. В настоящее время для проведения процесса различные компании используют печи длиной от 40 до 95 м [1-4].

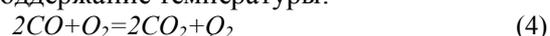
Оптимальный режим вельцевания и показатели процесса зависят от химического, фазового и гранулометрического состава шихты. Эти условия имеют важное значение для процесса. Химизм процессов, протекающих при

вельцевании цинксодержащих материалов, выражается следующими реакциями:

В шихте:



В газовой фазе окисление  $\text{CO}$  обеспечивает поддержание температуры:



А цинковые пары окисляются по реакции:



И уносятся с газовым потоком в пылеуловительную систему.

### Постановка задачи

Автоматизация вельц-печей позволяет осуществлять контроль и управление параметрами технологического процесса, а также сбор и хранение значений параметров.

Измерение режимных параметров технологического процесса вельцевания цинковых кеков с целью их контроля осуществляется на основе технических средств нижнего уровня автоматизированной системы управления вельц-печью.

Шихта для вельцевания состоит из цинксодержащего окисленного материала и

коксика. Содержащийся в шихте коксик служит топливом, восстановителем и "осушителем" — веществом, впитывающим расплавленную часть шихты. Коксик является топливом и восстановителем для процесса вельцевания. Подача коксика должна быть поставлена в зависимость от подачи основного материала — кека. Подачу коксика поддерживают в заданном соотношении в соответствии с расходом кека.

В нижней части печи, после реакционной зоны, происходит остывание клинкера и нагрев воздуха, поступающего в печь. Этот воздух необходим для горения коксика и для окисления паров возгоняемых металлов. Поэтому от температуры в нижней части печи зависит процесс восстановления и возгонки в средней зоне. Значения температуры в нижней части печи в реакционной зоне технологически связаны. От этих параметров зависит в значительной степени полнота извлечения цинка из исходных материалов.

Изменение расхода кека оказывает влияние на температурный режим печи, а также на качественные показатели процесса. Увеличение расхода кека приводит к увеличению общего объема сырых материалов, поступающих в печь, на их подогрев и испарения влаги требуется больше.

Процесс восстановления цинка и образования клинкера зависят от поступления тепла, которое определяется расходом коксика. Этот показатель является существенным, определяющим стоимость конечного продукта — вельцоокислов. На качество извлечения кека также влияет температурный режим.

Решающим фактором, обеспечивающим высокие технико-экономические показатели вельц-процесса, является соблюдение оптимальных условий его проведения. Температура, при которой восстанавливается окись цинка, и температура перехода цинка в газообразное состояние невысоки (910-950<sup>0</sup>C). Однако в реакционной зоне необходимо поддерживать более высокую температуру (1300-1350<sup>0</sup>C), так как цинк восстанавливается из ферритных и других соединений при более высокой температуре [5].

### Методика исследования

В представленной работе основным объектом анализа является температура отходящих газов, которая является интегральной оценкой происходящих в печи процессов. Как

показали данные работы одного из заводов, она нестабильна (рис. 1), поэтому были проведены исследования влияния загрузки шихты и коксика на эту температуру. Очевидно, что оба параметра измеряются с погрешностью, поэтому для получения адекватных моделей необходимо организовать эксперимент по специальной методике [6-8]. С этой целью собраны среднесуточные данные за длительный период нормальной работы вельц-печи.

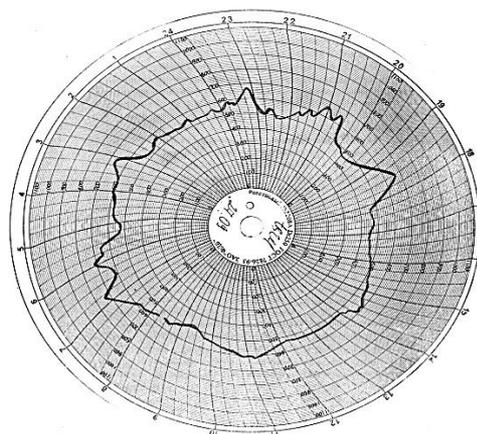


Рис. 1. Среднесуточная диаграмма температуры отходящих газов в вельц-печи

Были исследованы модели влияния загрузки шихты (т/ч) на температуру отходящих газов (<sup>0</sup>C): линейная, квадратичная, кубическая. Для каждого вида модели был произведен расчет остаточной дисперсии, вследствие чего выявилось, что наименьшая остаточная дисперсия — при кубической регрессионной модели (таблица).

Функция регрессии	S <sub>ост</sub>
Линейная $y(x)=49,5x+297,4$	25,588
Квадратичная $y(x)=143,4x^2+102,5x-4,5$	22,945
Кубическая $y(x)=4,5 \cdot 10^3 - 2,2 \cdot 10^3 x + 379,2 x^2 - 21,6 x^3$	10,793

Поскольку кубическая модель описывает процесс с наиболее высокой вероятностью, она принята за основу для дальнейших исследований и был проведен анализ влияния расхода кека на температуру отходящих газов, с помощью программного продукта MathCad [9-10].

### Расчет параметров регрессионной модели с использованием программного продукта MathCad

Экспериментальные данные температуры отходящих газов  $t_{ог}$  и расхода кека  $f_{кек}$  представлены в виде матриц:

$$t_{ог} := \begin{matrix} \text{Т} \\ \text{fкек} \end{matrix} \quad f_{кек} := \begin{matrix} \text{Т} \\ \text{fкек} \end{matrix}$$

Вычисляем коэффициенты регрессии с помощью встроенной функции

$$s_{AA} := \text{regress}(f_{кек}, t_{ог}, k)$$

Строим кривую полинома регрессии, задав полином с помощью функции  $\text{interp}(s, f_{кек}, t_{ог}, t)$ :

$$A(t) := \text{interp}(s, f_{кек}, t_{ог}, t)$$

Функция регрессии с доверительной вероятностью 0,99 примет вид:

$$y(x) := 4.5 \cdot 10^3 - 2.2 \cdot 10^3 x + 379.2 x^2 - 21.6 x^3,$$

где  $x := 4.9, 5.0 \dots, 7.5$  – диапазон изменения загрузки т/ч.

Оптимальной количественной оценкой является так называемая стандартная ошибка, равная среднеквадратичному расстоянию от точек экспериментальных данных до прямой (линии регрессии).

Коэффициент корреляции:  $\text{Corr}(t_{ог}, f_{кек}) = 0.986$ .

Остаточная дисперсия:  $S_{ост} = 10.793$ .

Рассеяние результатов относительно линии оценим с помощью дисперсии  $S_y$ , т.е. определяем стандартное отклонение точек от найденной зависимости:  $S_y = 915.1$ .

Расчитанный критерий Фишера:  $F_r = 84.783$ .

Табличное значение критерия:  $F_t = 2.916$ .

Так как  $84,783 > 2,916$ , т.е.  $F_r > F_t$ , регрессионная модель значима с доверительной вероятностью  $\gamma = 0.99$

Полученные результаты являются основой для построения автоматизированной системы регулирования температуры отходящих газов.

Согласно экспериментальным данным, был задан диапазон загрузки от 4,9 до 7 т/ч.

Так как полученное уравнение адекватно с высокой доверительной вероятностью, было решено исследовать большее значение загрузки, чем получено в эксперименте, чтобы проверить, как поведет себя процесс. Было выявлено, что далее температура уменьшается, т.е. происходит перегрузка печи. Можно сделать

вывод, что оптимальный рабочий режим находится в диапазоне 6,5-7 т/ч. На рис. 2 представлен график зависимости температуры отходящих газов от расхода кека.

Из рис. 2 видно, что при загрузке кека выше 7 т/ч температура отходящих газов снижается, следовательно, эта величина загрузки печи является оптимальной, т.к. при этом достигается максимальная производительность печи.

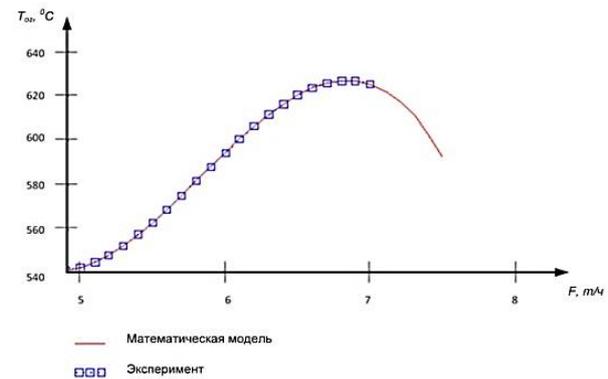


Рис. 2. График зависимости влияния расхода кека на температуру отходящих газов

### Выводы

При автоматизации управления вельц-процессом наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать оперативную задачу оптимизации режимов. В работе предлагается процедура оптимизации.

Из рис. 2 видно, что при увеличении загрузки более 7 т/ч температура отходящих газов уменьшается. Следовательно, можно сделать вывод, что оптимальная рабочая загрузка шихты находится в диапазоне 6,7-7 т/ч для обеспечения температуры отходящих газов около 620-630 °C.

Была выбрана модель кубической регрессии и выявлена ее адекватность. За пределами исследуемой области наблюдается понижение температуры, а область рабочего режима определяется в интервале загрузки (6,7-7) т/ч.

При этом режиме обеспечена максимальная производительность печи, следовательно, нагрузка на окружающую среду снижается.

### Литература

1. Топчаев В.П. Автоматизация трубчатых вращающихся печей цветной металлургии. М.: Изд-во Металлургия, 1971. 129 с.
2. Вернергольд А.Р., Казаринов Л.С., Колесникова О.В. Оценка производительности вельц-печи при неполной наблюдаемости состояния вельц-процесса // Акту-

альные проблемы технических наук: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: АЭТЕРНА, 2015. С. 41-43.

3. Зайцев В.Я., Маргулис Е.В. *Металлургия свинца и цинка*. М.: Metallurgia, 2010. 192 с.

4. Вернергольд А.Р., Казаринов Л.С., Колесникова О.В. Энергоэффективное управление вельц-процессом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2010. № 22 (198). С. 75-78.

5. Ахтамов Ф.Э., Нишонов Б.У. К вопросу переработки цинковых кеков // ТиТМП. 2016. №1 (18). С. 69-72.

6. Оценивание параметров регрессионных моделей промышленных объектов при наличии ошибок измерения входа и выхода / А.Л. Рутковский, Х.С. Хосаев, Б.Д. Билаонов, М.А. Ковалева // *Materialy X Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konfrencji "Aktual-*

*ne problem nowoczesnych nauk – 2014"* Volume 26. Techniczne nauka. Fizyka. Przemysl. Nauka I studia 07-15 czewca, 2014. С. 49-54.

7. Рутковский А.Л. Саакянц А.А., Старикова Т.В. Моделирование процесса плавления шихты в вельц-печи // Известия вузов. Цветная металлургия. 2005. № 1. С. 66-68.

8. Дюнова Д.Н., Рутковский А.Л. Разработка и исследование математической модели процесса вельцевания в производстве цинка // Цветная металлургия. 2013. № 4. С. 38-42.

9. Любимов Э. В. *Mathcad. Теория и практика проведения электротехнических расчетов в среде Mathcad и Multisim*. М.: Наука и техника, 2012. 408 с.

10. Максфилд Brent. *Mathcad в инженерных расчетах*. М.: Корона-Век, МК-Пресс, 2010. 78 с.

Поступила 27.03.2018; принята к публикации 16.07.2018

#### Информация об авторах

**Рутковский Александр Леонидович** - д-р техн. наук, профессор кафедры теории и автоматизации металлургических процессов и печей, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), тел. 8(928)855-06-72, e-mail: rutkowskii@mail.ru

**Ковалева Мария Александровна** – канд. техн. наук, доцент кафедры математики и информатики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Владикавказский филиал (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Молодежная, 7); начальник отдела научных исследований НИП, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) «ЭАС» (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), тел. 8(918)830-90-05, e-mail: mary\_kovaleva@list.ru

**Алкацев Владимир Михайлович** – канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), тел. 8(928)491-10-12, e-mail: avm340@mail.ru

**Макоева Алла Константиновна** - аспирант кафедры теории и автоматизации металлургических процессов и печей, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (362021, Россия, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44), тел. 8(928)859-59-54, e-mail: makoeva\_ally@mail.ru

### RESEARCH OF INDUSTRIAL PRODUCTS PROCESSING IN THE ROTARY KILNS IN ZINC PRODUCTION

A.L. Rutkovskiy<sup>1</sup>, M.A. Kovaleva<sup>1,2</sup>, V.M. Alkatsev<sup>1</sup>, A.K. Makoeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

<sup>2</sup>Finance University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch, Vladikavkaz, Russia

**Abstract:** the main object of the analysis is to search for the optimum temperature of the exhaust gases in a rotary-kiln, at which the maximum process productivity is reached. Changing the consumption of cake affects the temperature of the kiln, as well as the process quality. The increase in cake consumption leads to an increase in the total volume of raw materials entering the kiln, more of them is required for heating and evaporation of moisture. The results of the study of the influence of batch and breeze coke loading are presented, the average daily data for a long period of operation of the rotary kiln, which correspond to the normal operation of the kiln, are collected, and the influence of the cake consumption on the temperature of the exhaust gases was analyzed using the software product MathCad. Models of interrelation are considered: linear, cubic, quadratic, and residual dispersion is calculated for each type of model. It was found that the smallest residual variance occurs with a cubic regression model. The obtained results are the basis for constructing an automated system for controlling the temperature of the waste gases. When automating the control of the waelz process, in addition to the tasks of monitoring and stabilizing the regime parameters, it is expedient to solve the operational problem of optimizing the regimes. With this mode, the maximum capacity of the furnace is ensured, therefore, the environmental load is reduced

**Key words:** waelz-process, temperature control, optimization, recovery, exhaust gases, regression analysis

References

1. Topchaev V.P. "Automation of tubular rotating kilns of non-ferrous metallurgy" ("Avtomatizatsiya trubchatykh vrashchayushchikhnya pechey tsvetnoy metallurgii"), Moscow, Metallurgiya, 1971, 129 p.
2. Wernergold A.R., Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. "Evaluation of the performance of a Waelz kiln with incomplete observability of the state of the waelz process", *Actual problems of engineering: proc. of the International Scientific and Practical Conference (Aktual'nye problemy tekhnicheskikh nauk: sb. statey Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Ufa, AERTERNA, 2015, pp. 41-43.
3. Zaitsev V.Ya., Margulis E.V. "Metallurgy of lead and zinc" ("Metallurgiya svintsa i tsinka"), Moscow, Metallurgiya, 2010, 192 p.
4. Wernergold A.R. Kazarinov L.S., Kolesnikova O.V. "Energy-efficient management of the waelz process", *The Bulletin of SUSU Series "Computer technologies, management, radio electronics" (Vestnik YuUrGU. Seriya "Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika")*, 2010, no. 22 (198), pp. 75-78.
5. Akhtamov F.E., Nishonov B.U. "To the question of processing zinc cakes", *TiTMP*, 2016, no. 1 (18), pp.69-72
6. Rutkovski A.L., Khosaev Kh.S., Bilaonov B.D., Kovaleva M.A. "Estimation of parameters of regression models of industrial objects in the presence of input and output measurement errors", *Proc. of X Int. Sci. and Pract. Conf. "Modern Sci. Problems" (Materialy X Miedzynarodowej naukow-praktycznej konfirencji "Aktualne problem nowoczesnych nauk)*, 2014, vol. 26, pp. 49-54
7. Rutkovskiy A.L., Saakyants A.A., Starikova T.V. "Modeling of melting process of charge in a Waelz kiln", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy (Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya)*, 2005, no.1, pp. 66-68.
8. Dyunova D.N., Rutkovskiy A.L. "Development and study of the mathematical model of the process of welt in the production of zinc", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Non-ferrous Metallurgy (Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya)*, 2013, no. 4, pp. 38-42.
9. Lyubimov E.V. "Mathcad. Theory and practice of conducting electrical calculations in the Mathcad and Multisim environment" ("Mathcad. Teoriya i praktika provedeniya elektrotekhnicheskikh raschetov v srede Mathcad i Multisim"), Moscow, Nauka i tekhnika, 2012, 408 p.
10. Maxfield B. "Mathcad in engineering calculations" ("Mathcad v inzhenerykh raschetakh"), Moscow, Korona-Vek, MK-Press, 2010, 78 p.

Submitted 27.03.2018; revised 16.07.2018

Information about the authors

**Aleksandr L. Rutkovskiy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva str., RSO-Alaniya, Vladikavkaz, Russia), tel. 8(918)821-91-02, e-mail: rutkowskii@mail.ru

**Mariya A. Kovaleva**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Finance University under the Government of the Russian Federation, Vladikavkaz Branch; and Head of the Department of scientific research of North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva str., RSO-Alaniya, Vladikavkaz, Russia), tel. 8(918)830-90-05, e-mail: mary\_kovaleva@list.ru

**Vladimir M. Alkatsev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of "Metallurgy of Non-Ferrous Metals" North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva str., RSO-Alaniya, Vladikavkaz, Russia), tel. 8(928)491-10-12, e-mail: avm340@mail.ru

**Alla K. Makoeva**, Graduate student, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva str., RSO-Alaniya, Vladikavkaz, Russia), tel. 8(928)859-59-54, e-mail: makoeva\_alla@mail.ru

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATLAB+SIMULINK ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.М. Литвиненко<sup>1</sup>, Л.Б. Афанасьевский<sup>2</sup>, А.Н. Горин<sup>2</sup>, М.А. Чурсин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Воронежский филиал, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** одним из возможных путей, позволяющих сократить время на определение оптимальных параметров управляющих устройств, является использование вычислительной системы MATLAB и системы блочного моделирования Simulink, интегрированной в MATLAB. Переходные процессы в системе управления при этом формируются в имитационной модели системы управления. Модель системы управления строится в среде Simulink. При реализации имитационной модели в качестве результата получается одна точка в пространстве параметров управляющего устройства. Поэтому следующим этапом является построение плана вычислительных экспериментов на модели в области определения параметров. Формирование входных данных модели осуществляется на языке MATLAB. Далее осуществляется обработка результатов моделирования, т. е. обработка переходного процесса в MATLAB. Переходный процесс формируется как результат интегрирования системы дифференциальных уравнений имитационной модели с переменным шагом, поэтому количество точек переходного процесса для каждой точки из пространства значений входных параметров модели будет различным. Приведены графики переходных процессов в системе управления при оптимальных параметрах управляющего устройства и единичном изменении задающего воздействия. Предложенная организация взаимодействия MATLAB и Simulink может быть применена при имитационном моделировании как непрерывных, так и дискретных систем

**Ключевые слова:** системы управления, переходный процесс, имитационная модель, MATLAB, Simulink

### Введение

Традиционные методы расчета параметров управляющих устройств в большинстве случаев ориентированы на использование частотных характеристик [1, 2]. Заключительным этапом проектирования систем управления является построение переходного процесса. Основным недостаток этих методов – большая трудоемкость даже при использовании ЭВМ.

### Постановка задачи

С использованием вычислительной системы MATLAB и системы блочного моделирования Simulink, интегрированной в MATLAB, определить оптимальные параметры управляющих устройств, оперируя непосредственно с переходным процессом, получаемым с помощью имитационной модели системы управления.

### Методы исследования

В общем случае процесс имитационного моделирования состоит из нескольких этапов: построение модели, планирование и реализация

вычислительных экспериментов на модели, обработка результатов экспериментов. Модель системы управления достаточно легко строится в среде Simulink. Процесс построения модели состоит из достаточно простых операций включения в модель требуемых блоков, задания их параметров и создания связей между блоками, при этом, при необходимости, можно сформировать подсистемы для совокупностей блоков, реализующих логически законченные функции. В качестве примера на рис. 1 представлена структурная схема модели системы управления с ПИ-регулятором. В модели использованы элементы из нескольких библиотек системы: Sources (Constant – источник постоянного сигнала), Sinks (Scope – осциллограф), Continuous (Integrator – интегратор, TransferFcn – передаточная функция), MathOperations (Add – сумматор, Gain – усилитель) [3].

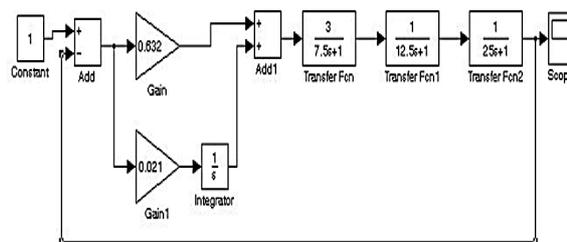


Рис. 1. Структурная схема модели системы регулирования в Simulink

На рис. 2 представлена модель ПИ-регулятора, оформленная в виде подсистемы.

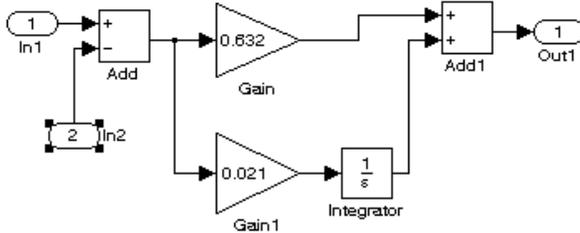


Рис. 2. Модель регулятора, оформленная в виде подсистемы

При реализации имитационной модели в качестве результата получается одна точка в пространстве параметров управляющего устройства. Поэтому следующим этапом является построение плана вычислительных экспериментов на модели в области определения параметров.

План экспериментов, т.е. входные данные модели, можно сформировать в виде структуры. Например, для системы управления с ПИ-регулятором структура будет иметь два поля:  $k_r$  и  $T_i$ :

```
siminp=struct('kr',{},{},'Ti',{}).
```

Заполнение структуры данными организуется программно следующим образом:

- 1) задаются области определения для обоих входных переменных:  $k_{rm} \leq k_r \leq k_{rb}$ ;  $T_{im} \leq T_i \leq T_{ib}$ ;
- 2) отрезки  $[k_{rm}, k_{rb}]$  и  $[T_{im}, T_{ib}]$  разбиваются соответственно на  $n_{kr}$  и  $n_{Ti}$  отрезков длиной  $d_{kr}$  и  $d_{Ti}$ . В результате область определения входных переменных будет поделена на  $n_{kr} \times n_{Ti}$  прямоугольников;
- 3) в поля структуры заносятся значения, соответствующие серединам прямоугольников.

Пример фрагмента кода на языке MATLAB, выполняющего формирование входных данных модели, имеет вид:

```
siminp=struct('kr',{},{},'Ti',{})
krm=0.5; krb=4.5; Tim=10; Tib=200;
nkr=10; nTi=10;
dkr=(krb-krm)/nkr; dTi=(Tib-Tim)/nTi;
k=1;
for i=1:nkr,...%Формирование значений
в полях структуры
for j=1:nTi,...
siminp(k).kr=krm+(i-1)*dkr+0.5*dkr;
siminp(k).Ti=Tim+(j-1)*dTi+0.5*dTi;
```

```
k=k+1;
end;
end;
```

Сформированные значения параметров представлены в рабочей области Workspace среды MATLAB, но не видны в Simulink. Передать их в Simulink можно на программном уровне, создав рабочую область в Simulink. Соответствующий программный код имеет вид:

```
hws = get_param(bdroot, 'modelworkspace');
%Создание рабочего
% пространства в Simulink
hws.DataSource = 'MAT-File';
hws.FileName = 'params';
for i=1:1:100,...
ku=simpin(i).kr; %Извлечение данных из
полей структуры
ku1=1/simpin(i).Ti;
hws.assignin('ku',ku);
hws.assignin('ku1',ku1);
hws.saveToSource;
hws.reload;
open('Control_PI_Subsystem.mdl');
set_param('Control_PI_Subsystem/
Subsystem/Gain','Gain',ku);
set_param('Control_PI_Subsystem/Subsystem/
Gain1','Gain',ku1);
sim('Control_PI_Subsystem.mdl');
...
end;
```

Собственно передача параметров в модель Simulink выполняется функцией `set_param`. Запуск модели в Simulink выполняется с помощью функции `sim`. Оператор цикла `for` обеспечивает сканирование всей области определения входных параметров.

Далее необходимо организовать обработку результатов моделирования, т.е. обработку переходного процесса в MATLAB. Переходный процесс формируется как результат интегрирования системы дифференциальных уравнений имитационной модели с переменным шагом, поэтому количество точек переходного процесса для каждой точки из пространства значений входных параметров модели будет различным.

Величину интервала интегрирования уравнений модели в Simulink следует выбирать такой, чтобы получить полное представление о переходном процессе.

Передача данных, характеризующих переходный процесс, в рабочее пространство MATLAB может быть обеспечена включением в модель блока ToWorkspace из библиотеки Sinks (рис. 3).

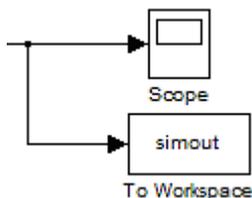


Рис. 3. Фрагмент модели системы управления с блоком ToWorkspace

В рабочую область Workspace среды MATLAB передается массив временных отсчетов tout при интегрировании системы дифференциальных уравнений модели Simulink и массив значений переходного процесса simout.signals.values.

Фрагмент программного кода, осуществляющий поиск параметров, минимизирующих интегральную характеристику переходного процесса при единичном значении возмущения по задающему воздействию, имеет следующий вид (он должен быть включен в предыдущий фрагмент кода вместо многоточия):

```
d=size(tout);
integral=0;
for j=1:d(1),...
    integral=integral+abs(1-
simout.signals.values(j));
    %(1-simout.signals.values(j))^2;
end;
if (integral<intmin)
intmin=integral; kuz=ku; kulz=kul; ii=i;
end;
```

Функция size возвращает в векторе d размер массива по каждой размерности. В качестве результата работы кода возвращаются минимальное значение интегрального показателя переходного процесса intmin, значения параметров управляющего устройства kuz и kulz и их номер в структуре входных данных. Начальное значение переменной intmin должно быть задано достаточно большим до цикла сканирования входных данных.

### Результаты исследования

Графики переходных процессов в системе управления при оптимальных параметрах управляющего устройства и единичном изме-

нении задающего воздействия приведены на рис. 4-5. Естественно, что оптимальные значения параметров зависят от вида используемого показателя качества переходного процесса.

В качестве критериев оптимальности при выборе параметров управляющего устройства использованы следующие:

$$\text{критерий 1: } \min \int_0^{tn} \text{abs}(1 - y(t)) dt,$$

$$\text{критерий 2: } \min \int_0^{tn} (1 - y(t))^2 dt,$$

где  $tn$  – время завершения переходного процесса;  $y(t)$  – выходной сигнал системы управления.

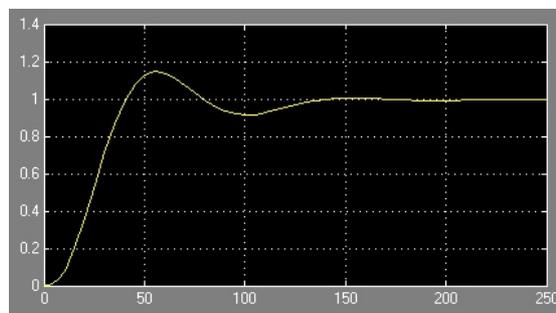


Рис. 4. Переходный процесс в системе при единичном изменении задающего воздействия (критерий 1)

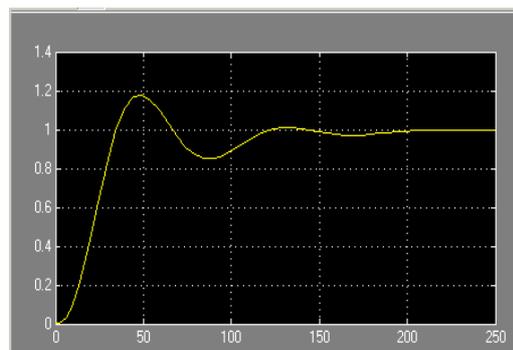


Рис. 5. Переходный процесс в системе при единичном изменении задающего воздействия (критерий 2)

Для определения оптимальных параметров управляющего устройства при возмущении по нагрузке модель Simulink должна быть изменена (рис. 6), а задающее воздействие следует установить нулевым. Критерий оптимальности:

$$\text{критерий 3: } \min \int_0^{tn} y(t)^2 dt.$$

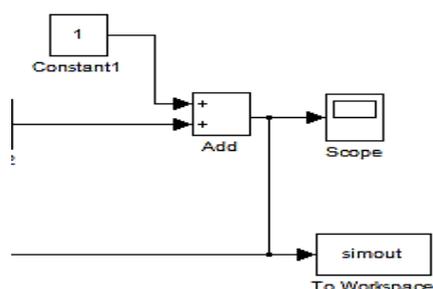


Рис. 6. Фрагмент модели системы управления с единичным возмущением по нагрузке

График переходного процесса в системе управления при оптимальных параметрах управляющего устройства и единичном возмущении по нагрузке приведен на рис. 7.

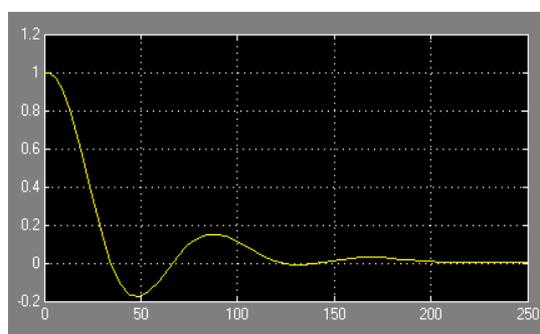


Рис. 7. Переходный процесс в системе при единичном возмущении по нагрузке (критерий 3)

Поступила 15.03.2018; принята к публикации 16.07.2018

#### Информация об авторах

**Литвиненко Александр Михайлович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)235-33-56, e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru

**Афанасьевский Леонид Борисович** - канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-906-675-78-87, e-mail: aflonid@yandex.ru

**Горин Александр Николаевич** - канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: algorin.algoral@mail.ru

**Чурсин Михаил Александрович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (394030, Россия, г. Воронеж, ул. Карла Маркса, д. 67а), тел. 8-910-746-03-10, e-mail: chur1951@yandex.ru

#### USE OF SIMULATION IN THE MATLAB+SIMULINK FOR THE PARAMETRIC SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS

A.M. Litvinenko<sup>1</sup>, L.B. Afanas'evskiy<sup>2</sup>, A.N. Gorin<sup>2</sup>, M.A. Chursin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Russian Economic University n.a. G.V. Plekhanov, Voronezh, Russia

#### Заключение

Рассмотренный подход может быть использован при проектировании и более сложных динамических систем различной природы. Предложенная организация взаимодействия MATLAB и Simulink может быть применена при имитационном моделировании как непрерывных, так и дискретных систем.

#### Литература

1. Ротац В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: Энергия, 1973. 440 с.
2. Болнокин В.Е., Чинаев П.И. Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. Алгоритмы и программы: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 256 с.
3. Герман-Галкин С.Г. MATLAB&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008. 367 с.

**Abstract:** one of the possible ways to reduce the time for determining the optimal parameters of control devices is the use of the MATLAB computer system and the Simulink block modeling system integrated in MATLAB. Transient processes in the control system are formed in the simulation model of the control system. The control system model is built in the Simulink environment. When implementing the simulation model as a result, one point in the parameter space of the control device is obtained. Therefore, the next step is the construction of a plan of computational experiments on the model in the domain of parameter determination. The input data of the model is formed in MATLAB. Further processing of simulation results is carried out, i.e., processing of the transient process in MATLAB. The transient process is formed as a result of integrating the system of differential equations of the simulation model with variable steps, therefore the number of transition points for each point from the space of values of the input parameters of the model will be different. The graphs of the transient processes in the control system are given at the optimum parameters of the control device and a single change in the driving force. The proposed organization of interaction between MATLAB and Simulink can be applied in the simulation of both continuous and discrete systems

**Key words:** control systems, transient process, simulation model, MATLAB, Simulink

#### References

1. Rotach V.Ya. "Calculation of the dynamics of industrial automatic control systems" ("Raschet dinamiki promyshlennykh avtomaticheskikh sistem regulirovaniya"), Moscow, Energiya, 1973, 440 p.
2. Balnokin V.E., Chinaev P.I. "Analysis and synthesis of automatic control systems on a computer. Algorithms and programs: reference book" ("Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya na EVM. Algoritmy i programmy: Spravochnik"), Moscow, Radio i svyaz', 1991, 256 p.
3. Hermann-Galkin S.G. "Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC" ("Matlab&Simulink. Proyektirovanie mekhatronnykh sistem na PK"), St. Petersburg, Korona-Vek, 2008, 367 p.

Submitted 15.03.2018; revised 16.07.2018

#### Information about the authors

**Aleksandr M. Litvinenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 84732353356, e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru

**Leonid B. Afanas'evskiy**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykx Bol'shevnikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 8-906-675-78-87, e-mail: afleonid@yandex.ru

**Aleksandr N. Gorin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykx Bol'shevnikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: algorithm.algorithm@mail.ru

**Mikhail A. Chursin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh branch of the Russian University of Economics n. a. G.V. Plekhanov (67a Karl Marx str., Voronezh 394030, Russia), tel. 8-910-746-03-10, e-mail: chur1951@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНИВАНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

С.В. Иванов<sup>1</sup>, Н.Я. Половинчук<sup>2</sup>, Е.В. Маркин<sup>3</sup>, В.И. Тимофеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации (Ростовский филиал), г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>3</sup>Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, Московская область, г. Балашиха, Россия

**Аннотация:** одним из направлений совершенствования систем управления высокоманевренными беспилотными летательными аппаратами (БЛА) является формирование управления на конечном участке траектории. Однако точность таких алгоритмов в традиционно используемых системах управления снижается вследствие действия возмущений большого уровня, которые являются априорно неопределенными. Для повышения точности используется алгоритм обработки навигационных измерений на основе алгоритма обобщенного фильтра Калмана. В алгоритмах терминального управления, связанных с прогнозированием будущего движения, присутствуют итерационные процедуры, что при ограниченных возможностях бортовых цифровых вычислительных машин (БЦВМ) не позволяет существенно увеличивать частоту замыкания контура обратной связи. Алгоритмы терминального управления движением БЛА позволяют учитывать конечные условия доставки летательного аппарата в конечную область пространства, но для расчета траекторий движения вдоль программной оптимальной траектории в условиях неопределенностей, связанных с противодействием средств противоборствующей стороны, необходимы алгоритмы управления, способные формировать управляющее воздействие для совершения маневров уклонения на всех этапах движения. Использование подхода, учитывающего формирование в контуре прогнозирования алгоритмов идентификации, позволяет компенсировать ограниченные вычислительные возможности бортовых ЭВМ и повысить точность приземления БЛА в заданную терминальную область. Проведено численное моделирование представленного алгоритма

**Ключевые слова:** БЛА, оптимальное управление движением, навигационная информация, оценивание

### Введение

Традиционные подходы к решению задачи оптимального управления беспилотным летательным аппаратом с априорно неопределенными параметрами предполагают: оценивание и идентификацию вектора состояния и вектора параметров системы; формирование оптимального управления на основе уточненной математической модели системы [1, 2]. Вследствие этого при решении таких задач используются упрощенные модели. Неадекватность принятой модели реальному движению в этом случае приводит к движению ЛА по неоптимальной траектории и не позволяет с высокой точностью выполнить терминальные условия.

В связи с этим представляет интерес разработка способов решения задачи оптимизации на основе алгоритмов оценивания навигационной информации с целью повышения точности параметров движения ЛА на конечном участке траектории.

### Постановка задачи

Совершенствование систем наведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) связано с повышением характеристик точности. Одним из важных направлений повышения точности является уменьшение влияния случайных факторов (ошибок), воздействующих на систему наведения БЛА. Для решения задачи повышения точности целесообразно использовать обработку навигационных измерений на основе методов оптимального оценивания. Для этого воспользуемся известным алгоритмом на основе обобщенного фильтра Калмана [9]. Обозначив управление  $U=U(t)=P(t)$  как известную функцию времени и применяя обозначения матриц Якоби, запишем:

$$\dot{\hat{x}}_p = f(\hat{x}_p, U, t) + P \left( \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_p} \right)^T R^{-1} [Z - h(\hat{x}_p, t)] \quad (1)$$

$$\dot{P} = \frac{\partial f}{\partial \hat{x}_p} P + P \left( \frac{\partial f}{\partial x_p} \right)^T - P \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_p} R^{-1} \frac{\partial h}{\partial \hat{x}_p} P + Q, \quad (2)$$

где  $\hat{x}$  – оценка (математическое ожидание) параметров движения БЛА

$P$  – ковариационная матрица ошибок оценивания (дисперсии)

$R$  – матрица интенсивностей шумов измерений

$Q$  – матрица интенсивностей случайных факторов, влияющих на БЛА.

Структурная схема основного модуля (1) обобщенного фильтра Калмана-Бьюси (ФКБ) вместе со структурой оцениваемого процесса представлена на рис. 1. Эта модель охвачена многомерной обратной связью по вектору измерений  $Z = h(\hat{x}, t)$ , и этот вектор прежде всего умножается на обратную матрицу интенсивностей шумов измерений  $R^{-1}$ . Полагая, что каналы измерений системы навигации БЛА независимы, то и компоненты вектора шумов  $\xi_A(t)$  независимы и матрицы  $R$  и  $R^{-1}$  – диагональные.

При этом компоненты вектора невязки измерений в контуре обратной связи умножаются на коэффициенты обратно пропорциональные интенсивности соответствующих шумов измерения [2]. За счет этого сигнал точного (с меньшим шумом) акселерометра входит с большим весом, а сигнал «грубого» акселерометра (с интенсивным флуктуационным шумом) – с малым «весом».

Далее следует умножение «взвешенного» векторного сигнала невязки на  $(\partial h / \partial \hat{x})^T$ . Это соответствует учету чувствительности векторной функции наблюдения к приращениям аргумента, причем производные вычисляются на оцененном движении  $\hat{x}(t)$ . После этого следует умножение на матрицу  $P$ , приближенно равную ковариационной матрице ошибок оценивания, после чего контур обратной связи по вектору невязки замыкается перед многомерным интегрирующим звеном, см. рис. 1.

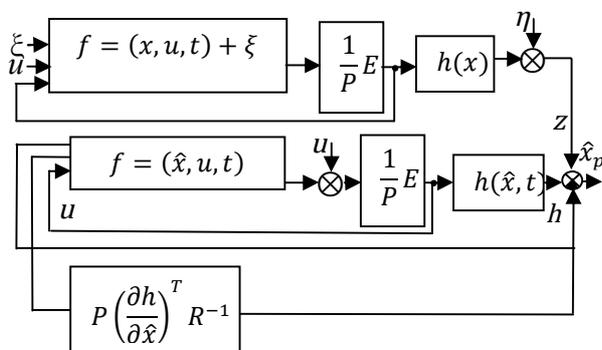


Рис. 1. Структура обработки навигационной информации на основе обобщенного ФКБ

Матрица  $P$  определяется ковариационным уравнением (2), которое связано с основным

алгоритмическим модулем только через матрицы Якоби  $\partial f / \partial \hat{x}$ ,  $\partial h / \partial \hat{x}$ .

Решение ковариационного уравнения (2) для нелинейных процессов лишь приближенно равно ковариационной матрице ошибок оценивания.

Это следует как из приближенности (субоптимальности) алгоритма (1) и (2) в целом, так и из стохастичности уравнения (2) [3].

Если дисперсии ошибок оценивания велики, то имеет место «глубокая» отрицательная обратная связь в основном модуле фильтра (рис. 1). Процесс «списания» или ликвидации ошибок оценивания при этом идет интенсивно. При уменьшении дисперсий «глубина» обратной связи уменьшается, а при  $P \rightarrow 0$  процесс оценивания выключается.

### Синтез структуры системы наведения БЛА с обобщенным фильтром Калмана-Бьюси и алгоритмом прогнозирующей модели

Для синтеза управления БЛА воспользуемся одним из беспойсковых алгоритмов адаптивных систем автоматического управления (основанных на теории оценивания) первого порядка. Наиболее рациональным для решения задач синтеза является алгоритм одновременного оценивания и идентификации в виде обобщенного фильтра Калмана-Бьюси (ФКБ).

Для управляемого процесса этот субоптимальный алгоритм в непрерывной форме имеет вид (2).

Модель свободного прогнозируемого движения имеет вид:

$$\dot{x}_p^m = f(x_p^m, \tau) \quad (3)$$

Пусть общее решение уравнения (3) на цикле прогнозирования для  $t \leq 0$  при начальных условиях:

$$x^m(t) = \hat{x}(t) \quad (4)$$

обозначено через  $X_p[x_p^m(t), t, 0] = X_p[\hat{x}_p(t), t, 0]$ .

В качестве условия оптимизации выберем условие минимума энергетических затрат. В этом случае оптимизируемый функционал будет иметь вид:

$$J_k = V_3(x, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} U^I(\tau) K_0 U(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $K_0$  – известная симметричная матрица коэффициентов,  $V_3$  – заданная область суще-

ствования параметров состояния БЛА в конечный момент времени.

Решение задач в форме синтеза для нелинейных многомерных динамических объектов типа БЛА требует перехода от классических функционалов типа (5) к функционалам обобщенной работы. Для многих задач подобного типа они позволяют получить решения основной проблемы оптимизации управления в реальном масштабе времени.

Полуопределенность функционала обобщенной работы заключается в том, что он содержит неизвестное до выполнения синтеза оптимального управления  $u_{оп}$ . Это управление процессом типа (8), доставляющее минимум рассматриваемому функционалу.

$$\dot{x}_p = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = f(x_p, U, t) + f_o(x_p)W_t =$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{\rho S |V_B|^2}{2m|V|} \begin{bmatrix} C_{x0}V_x + C'_{y0}V_y \left( \vartheta - \arccos\left(\frac{V_x}{|V|}\right) \right) \\ C_{x0}V_y + C'_{y0}V_x \left( \varphi - \arccos\left(\frac{V_y}{|V|}\right) \right) \\ -C_{x0}V_z + C'_{y0} \left( \psi - \arcsin\left(\frac{V_z}{|V|}\right) \right) \end{bmatrix} - \frac{\mu}{r^3} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\vartheta \\ \sin\varphi \\ -\psi \end{bmatrix} P \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} V_x & V_y \left( \vartheta - \arccos\left(\frac{V_x}{|V|}\right) \right) \\ -\frac{\rho S |V_o|^2}{2m|V|} \begin{bmatrix} V_x & V_y \left( \vartheta - \arccos\left(\frac{V_x}{|V|}\right) \right) \\ V_y & -V_x \left( \varphi - \arccos\left(\frac{V_y}{|V|}\right) \right) \\ -V_z & \left( \psi - \arccos\left(\frac{V_z}{|V|}\right) \right) \end{bmatrix} \\ 0 & I_2 \end{bmatrix}$$

Тогда функционал обобщенной работы с аддитивными квадратичными функциями затрат на управление имеет вид:

$$J = V_3(x, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} U^T(\tau)KU(\tau) + U_{оп}^T(\tau)KU_{оп}(\tau)d\tau$$

$$\frac{d}{du_{оп}} [U_{оп}^T K_o U_{оп}] = -\frac{\partial}{\partial x} \{V_3[x_p]\} \quad (6)$$

или

$$2U_{оп}^T K_o I = -\frac{\partial V_3}{\partial x} \quad (7)$$

$$K_{оп}^T = -\frac{1}{2} \frac{\partial V_3}{\partial x} K_o^{-1} I^T, \quad (8)$$

где I – единичный вектор.

Структура алгоритмического обеспечения показана на рис. 2.



Рис. 2. Структура алгоритма управления БЛА

В общем виде структура адаптивного к влиянию возмущающих факторов алгоритма управления движением БЛА с прогнозом параметров в конечный момент времени должна основываться на следующем (рис. 2) [9].

Управляемый процесс наблюдается посредством акселерометров инерциальной системы управления БЛА. Вектор сигналов наблюдения поступает в систему (модуль) субоптимального оценивания [10, 12]. На выходе этой системы формируется оценка  $\hat{x}$  вектора состояния принятой достаточно полной математической модели управляемого движения БЛА [12] в атмосфере (6-8).

Система (модуль) оптимального управления на основе указанной модели управляемого процесса, текущей оценки вектора состояния и критерия оптимизации (5) формирует оптимальное управление (8) [4]. Это управление воздействует на управляемый процесс и используется в модуле оценивания.

Структура алгоритмического обеспечения представлена на рис. 3 и реализуется бортовой ЦВМ.

Аналитическое решение системы (1,2) в общем случае получить затруднительно. Поэтому рациональным путем, обеспечивающим нахождение решения системы, является применение численных методов в соответствии со структурой алгоритмического обеспечения.

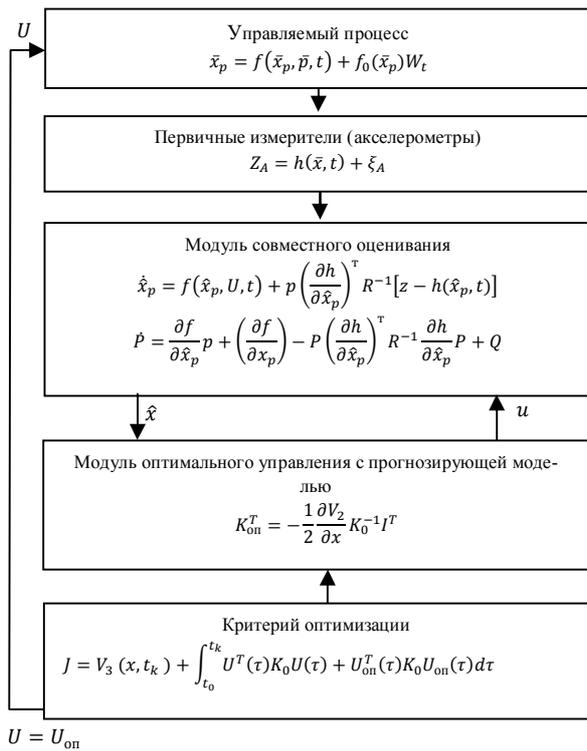


Рис. 3. Структура алгоритмического обеспечения

Реализация алгоритмов в более простой форме может быть основана на построении дискретных аналогов с использованием численного интегрирования дифференциальных уравнений или использовании алгоритмов с дискретным временем для исходных разностных схем модели управляемого процесса.

### Пример

Для оценки эффективности спроектированной системы наведения, реализующей адаптивный к влиянию возмущающих факторов метод управления движением БЛА [12] с прогнозом параметров в конечный момент времени, выполнено численное моделирование.

Обычно численное решение этой задачи получают, вычисляя сначала значение производной, а затем, задавая малое приращение  $\hat{x}(t)$  и переходя к новой точке, определяют по наклону кривой, вычисленному с помощью дифференциального уравнения. График численного решения представляет собой последовательность коротких прямолинейных отрезков, которыми аппроксимируется истинная кривая  $\hat{x}(t)$ . Сам численный метод определяет порядок действий при переходе от данной точки кривой к следующей, т.е. интегрируя каждое из уравнений, получаем графики изменения

векторов скорости и состояния – траекторию полета БЛА [5].

Для этого воспользуемся методом Рунге-Кутты, в котором для нахождения следующей точки на кривой  $\hat{x}(t)$  требуется информация лишь об одном предыдущем шаге [6].

Дифференциальное уравнение (2) представляет задачу Коши, при решении которого с помощью представленных формул, подставляя управление (8), получим значения  $\hat{x}(t)$  в любой момент времени, считая, что в начальный момент  $t=0$ . То есть на каждом шаге интегрирования получим значения параметров, характеризующих вектор скорости и вектор, состоящий в каждой точке траектории.

В качестве условия окончания решения уравнений принято условие посадки БЛА на Землю (когда  $R=R_3$ ).

Алгоритм решения задачи реализуется программой NAV-LA Ø1 (программа составлена для решения на ЭВМ IBMPC/AT – 486, используется язык PASCAL-6-0) [10,11] (рис. 4).

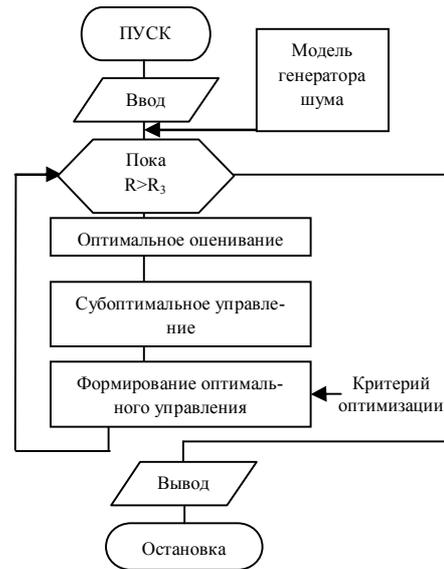


Рис. 4. Схема машинного алгоритма

Структурная схема системы наведения, реализующая адаптивный к влиянию возмущающих факторов метод управления движением БЛА с прогнозом параметров в конечный момент времени, представлена на рис. 5.

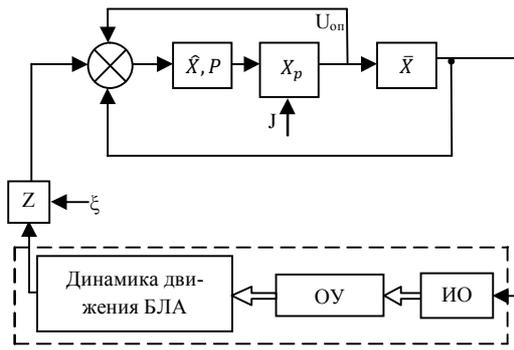


Рис. 5. Контур наведения БЛА с алгоритмом оценивания навигационной информации (УО – управляющие органы, ИО – исполнительные органы)

Для моделирования были заданы начальные условия, характеризующие:

1. Плотные слои атмосферы – глобальную модель вариаций плотности атмосферы для октября месяца, географической широты  $60^\circ$ , и модель зональной и меридиональной компонент скорости ветра также для октября месяца и широты  $60^\circ$ .

2. Характеристики БЛА – коэффициенты  $C_x, C_y^\alpha$  заданы в соответствии с [8].

3. Модель гравитационного поля Земли, угловая скорость вращения Земли -  $\omega_3$  – и радиус Земли  $R_3$ .

4. Вектор оценок состояния в начальный момент времени  $\hat{x}(0) \{6500; 3200; 100; 1,6 \cdot 10^4, 9,6 \cdot 10^4, 5,1 \cdot 10^3\}^T$

5. Матрица  $P(0)$  задана в следующем виде:

$$P(0) = \begin{vmatrix} 4 \cdot 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot 10^3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9,7 \cdot 10^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,7 \cdot 10^{-12} \end{vmatrix}$$

6. Конечные условия:  $X_3(t_k) = [300, 300, 1,7 \cdot 10^5, 6,3 \cdot 10^3, 2,2 \cdot 10^4]^T$ . Матрица  $K_0$  – единичная  $3 \times 3$ .

В момент выполнения конечных условий в соответствии с алгоритмом функционирования управление будет передано оператору печати значений оценок вектора состояния  $\hat{x}(t_k)$  в момент посадки БЛА на Землю [11].

Полученные при моделировании численные результаты представлены на рис. 6 и рис. 7.

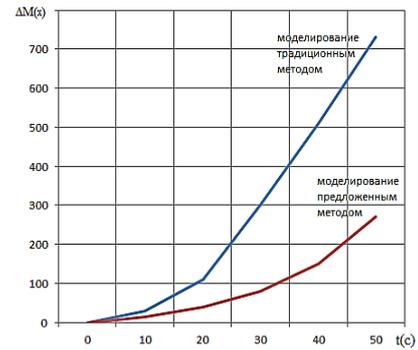


Рис. 6. Отклонение от эталонной траектории при моделировании традиционным и предложенным методами

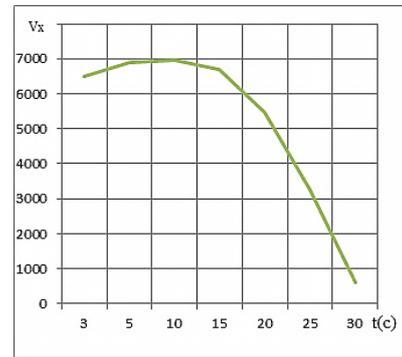


Рис. 7а. Моделирование эталонной продольной составляющей скорости БЛА по оси x

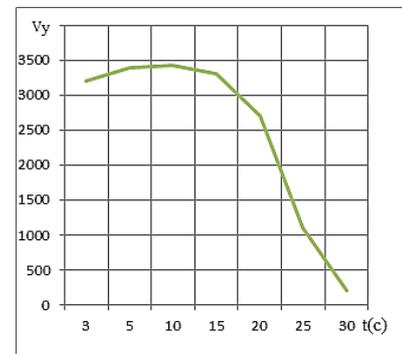


Рис. 7б. Моделирование эталонной продольной составляющей скорости БЛА по оси y

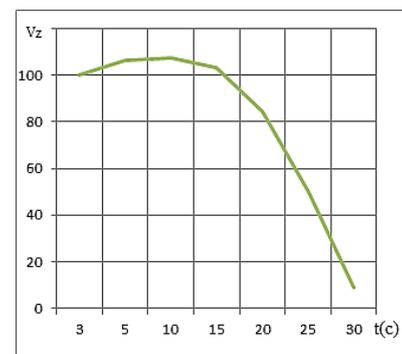


Рис. 7в. Моделирование эталонной продольной составляющей скорости БЛА по оси z

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что разработанный метод адаптивного к влиянию возмущающих факторов управления движением БЛА с прогнозом параметров в конечный момент времени является более точным, чем традиционные [11]. Данный метод управления дает повышение точности приземления БЛА на 20% по координатам и скоростям.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности рассмотренного подхода к поиску оптимального управления движением летательного аппарата на основе алгоритма оценивания навигационной информации и возможности его реализации в реальном времени на бортовых вычислительных средствах [7].

Алгоритмическая реализация предложенного метода не вызывает существенного повышения требований к вычислительным характеристикам современных бортовых ЭВМ.

### Литература

1. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. М.: Наука, 1982. 23 с.

2. Андреевский В.В. Динамика спуска в атмосфере. М.: Машиностроение, 1970. 120 с.

3. Боднер В.А., Роднищев Н.Е., Юриков Е.П. Оптимизация терминальных стохастических систем. М.: Машиностроение, 1987. 48 с.

4. Брайсон А., Хо Ю. Ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 212 с.

5. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987. 107 с.

6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 54 с.

7. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука, 1977. 156 с.

8. Рамазов А.А., Сихарулидзе Ю.Г. Глобальная модель вариаций плотности атмосферы Земли на высотах 0-150 км// Космические исследования. 1980. Т. 18. № 4. 72 с.

9. Справочник по теории автоматического управления/под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 76 с.

10. Половинчук Н.Я., Щербань И.В. Методы и алгоритмы терминального управления движением летательных аппаратов: монография. Ростов-н/Д: Министерство Обороны. Ростовский военный институт ракетных войск, 2004. 76 с.

11. Половинчук Н.Я., Ардашов А.А. Проектирование систем управления баллистических летательных аппаратов. Ростов-н/Д: Министерство Обороны. Ростовский военный институт ракетных войск, 2010. 46 с.

12. Половинчук Н.Я., Иванов С.В. Синтез алгоритма терминально-оптимального управления высокоскоростным маневрирующим летательным аппаратом // Двойные технологии. 2017. № 1. С. 43-44.

Поступила 19.02.2018; принята к публикации 16.07.2018

### Информация об авторах

**Иванов Станислав Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент, Донской государственной технической университет (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), тел. 8-(918)-087-27-50, e-mail: sta399@yandex.ru

**Половинчук Николай Яковлевич** – канд. техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет гражданской авиации (Ростовский филиал) (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Шолохова, д. 262В), тел. +7 (928)-603-63-12, e-mail: npolovinchuk@yandex.ru

**Маркин Евгений Викторович** – соискатель, Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (143900, Россия, г. Балашиха, ул. Карбышева, д. 8), тел. +7 (920)-686-95-59, e-mail: mistake1832@yandex.ru

**Тимофеев Владимир Игорьевич** – доцент, Донской государственной технической университет (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), тел. +7 (905)-459-80-68, e-mail: yman9@rambler.ru

### METHOD OF OPTIMAL CONTROL OF AIRCRAFT MOVEMENT ON THE ALGORITHM OF OPTIMAL ESTIMATION OF NAVIGATION INFORMATION

S.V. Ivanov<sup>1</sup>, N.Ya. Polovinchuk<sup>2</sup>, E.V. Markin<sup>3</sup>, V.I. Timofeev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation (Rostov branch), Rostov-on-Don, Russia

<sup>3</sup>Military Academy of Strategic Missile Forces after Petr the Great, Moscow region, Balashikha, Russia

**Abstract:** one of the directions for improving control systems for highly maneuverable unmanned aerial vehicles (UAVs) is the formation of control on the final section of the trajectory. However, the accuracy of such algorithms in traditionally used control systems is reduced due to the action of large-level perturbations, which are a priori uncertain. To increase the accuracy of the work, the algorithm for processing navigation measurements is used on the basis of the algorithm of the generalized Kalman filter. There are iterative procedures in the terminal control algorithms associated with the prediction of the fu-

ture motion, which, with limited capabilities of the computer, makes it impossible to significantly increase the frequency of the loop closure. The algorithms of the terminal control of the UAV's movement allow to take into account the final conditions of the aircraft's delivery to the final area of space, but in order to calculate the trajectories of motion along the program optimal trajectory, in the conditions of uncertainties associated with opposing the means of the opposing side, control algorithms that are able to form control actions for making maneuvers of evasion at all stages of motion are needed. Using an approach that takes into account the formation of identification algorithms in the forecasting loop makes it possible to compensate for the limited computing capabilities of on-board computers and to improve the accuracy of landing of UAVs in a given terminal area. The numerical simulation of the presented algorithm is carried out

**Key words:** UAV, motion control, navigation information, estimation

### References

1. Brammer K., Siffling G. "Filter Kalman – Bucy" ("Fil'tr Kalmana – B'yusi"), Moscow, Nauka, 1982, 23 p.
2. Andreevskiy V.V. "Dynamics of the descent in the atmosphere" ("Dinamika spuska v atmosfere"), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 120 p.
3. Bodner V.A., Rodnischev N.E., Yurikov E.P. "Optimization of terminal stochastic systems" («Optimizatsiya terminalnykh stokhasticheskikh sistem»), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 48 p.
4. Bryson A., Ho Yu Shi "Applied optimal control theory" ("Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya"), Moscow, Mir, 1972, 212 p.
5. Bukov V.N. "Adaptive predictive flight control systems" ("Adaptivnyye prognoziryushchie sistemy upravleniya poletom"), Moscow, Nauka, 1987, 107 p.
6. Korn G., Korn T. "Handbook of mathematics" ("Spravochnik po matematike"), Moscow, Nauka, 1973, 54 p.
7. Krasovskiy A.A., Bukov V.N., Shendrik V.S. "Universal algorithms for optimal control of continuous processes" ("Universalnye algoritmy optimal'nogo upravleniya nepreryvnymi protsessami"), Moscow, Nauka, 1977, 156 p.
8. Ramazov A.A., Sikharulidze Yu. G. "Global model of the density variations of the Earth's atmosphere at the altitudes of 0-150 km. Space exploration" ("Global'naya model' variatsiy plotnosti atmosfery Zemli na vysotakh 0-150 km. Kosmicheskie issledovaniya"), vol. 18, no. 4, 1980, 72 p.
9. Krasovskiy A.A. ed. "Handbook of the theory of automatic control" ("Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A.A. Krasovskogo»), Moscow, Nauka, 1987, 76 p.
10. Polovinchuk N.Ya., Shcherban' I.V. "Methods and algorithms of terminal control of aircraft motion: monography" ("Metody i algoritmy terminal'nogo upravleniya dvizheniem letatel'nykh apparatov. Monografiya»), Moscow region, 2004.
11. Polovinchuk N.Ya., Ardashov A.A. "Design of management systems of ballistic aircrafts" ("Proektirovanie sistem pravleniya ballisticheskikh letatel'nykh apparatov"), Moscow region, RVI RV, 2010, 46 p.
12. Polovinchuk N.Ya., Ivanov S.V. "Synthesis of an algorithm of terminal optimal control of high-speed maneuvering aircraft", *Double technologies (Dvoynye tekhnologii)*, 2017, no. 1, pp. 43-44.

Submitted 19.02.2018; revised 16.07.2018

### Information about the authors

**Stanislav V. Ivanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don 344000, Russia), tel. 8-(918)-087-27-50, e-mail: sta399@yandex.ru

**Nikolay Ya. Polovinchuk**, Cand. Sc. (Technical), Professor, Moscow State Technical University of Civil Aircraft (Rostov Branch) (262B Sholohova prospekt, Rostov-on-Don 344000, Russia), tel. +7(928)-603-63-12, e-mail: npolovinchuk@yandex.ru

**Evgeniy V. Markin**, Seeker, Military Academy of the Strategic Missile Forces (8 Karbysheva st., Balashikha 143900, Russia), tel. +7 (920)-686-95-59, e-mail: mistake1832@yandex.ru

**Vladimir I. Timofeev**, Associate Professor, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don 344000, Russia), tel. +7 (905)-459-80-68, e-mail: yman9@rambler.ru

## ЧАСТИЧНО АВТОНОМНЫЙ РОБОТ-ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А.Ю. Соловьев, М.А. Цуканов

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)  
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,  
г. Старый Оскол, Россия

**Аннотация:** рассматриваются задача наделения робота-телеприсутствия функциями частичной автономности, сфера применения роботов-телеприсутствия, делается анализ текущих решений на рынке подобных роботов. Приводится классическая схема управления роботами-телеприсутствия, и на основе представленной схемы выделяются основные недостатки подобных решений, а именно - большая нагрузка на оператора в процессе управления роботом, а также сложность процесса обучения оператора. На основании выявленных недостатков предлагается решение, которое способно наделить роботов-телеприсутствия частичной автономностью. В качестве автономных функций рассматриваются распознавание человека, следование за человеком, обгибание препятствий. Данные функции автономности были установлены как приоритетные, которые помогут избежать проблем при управлении роботами-телеприсутствия. Проанализирован рынок подобных решений, в ходе анализа было определено, что большинство решений не обладают даже частичной автономностью. Для реализации решения наделения робота-телеприсутствия функциями автономности авторы предлагают использовать роботизированную платформу, которая была разработана на кафедре автоматизированных информационных систем управления Старооскольского технологического института. Приводятся структурная схема данного решения, также структура мультиагентной системы для решения задач по проведению мероприятий, требующих участия нескольких роботов-телеприсутствия

**Ключевые слова:** робот-телеприсутствия, функции частичной автономности, мультиагентная система

### Введение

На сегодняшний день все большую популярность приобретают так называемые роботы-телеприсутствия.

Робот-телеприсутствия - это роботизированная конструкция, выполненная, как правило, в антропоморфном форм-факторе, которая управляется человеком и позволяет в интерактивной форме взаимодействовать с людьми. То есть человек при помощи ноутбука или стационарного компьютера при помощи специализированного программного обеспечения взаимодействует с людьми и объектами, имитируя собственное присутствие.

Сфера применения подобных роботов достаточно обширна:

- Развлечения и представления;
- Рекламные акции и промоутинг;
- Помощь в проведении мероприятий различного рода;
- Экскурсионные программы;
- Консультирование людей по различным вопросам.

Как видим, спектр областей применения достаточно широк.

### Проблемы роботов-телеприсутствия

При анализе различных решений было выявлено, что большинство современных роботов-телеприсутствия обладают рядом недостатков. На рис. 1 приведена типичная схема работы оператора с роботом-телеприсутствия [5-8].

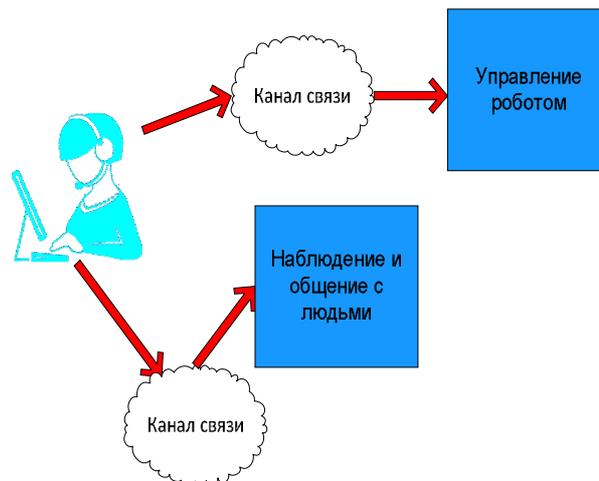


Рис. 1. Схема работы оператора с роботом-телеприсутствия

Исходя из рис. 1, можно выделить основные недостатки работы оператора по приведенной стандартной схеме управления:

1. Управление и взаимодействием с людьми занимается один оператор. Это приводит к тому, что оператору сложно одновременно решать две совершенно разные задачи.

2. Исходя из сложности решения двух задач, вытекает проблема замедления принятия решений оператором по взаимодействию с объектами и людьми. Например, замедленная скорость ответа при общении с людьми.

3. Оператора необходимо обучать управлению роботом, так как управление роботом является достаточно специфичной задачей.

### Предлагаемое решение

В связи с выявленными недостатками возникает задача о наделении робота некоторыми функциями автономности. Авторами были выделены наиболее приоритетные функции, которые помогут избежать, по крайней мере частично, вышеперечисленных проблем:

- Распознавание человека.
- Следование за человеком.
- Огибание препятствий.
- Возвращение на исходную позицию.

При анализе рынка подобных роботов было установлено, что большинство из них управляются по классической схеме [5-8]. Однако есть разработки, в которых в той или иной мере внедрены функции автономности. Так робот-телеприсутствия Promobot [4], по заявлению разработчиков, наделен функционалом распознавания человека и лиц и имеет базу знаний для общения с людьми. По мнению авторов, данный функционал полезен, но в первую очередь робот должен быть полностью автономным, что касается его движения.

Для решения поставленных проблем, а также отработки научных решений предлагается использовать роботизированную платформу «Айтишка». Данный робот является классическим роботом-телеприсутствия, он был создан на кафедре автоматизированных информационных систем управления в Старооскольском технологическом институте (филиале МИСиС). На рис. 2 приведен общий вид разработанного робота.



Рис. 2. Общий вид робота-телеприсутствия для реализации функций автономности

Как было сказано выше, робот является классическим роботом-телеприсутствия, то есть полностью управляется оператором. На рис. 3 приведена структурная схема данного робота.

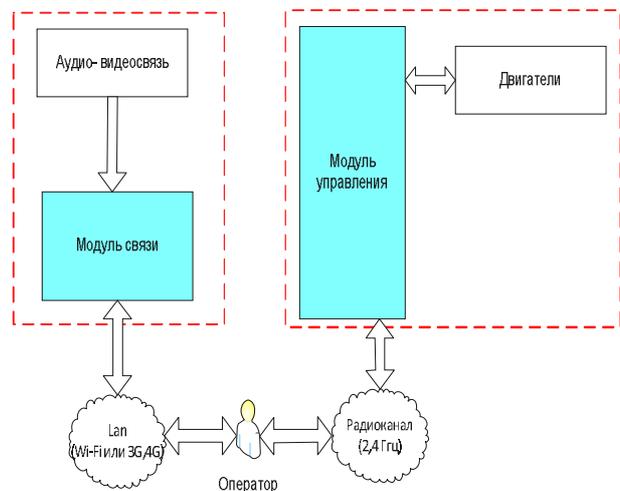


Рис. 3. Структурная схема существующего робота-телеприсутствия

Как видим из рис. 3, робот состоит из двух независимых модулей: модуль управления и модуль связи. Модуль управления построен на базе микроконтроллера Atmega и связан с аппаратурой управления по радиоканалу 2,4 ГГц. Через аппаратуру управления оператор управляет двигателями, приводя робота в движение.

Модуль связи представляет собой мини-компьютер с веб-камерой и аудиосистемой. При помощи камеры оператор на своем компь-

ютере или ноутбуке ориентируется при движении робота, а также определяет местоположение объектов и людей для дальнейшего взаимодействия. Связь с миникомпьютером и оборудованием оператора осуществляется по стандартным каналам связи либо с использованием оборудования Wi-Fi, либо с использованием стандартов мобильного интернета 3G или 4G.

Отметим, что во время эксплуатации данного робота-телеприсутствия были выявлены недостатки в каналах связи:

- Неполное покрытие местности сетями 3G, 4G.
- Не всегда качественная мобильная связь в зданиях.
- Оборудование, сертифицированное Wi-Fi, работает только в зонах прямой видимости, а также в местах массовых скоплений людей и при наличии стороннего оборудования беспроводной связи, канал связи между роботом и оператором становится сильно зашумленным, что ведет к некачественному видеоизображению и невозможности вести диалог.

На рис. 4 приведена схема предлагаемой модификации робота-телеприсутствия. Модификация представляет собой надделение робота функциями автономности.

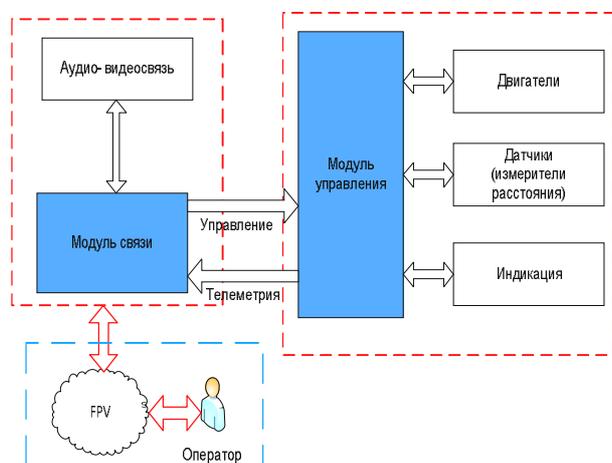


Рис. 4. Структурная схема предлагаемого к разработке робота-телеприсутствия

Исходя из рис. 4, можно выделить несколько ключевых моментов:

- К модулю управления добавляются датчики, позволяющие ориентироваться роботу на месте, например ультразвуковые или инфракрасные датчики расстояния.
- Канал передачи данных вместо сотовой связи или связи стандарта Wi-Fi заменяется на систему FPV (единую систему управления и

получения аудио-, видеосигналов в реальном времени). Данная система более устойчива к расстоянию и помехам, нежели сотовая связь или Wi-Fi.

- Модуль связи и модуль управления объединяются, что позволит модулю связи получать телеметрию и осуществлять управляющее воздействие на двигатели робота.

Как видим, оператор при внедрении данной схемы избавляется от одной из своих задач, а именно управления роботом. Конечно же, робот сможет переходить на режим ручного управления при возможном возникновении различных сбоев или дезориентации робота в пространстве.

Теперь рассмотрим более подробно схему автономного движения. На рис. 5 приведена схема автономного движения робота.

Камера, подключенная к миникомпьютеру raspberry pi, фиксирует видеоизображение и посредством открытой библиотеки обработки видеоизображений распознает человека, далее по протоколу UART компьютер на основе телеметрии, полученной с модуля управления, а также на основе распознанного изображения с камеры управляет двигателями, приводя робота в движение.

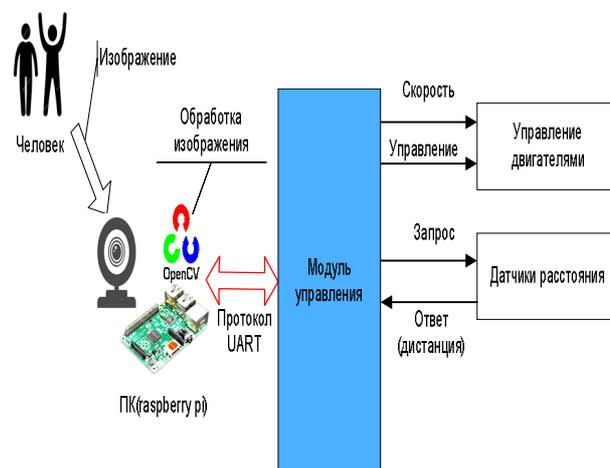


Рис. 5. Схема автономного движения робота

### Применение мультиагентного подхода при работе нескольких роботов-телеприсутствия

Как уже было упомянуто, при использовании разработанного робота в качестве гида или экскурсовода необходимо повышать его автономность. Проведенная модернизация робота-телеприсутствия позволит решить задачи движения по заданной траектории и распознавания человека.

Решение задачи распознавания человека необходимо для инициализации начала работы робота по проведению экскурсии по заданному маршруту среди конечного набора точек маршрута (экспонатов). При этом можно осуществлять настройку проведения индивидуальных или групповых экскурсий. Во втором случае движение робота будет привязано к распознаванию группы, количество элементов которой нужно будет определить у него в настройках.

Однако, что в первом, что и во втором случаях возможны ситуации, когда необходимо использовать несколько роботов для обслуживания экскурсий.

В такой ситуации недостаточно научить роботов определять человека или группу лиц, необходим механизм коммуникации между ними. Изучив современный опыт решения подобных задач [1-3], мы приняли решение об использовании мультиагентной платформы как средства интеграции роботов. Данный подход также не исключает наличия оператора в общей системе, но значительно облегчает его работу при управлении парком роботов. Наделение робота-телеприсутствия частичными функциями автономности позволяет рассматривать его как автономного агента в мультиагентной среде.

Рассмотрим функционал составных частей мультиагентной системы, представленной на рис. 6.

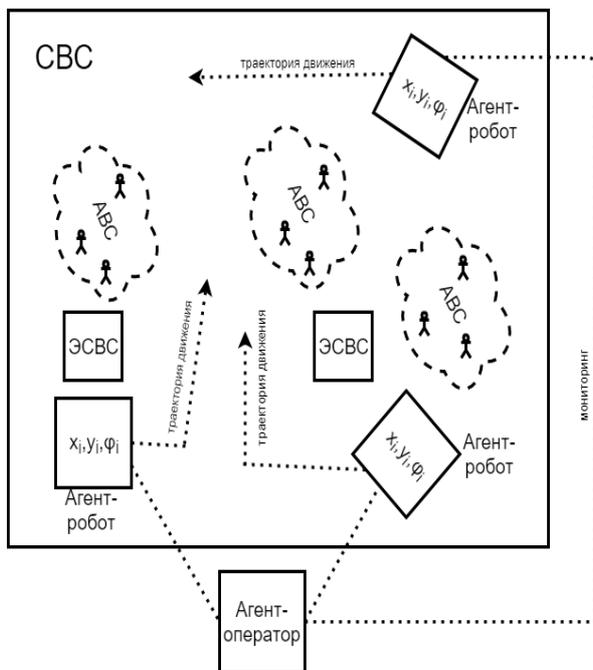


Рис. 6. Структурная схема мультиагентной системы взаимодействия роботов

Агент-робот – основной компонент реализуемой системы, который решает задачи распознавания человека (группы лиц), движения по заданной траектории и связи с другими активными компонентами системы (роботами и оператором).

Агент-оператор – человеко-машинный интерфейс, который решает задачу мониторинга состояния агентов-роботов и предоставляет человеку оператору средства удаленного управления роботами.

Активная внешняя среда (АВС) – распознанный человек (группа лиц), на основании наблюдения за которыми действуют агенты-роботы. При обнаружении активного элемента внешней среды на траектории движения роботом выполняется корректировка изначальной траектории.

Статичная внешняя среда (СВС) – недвижимые элементы помещения (ЭСВС), ориентируясь на которые агенты-роботы строят маршрут движения.

Движение каждого агента-робота по маршруту описывается уравнением:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ \phi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_i + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot a_i, \quad (1)$$

где  $x_i, y_i, \phi_i$  – координаты и угол поворота  $i$ -ого агента-робота в пространстве, являются известными в каждый момент времени;

$v_i, a_i$  – скорость и ускорение  $i$ -ого агента-робота, определяются агентами-роботами на основе анализа активной и статичной внешней среды, а также расположения других агентов-роботов.

Основным ограничением (1) такого движения будет являться условие того, что в один момент времени на одной позиции не могут находиться два агента робота:

$$f^t(x_i, y_i) \neq f^t(x_j, y_j). \quad (2)$$

### Заключение

Рассмотренные в статье технические принципы являются базой для построения платформы, повышающей качество взаимодействия в таких сферах, как рекламные акции и промоутиг, экскурсионные программы, кон-

сультирования в различных государственных и частных организациях.

Несомненно, тема внедрения частичных функций автономности в подобных роботов является актуальной и достаточно сложной задачей.

Решение данной задачи требует дальнейших исследований.

#### Литература

1. Управление роем динамических объектов на базе мультиагентного подхода / В. Ерофеева и др. // Компьютерные инструменты в образовании. 2015. №. 6. С. 34-42.

2. Управление группировками киберфизических объектов в среде облачных вычислений / В.С. Заборовский и др. // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. №. 10 (171). С. 45-60.

3. Назарова А.В., Рыжова Т.П. Система управления коллективом мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 4. С. 45-50.

4. Промобот [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://promo-bot.ru/> (дата обращения: 04.04.2018).

5. Робот PadBot сайт. URL: <http://padbot.ru/> (дата обращения: 04.04.2018).

6. Робот BotEyes [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://boteyes.ru> (дата обращения: 04.04.2018).

7. Робот R.BOT [Электронный ресурс]: сайт. URL: <http://www.rbot.ru/> (дата обращения: 04.04.2018).

8. Робот WeBot [Электронный ресурс]: сайт. URL: <https://wicron.com/> (дата обращения: 04.04.2018).

Поступила 11.05.2018; принята к публикации 16.07.2018

#### Информация об авторах

**Соловьев Антон Юрьевич** - канд. техн. наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (309516, Россия, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42), e-mail: [solovyov.anton@gmail.com](mailto:solovyov.anton@gmail.com)

**Цуканов Михаил Александрович** - канд. техн. наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (309516, Россия, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42), e-mail: [tsukanov\\_m\\_a@mail.ru](mailto:tsukanov_m_a@mail.ru)

### PARTIALLY AUTONOMOUS ROBOT-TELEPRESENCE AS AN ELEMENT OF MULTIAGENT INTERACTION

A.Yu. Solov'ev, M.A. Tsukanov

Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov, a branch of National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol, Russia

**Abstract:** the article deals with the task of endowing a robot-telepresence with functions of partial autonomy. The sphere of application of robots-telepresence is considered, the analysis of current decisions in the market of similar robots is done. The classical scheme of control of robots-telepresence is presented and on the basis of the resulted scheme the basic lacks of similar decisions are allocated, namely the big loading on the operator in the course of management of the robot, and also complexity of process of training of the operator. Based on the identified shortcomings, a solution is proposed that can provide robots-telepresence with a partial autonomy. As autonomous functions, recognition of a person, following a person, bending obstacles are considered. These autonomy functions were identified as priority, which will help to avoid the identified problems in the management of robots-telepresence. Also, the market for such solutions was analyzed, during the analysis it was revealed that most of the solutions do not even have a partial autonomy. To implement the solution of endowing robots-telepresence with autonomy functions, the authors suggest using a robotic platform that was developed at the Department of Automated Information Control Systems of the Stary Oskol Institute of Technology. A block diagram of the proposed solution is given. The authors also suggest the structure of a multi-agent system for solving tasks for carrying out activities requiring the participation of several robots-telepresence

**Key words:** robot-telepresence, functions of partial autonomy, multi-agent system

#### References

1. Erofeeva V. et al. "Control of a swarm of dynamic objects on the basis of a multiagent approach", *Computer tools in education (Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii)*, 2015, no. 6, pp. 34-42.

2. Zaborovskiy V.S. et al. "Management of groupings of cyberphysical objects in a cloud computing environment", *News of Southern Federal University. Technical science (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2015, no. 10 (171), pp. 45-60.

3. Nazarova A.V., Ryzhova T.P. "Control system of the collective of mobile robots", *Mechatronics, automation, control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2014, no. 4, pp. 45-50.
4. Promobot, available at: <https://promo-bot.ru/>
5. Robot PadBot, available at: <http://padbot.ru/>
6. Robot BotEyes, available at: <https://boteyes.ru>
7. Robot R.BOT, available at: <http://www.rbot.ru/>
8. Robot WeBot, available at: <https://wicron.com/>

Submitted 11.05.2018; revised 16.07.2018

#### Information about the authors

**Anton Yu. Solov'ev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov, branch of National University of Science and Technology "MISiS" (42 Makarenko distr., Stary Oskol 309516, Belgorod region, Russia), e-mail: [solovyov.anton@gmail.com](mailto:solovyov.anton@gmail.com)

**Mikhail A. Tsukanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Sary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov, branch of National University of Science and Technology "MISiS" (42 Makarenko distr., Stary Oskol 309516, Belgorod region, Russia), e-mail: [tsukanov\\_m\\_a@mail.ru](mailto:tsukanov_m_a@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ В МАТЛАВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩЕНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

А.П. Харченко<sup>1</sup>, Ю.С. Слепокуров<sup>2</sup>, Ю.Н. Каревская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** дистанционное управление транспортным роботом требует передачи управляющего и приема управляемого сигналов в условиях внешних возмущений. Использование автоматической системы с модальным регулятором и наблюдателем в качестве следящего привода полагает реализацию модального регулятора и наблюдателя в задающем устройстве, дистанционно удаленного от транспортного робота. Дистанционная передача управляющих и управляемых информационных сигналов требует принятия мер по помехозащищенности каналов связи. Для математического описания следящей системы с модальным регулятором и наблюдателем применяется векторно-матричное уравнение, которое удобно получить из структурной схемы с доступом к переменным состояния управляемого вектора состояния  $X$ . Представлены векторно-матричные уравнения следящих систем с модальным регулятором, наблюдателем и фильтром Калмана при учете воздействия возмущения. При исследовании влияния возмущения в цепи обратной отрицательной связи используются одно- и многоконтурные структурные схемы следящей системы с одним и тем же двигателем, системой управления и датчиком обратной связи по положению. Фильтрация возмущения в каналах передачи информации в пространстве состояния осуществляется фильтром Калмана. Фильтр Калмана осуществляет процедуру рекурсивного оценивания, когда подлежащий оцениванию сигнал является входным сигналом нестационарной динамической системы. Проведено сравнение полученных коэффициентов модального регулятора структурных схем следящей системы, вида полученных переходных характеристик, передаточных функций наблюдателей и фильтра Калмана и степени восстановления фильтром Калмана информационного сигнала. Представлены выводы по исследованиям систем

**Ключевые слова:** транспортный робот, следящая система, векторно-матричное уравнение, структурная схема, модальный регулятор, наблюдатель, фильтр Калмана, переходная характеристика

### Введение

При дистанционном управлении транспортным роботом и использовании в качестве привода следящей системы (СС) с модальным регулятором (МР) и наблюдателем (НБ) [1, 2] необходимо оценить качество управления в условиях воздействия различного вида внешних воздействий.

При векторно-матричном описании автоматической системы (следящей системы) используется фильтр Калмана (ФК) в совокупности с МР и НБ, предназначенный для восстановления информационного сигнала из сигнала с помехой. Векторно-матричное уравнение автоматической системы в этом случае записывается

$$\begin{aligned} dx/dt &= A \cdot x + B \cdot u_1 + G \cdot u_2; \\ y_v &= C \cdot x + D \cdot u_1 + H \cdot u_2 + v, \end{aligned}$$

где  $u_1$  – скалярный вход по управлению  $X$ ;  $u_2$ ,  $v$  – скалярный вход по возмущению и измерение сигнала с возмущением;  $A, B, C, D, G$  и  $H$  – матрицы.

В СС с векторно-матричным описанием актуально исследование влияния возмущения в цепи датчика обратной связи на качество регулирования ее переходной характеристики, так как информация от датчика обратной связи передается на НБ и ФК.

### Постановка задачи

Как показано в [1-3], векторно-матричное уравнение автоматической системы можно представить, используя структурную схему с доступом к переменным состояния. Для исследований используются структурные схемы одноконтурной СС1, двухконтурной СС2 и трехконтурной СС3, при этом переходные характеристики СС аperiodические 2-го порядка с допустимым перерегулированием (0.04 - 0.05)% и временем регулирования  $tr=0.2$  с. Параметры элементов передаточных функций согласно [2, 3].

Матрицы  $A$  и  $B$  одноконтурной СС1 с МР согласно [3] описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/(T_{мТя}) & K_{д}/(T_{мТя}) & 0 \\ -K_{дн}K_{ny} \frac{K_y}{T_y} - K_1 \cdot R_1 & -K_2 \cdot R_1 & -K_3 \cdot R_1 & -\frac{1}{T_y} - K_4 \cdot R_1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R1 \end{pmatrix}$$

В матрицах одноконтурной СС1 введено следующее обозначение:

$$R1 = K_{ny} \cdot K_y / T_y. \quad (1)$$

Матрицы А и В СС2 системы с МР описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/(T_m T_\alpha) & -1/T_\alpha & K\theta/(T_m T_\alpha) \\ -K\theta n - K1 R2 & -K2 \cdot R2 - K_m K_{ny} 2 K_y / T_y & -K3 \cdot R2 & -\frac{1}{T_y} - K4 \cdot R2 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R1 \end{pmatrix}$$

В матрицах СС2 с МР введено обозначение

$$R2 = K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot K_y / T_y. \quad (2)$$

Матрицы А и В СС3 с МР и с учетом структурной схемы двигателя [3] описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_m J_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_\alpha & 1/L_\alpha \\ -K\theta n R3 - K1 \cdot R3 - \nu \cdot R3 \cdot K\theta n & -K_m R4 - K2 \cdot R3 & -K_{дт} R5 - K3 \cdot R3 & -\frac{1}{T_y} - K4 \cdot R3 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R3 \end{pmatrix}$$

В матрицах СС3 с МР введены обозначения

$$R3 = K_{ny1} \cdot 220 \cdot K_{ny2} \cdot K_{ny3} \cdot K_y / T_y, \quad (3)$$

$$R4 = K_{ny2} \cdot K_{ny3} \cdot K_y / T_y. \quad (4)$$

Передаточные функции двигателя, системы управления и датчика обратной связи по положению одни и те же. В таблице представлены коэффициенты МР СС.

Коэффициенты МР СС

СС\К	K1	K2	K3	K4	K1/K4
СС1	77.9988	0.0639	0.0016	0.0339	2300
СС2	11.4168	0.01	0.0002	0.0034	3358
СС3	1.7787	0.0035	0.0022	0.0011	1786

С увеличением числа обратных связей значения K1, K2, K4 уменьшаются, K3 изменяется по закону параболы, но нет закономерности в отношении K1 / K4, что определяет сложность аппаратной реализации.

Коэффициенты МР СС (K1, K2, K3 и K4) и параметры НБ est, восстанавливающего составляющие управляемого вектора состояния (X1, X2, X3 и X4), определены по методу, описанному в [1].

На рис. 1 представлена структурная схема СС1 с МР и НБ, возмущение подается в ОС.

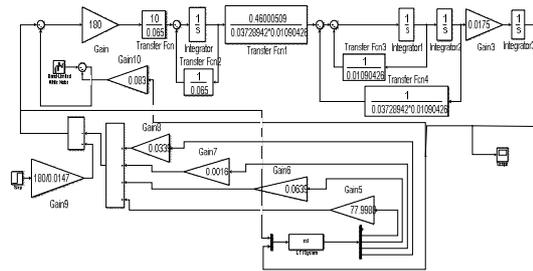


Рис. 1. Структурная схема СС1 с МР и НБ в среде MATLAB

На рис. 2 представлена структурная схема двухконтурной СС2 с МР и НБ, возмущение подается в ОС.

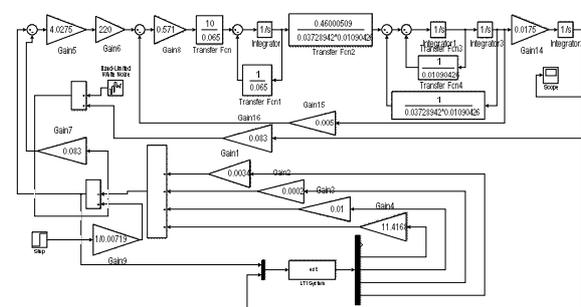


Рис. 2. Структурная схема СС2 с МР и НБ в среде MATLAB

На рис. 3 представлена структурная схема СС3 с МР и НБ, возмущение подается в ОС.

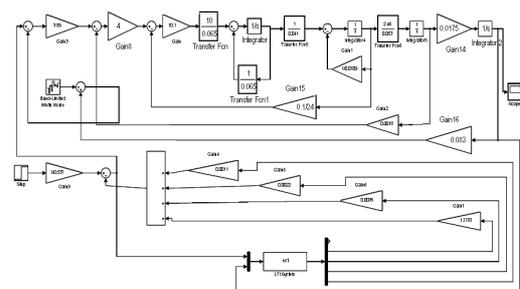


Рис. 3. Структурная схема трехконтурной СС с МР и НБ в среде MATLAB

Передаточные функции НБ1–НБ3 для СС1–СС3 определяются в среде моделирования MATLAB.

Постоянные времени передаточных функций  $W1(s)$ – $W3(s)$  одного порядка и на порядок меньше постоянных времени передаточной функции структурных схем СС1–СС3, что требует дополнительных ресурсов при их аппаратной реализации.

Переходные характеристики при воздействии возмущения в СС1–СС3 с МР и НБ по форме аналогичны (рис. 4).

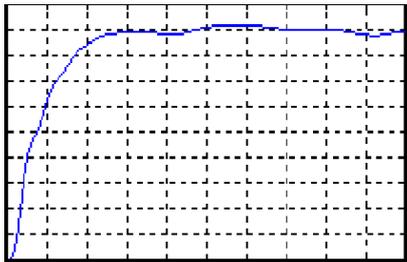


Рис. 4. Переходная характеристика СС с МР и НБ при воздействии возмущения в среде MATLAB

Как видно из полученной переходной характеристики – форма ее негладкая и появляются колебания в установившемся режиме.

Матрицы А и В СС1 с МР, НБ, ФК и учетом входа ( $u_2$ ) описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/(T_M T_A) & K_D/(T_M T_A) & 0 \\ -K_{дл} K_{ny} \frac{K_y}{T_y} - (K_1 - \nu) \cdot R_1 & -K_2 \cdot R_1 & -K_3 \cdot R_1 & -\frac{1}{T_y} K_4 \cdot R_1 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R - \nu \cdot K_{дн} \cdot R_1 \end{pmatrix}$$

В матрицах СС1 введено обозначение, согласно формуле (1).

Матрицы А и В СС2 с МР, НБ, ФК и учетом входа ( $u_2$ ) описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/(T_M T_A) & -1/T_A & K_D/(T_M T_A) \\ (-K_{дл} - K_1 - \nu \cdot K_{дн}) R_2 & -K_2 \cdot R_2 - K_{м} K_{ny} & 2 K_y / T_y & -K_3 \cdot R_2 - \frac{1}{T_y} K_4 \cdot R_2 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R_2 - \nu \cdot K_{дн} \cdot R_2 \end{pmatrix}$$

В матрицах СС2 введено обозначение, согласно формуле (2).

Матрицы А и В СС3 с МР, НБ, ФК с учетом входа ( $u_2$ ) и структурной схемы двигателя [3] описываются

$$A = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{nl} J_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_A & 1/L_A \\ -K_{дл} R_3 - K_1 \cdot R_3 - \nu \cdot R_3 \cdot K_{дн} & -K_{м2} R_4 - K_2 \cdot R_3 & -K_{дт} R_5 - K_3 \cdot R_3 & -\frac{1}{T_y} - K_4 \cdot R_3 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ K_f \cdot R_3 - \nu \cdot K_{дн} \cdot R_3 \end{pmatrix}$$

В матрицах СС3 введены обозначения, согласно формулам (3), (4).

Возмущения в канале передачи информации обратной связи СС1–СС3 задаются генератором шума **Band-Limited**.

На рис. 5 представлена структурная схема для исследования СС1 с МР, НБ и ФК в среде моделирования MATLAB.

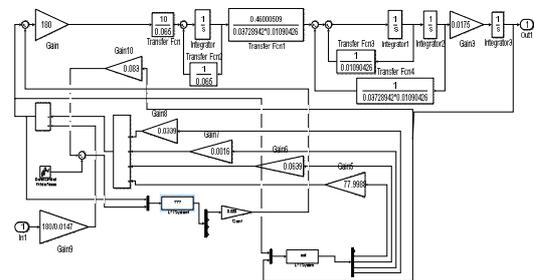


Рис. 5. Структурная схема СС1 с МР, НБ и фильтром Калмана в среде MATLAB

На рис. 6 представлена структурная схема для исследования СС2 с МР, НБ и ФК в среде MATLAB.

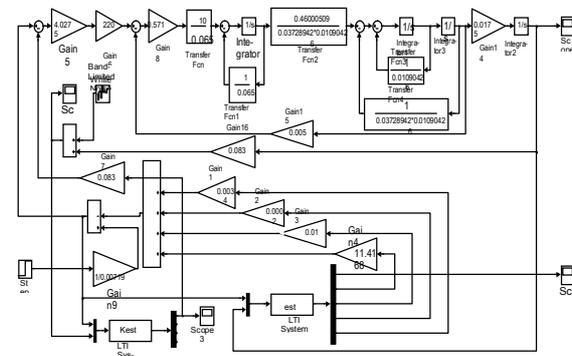


Рис. 6. Структурная схема СС2 с МР, НБ и фильтром Калмана в среде MATLAB

На рис. 7 представлена структурная схема для исследования ССЗ с МР, НБ и фильтром Калмана в среде MATLAB.

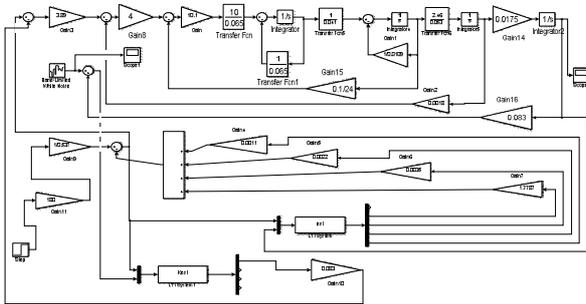


Рис. 7. Структурная схема ССЗ с МР, НБ и фильтром Калмана в среде MATLAB

Передаточные функции фильтра Калмана для СС1 - СС3 определяются в среде MATLAB  $1.251e05$

$$W1(s) = \frac{1.541e06}{s^4 + 107.1s^3 + 3870s^2 + 3.784e04 s + 1.251e05}$$

$$W2(s) = \frac{4.79e05}{s^4 + 107.1s^3 + 3870s^2 + 3.833e04 s + 1.279e05}$$

$$W3(s) = \frac{1.267e04 s + 3.976e04}{s^4 + 107.1s^3 + 1569s^2 + 1.267e04 s + 3.976e04}$$

Постоянные времени передаточных функций  $W1(s)$ – $W3(s)$  фильтра Калмана для СС1-СС3 одного порядка и меньше постоянных времени передаточной функции структурных схем СС1-СС3, что требует дополнительных вычислительных ресурсов при их аппаратной реализации.

Параметры фильтра Калмана **Kest** СС1-СС3 получены в рабочей области среды MATLAB согласно [1].

При наложении возмущения в виде шума в структурных схемах СС1–СС3 переходная характеристика в канале обратной связи СС без фильтра Калмана приобретает вид, изображенный на рис. 8.

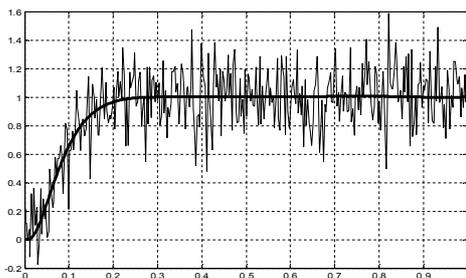


Рис. 8. Переходная характеристика в канале обратной связи структурных схем СС1-СС3 при наличии возмущения

Фрагменты переходной характеристики, сформированной СС1–СС3 с шумом в канале обратной связи, а также сформированной в СС1–СС3 с фильтром Калмана, представлены на рис. 9.

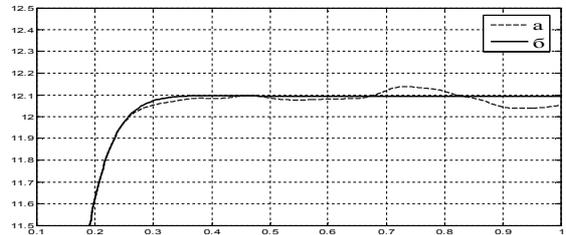


Рис. 9. Фрагмент переходной характеристики следящей системы при наличии шума в канале обратной связи (а), сформированной фильтром Калмана (б)

### Выводы

1. Переходная характеристика СС1-СС3 с МР и НБ при воздействии возмущения в ОС одинаковая по форме искажается и имеет отклонения в установившемся режиме.
2. Диапазон изменения коэффициентов МР (К1-К4) для СС1–СС3 составляет (1780-3358), что определяет сложность при аппаратной реализации.
3. При аппаратной реализации НБ1-НБ3 возникает необходимость дополнительного вычислительного ресурса, так как их постоянные времени на порядок меньше постоянных времени передаточных функций СС1-СС3.
4. При аппаратной реализации ФК1-ФК3 возникает необходимость дополнительного вычислительного ресурса, так как их постоянные времени меньше постоянных времени передаточных функций СС1-СС3.
5. Применение фильтра Калмана в СС с МР и НБ, как способ избавления от помех, не изменяет параметры качества регулирования.

### Литература

1. Теория автоматического управления: Синтез САУ в среде MATLAB: учеб. пособие [Электронный ресурс] / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, А.К. Муконин, П.А. Аверьянов. Воронеж: ВГТУ, 2017. 80 с.
2. Харченко А.П., Слепокуров Ю.С., Аверьянов П.А. Синтез САУ в среде MATLAB // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. Вып. 4. С. 7-12.
3. Исследование влияния нагрузки в следящей системе в MATLAB и Scilab / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, П.А. Аверьянов, И.Ю. Свирский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. Вып. 2. С. 39-43.

Поступила 03.04.2018; принята к публикации 16.07.2018

### Информация об авторах

**Харченко Александр Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: N210713@yandex.ru

**Слепокуров Юрий Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматике и вычислительной техники, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29Б), e-mail: ussrs@list.ru

**Каревская Юлия Николаевна** – старший преподаватель кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: eayts@yandex.ru

## STUDY OF TRACKING SYSTEMS IN MATLAB WHEN EXPOSED TO DISTURBANCES IN THE CONTROL CIRCUIT

A.P. Kharchenko<sup>1</sup>, Yu.S. Slepokurov<sup>2</sup>, Yu.N. Karevskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** remote control of the transport robot requires the transfer of the control and reception of the controlled signals in the conditions of external disturbances. The use of an automatic system with a modal regulator and an observer as a servo drive assumes the implementation of a modal controller and an observer in a master device remote from the transport robot. Remote transmission of control and controllable information signals requires taking measures for interference immunity of communication channels. For the mathematical description of a servo system with a modal controller and an observer, a vector-matrix equation is used which can be conveniently obtained from a structural scheme with access to the state variable of the controlled state vector  $X$ . Vector-matrix equations of tracking systems with the modal regulator, observer and Kalman filter taking into account perturbations are presented. When investigating the influence of disturbances in the negative feedback circuit, one- and multi-loop structural circuits of the servo system with the same motor, control system and position feedback sensor are used. Filtering of the disturbance in the channels of information transfer in the state space is carried out by the Kalman filter. The Kalman filter performs a recursive estimation procedure when the signal to be evaluated is the input signal of a non-stationary dynamic system. The obtained coefficients of the modal regulator of the structure circuits of the servo system, the type of the obtained transition characteristics, the transfer functions of the Kalman filter and the Kalman filter, and the degree of restoration of the information signal by the Kalman filter are compared. Conclusions on the research of systems are given

**Key words:** transport robot, servo system, vector-matrix equation, block diagram, modal controller, observer, the Kalman filter, transient response

### References

1. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Lukonin A.K., Aver'yanov P.A. "Automatic control theory: Synthesis of ACS in the Matlab environment: manual" ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Sintez SAU v srede Matlab: ucheb. posobie"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2017, 80 p.
2. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu. S., Aver'yanov P.A. "Synthesis of ACS in the Matlab environment", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 7-12.
3. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Aver'yanov P.A., Svirskiy I.Yu. "Study of the influence of load in the tracking system in Matlab and Scilab", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 39-43.

Submitted 03.04.2018; revised 16.07.2018

### Information about the authors

**Aleksandr P. Kharchenko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: N210713@yandex.ru

**Yuriy S. Slepokurov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, International Institute of Computer Technology (29B Solnechnaya st., Voronezh 394026, Russia), e-mail: ussrs@list.ru

**Yuliya N. Karevskaya**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: eayts@yandex.ru

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ «ВОДИТЕЛЬ - ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО - СРЕДА»

В.Л. Бурковский<sup>1</sup>, Д.А. Андриков<sup>2</sup>, Ю.А. Халин<sup>2</sup>, Е.А. Титенко<sup>2</sup>, А.Г. Курочкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** рассматривается решение задачи управления транспортным средством в условиях торможения. Классический подход основан на понимании водителя как субъекта управления, а транспортного средства как объекта управления. Это известный механико-детерминистский подход с однозначным предсказанием движения транспортного средства и целевой реакции водителя. Система управления является инструментом, который дает детерминированные оценки и формирует прогноз. Интеллектуализация информационно-вычислительных процессов в транспортном средстве связывается с анализом состояния метасистемы «Водитель – Транспортное средство – Среда». Показано, что в такой метасистеме взаимодействие элементов можно формализовать с помощью теории конфликта. Это означает, что объектом рассмотрения являются открытые системы. В отличие от замкнутых систем, стремящихся к сохранению энергии покоя, открытые системы с несколькими активными объектами (игроками) образуют различные коалиции. Коалиция стремится подчинить себе «проигравшие» элементы метасистемы и обеспечить далее экстремум коалиционной функции. Рассматривается коалиция «Водитель – Транспортное средство». Для обеспечения такого подхода в качестве математической основы управления движением выбрана оценка устойчивости колебательных процессов. Для работы выбрана форма алгебраического критерия в виде критерия Гурвица. Этот критерий может быть применен для определения устойчивости как разомкнутых, так и замкнутых систем. Матрица и критерий Гурвица используют идею расслоения коэффициентов для понижения степени решаемых уравнений. Расслоение осуществляется по четным и нечетным позициям с переменной длиной ряда коэффициентов. Такая двумерная комбинация коэффициентов позволяет сохранить корректность результата и упростить процесс решения. Следовательно, вычисления критерия Гурвица являются аппаратно-ориентированными и обеспечивают уменьшение времени. Получены условия устойчивости по Гурвицу, необходимые для управления метасистемой «Водитель - Транспортное средство - Среда»

**Ключевые слова:** система управления движением, транспортное средство, устойчивость, критерий Гурвица, характеристическое уравнение

### Введение

Задача управления транспортным средством (ТС) в условиях торможения требует создания специализированных интеллектуальных систем управления (ИСУ), решающих общесистемные задачи обнаружения/распознавания состояний и ситуаций, прогнозирования поведения ТС в условиях неполной, противоречивой информации [1]. Актуальной является разработка таких моделей и методов управления движением в условиях торможения, которые позволяли бы наиболее полно учитывать, во-первых, наличие взаимосвязей между большим числом факторов, определяющих свойства и поведение рассматриваемой системы, и, во-вторых, неопределенность поведения системы в целом и составляющих ее частей. Одна из основных трудностей в анализе и принятии решения по управлению ТС состоит в необходимости обработки информации в условиях неопределенности или

при неполных знаниях о возможных последствиях предпринимаемых действий за счет трактовки ТС и собственно водителя как активных субъектов процесса управления [2]. Тогда интеллектуализация информационно-вычислительных процессов в ТС связывается с анализом состояния «Водитель–Транспортное средство–Среда» на борту машины с минимальным участием водителя в контурах управления. Другими словами, принимается трактовка ТС как часть метасистемы, включающей дорожное покрытие как элемент внешней среды.

### Постановка задачи

Взаимодействия элементов в метасистеме можно формализовать с помощью теории конфликта [3]. С позиции общей теории систем [4] конфликт – это механизм взаимодействия активных объектов с противоположными целями. Объекты «ТС» ( $S_1$ ) и «Дорожное покрытие» ( $S_2$ ) погружены в метасистему и взаимодействуют между собой через объект «Водитель» ( $C$ ). Объекты и внутренняя среда вместе

с отношениями (R) между ними образуют метасистему  $S_{uper} = \{S_1, S_2, C, R\}$ , т.е. систему управления ТС в условиях торможения с несколькими ЛПР (водитель, ТС).

В отличие от замкнутых систем, стремящихся к сохранению энергии покоя, открытые системы с несколькими активными объектами (игроками) образуют различные коалиции. Коалиция стремится подчинить себе «проигравшие» элементы метасистемы и обеспечить далее экстремум коалиционной функции. В зависимости от предыстории и внешних условий возможны коалиции:

- а) Водитель – ТС;
- б) ТС – Дорожное покрытие.

Такой подход описания конфликтного взаимодействия сталкивается с рядом ограничений:

- а) неполная модель игрока «Дорожное покрытие»;
- б) неизвестные априорные вероятности игроков метасистемы (распределение вероятностей);
- в) разнородные данные, которые описывают конфликтное взаимодействие (детерминированные, случайные, чёткие, нечёткие и т.п.).

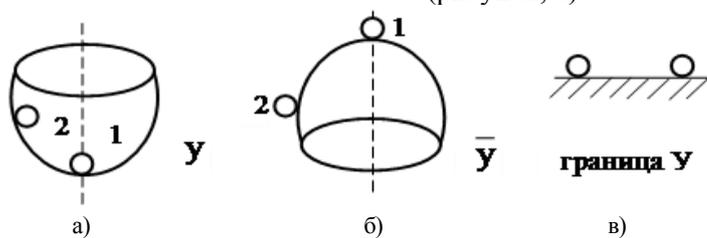
### Подход к анализу оценки устойчивости транспортного средства

Одним из путей преодоления данных ограничений является анализ и выбор модели описания движения в условиях торможения и метода управления этим процессом для бортовой ИСУ движением.

На систему «Водитель–Транспортное средство–Среда» действуют различные внутренние и внешние возмущения, которые могут нарушить ее нормальную работу. Система управления транспортным средством должна устойчиво работать при возмущениях среды (смена погодных условий, переход на другое покрытие с меньшим коэффициентом сцепления и т.п.). С другой стороны, она также должна учитывать действия водителя, влияющие на положение и динамику движения ТС.

В общем случае под устойчивостью понимают способность системы возвращаться с определенной точностью к состоянию равновесия после устранения причин, выведших систему из этого состояния равновесия.

Для пояснения смысла понятия устойчивости положения равновесия системы обычно пользуются следующим примером. Пусть имеется некоторая чаша, поставленная дном вниз (рисунок, а)



Классические положения устойчивости и неустойчивости положения равновесия

На дне чаши в положении равновесия 1 находится тяжелый шарик, который приложенной внешней силой может быть отклонен в положение 2. В определенный момент времени, принимаемый за нулевой, внешняя сила убирается. Шарик, предоставленный сам себе, из положения 2 устремится вниз и по инерции проскочит положение 1. Затем, достигнув наивысшего положения, уже справа от точки 1 шарик снова будет двигаться вниз. Совершив несколько колебательных движений, шарик из-за наличия сил сопротивления остановится с некоторой точностью в положении равновесия 1, т.е. согласно определению имеет место устойчивость положения равновесия, для

кратности обозначаемая литерой У. Для нашей задачи это представляет собой движение по однородному покрытию, но с всевозможными изменениями траектории движения

Рассмотрим случай (рисунок, б), когда чаша поставлена дном вверх. Шарик снова находится в положении равновесия 1 и если к нему не прикладывать никаких сил, то в этом положении он будет находиться сколь угодно долго. Если же некоторой внешней силой переместить шарик в положение 2, а затем убрать эту силу, то шарик удалится от положения 1 на бесконечно большое расстояние и никогда в него не вернется. Такое положение равновесия называется неустойчивым и обо-

значается  $\bar{y}$ . Для системы «Водитель - Транспортное средство - Среда» это означает движение по аварийным участкам с возможной сменой дорожного покрытия. Небольшие отклонения параметров управления транспортным средством могут привести к катастрофическим последствиям (неуправляемости транспортным средством). Этот случай и подлежит дальнейшему исследованию.

Случай (рисунок, в) изображает нейтральное положение равновесия или границы устойчивости. Если шарик, находящийся на горизонтальной поверхности в положении 1, с помощью внешней силы переместить в положение 2, а затем убрать эту силу, то шарик останется в положении 2 до тех пор, пока к нему не будет приложена новая внешняя сила. Случай нейтрального положения равновесия можно обнаружить и на рисунке а, если там не существует сил сопротивления. В этом случае шарик будет совершать незатухающие колебания вокруг положения равновесия 1. В нашей задаче означает движение транспортного сред-

$$a_0 \frac{d^n z(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} z(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n z(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t) \quad (1)$$

Из (1) решение этого неоднородного уравнения  $z(t)$  состоит из общего решения  $z_{cb}(t)$  однородного дифференциального уравнения

$$a_0 \frac{d^n z(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} z(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n z(t) = 0 \quad (2)$$

и частного вынужденного решения  $z_{вын}(t)$  неоднородного дифференциального уравнения (1)

$$z(t) = z_{cb}(t) + z_{вын}(t) \quad (3)$$

Из определения устойчивости, данного выше, следует, что устойчивость системы «Водитель - Транспортное средство - Среда» устанавливаются в ней, после того как устраняется внешняя сила  $x(t)$ , выведшая систему из состояния равновесия. Иными словами, устойчивость системы определяет переходный процесс  $z_{cb}(t)$ , т.е. решение однородного дифференциального уравнения (2). Таким образом, признаками устойчивости системы являются:

если  $\lim_{t \rightarrow \infty} z_{cb}(t) = 0$ , то система устойчива;

если  $\lim_{t \rightarrow \infty} z_{cb}(t) \rightarrow \infty$ , то система неустойчива;

ства по прямолинейному участку дороги с однородным дорожным покрытием.

### Математическая модель оценки устойчивости системы «Водитель – Транспортное средство - Среда»

Далее строится математическая модель оценки устойчивости системы «Водитель - Транспортное средство - Среда».

Пусть наша система понимается как система автоматического регулирования с входным сигналом (внешней силой)  $x$  и выходным сигналом  $z$ , имеющая передаточную функцию [8]

$$W(p) = \frac{\tilde{z}}{\tilde{x}} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}$$

Она может быть описана линейным неоднородным дифференциальным уравнением  $n$ -го порядка с постоянными коэффициентами

если  $\lim_{t \rightarrow \infty} z_{cb}(t) = \begin{cases} A = \text{const} \\ A \cos(\omega \cdot t) \end{cases}$ , то система

нейтральна, т.е. находится на грани устойчивости.

Дифференциальному уравнению (2) соответствует характеристическое уравнение [6]

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0 \quad (4)$$

Корни характеристического уравнения (4) могут быть либо вещественными (в том числе нулевыми), либо комплексно-сопряженными (в том числе чисто мнимыми).

Решение дифференциального уравнения (2), как известно, имеет следующий вид

$$z_{cb}(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{p_i t} \quad (5)$$

где  $A_i$  – постоянные интегрирования, определяемые параметрами системы и начальными условиями;  $p_i$  – корни характеристического уравнения (4).

Определив все корни характеристического уравнения системы, можно по знакам корней установить устойчивость системы. Однако аналитически находить корни характеристиче-

ского уравнения уже четвертой степени удаётся далеко не всегда (лишь для биквадратных уравнений). Поэтому естественным становится желание определить устойчивость системы, не находя корней характеристического уравнения, а используя другие свойства математического описания систем – коэффициенты характеристического уравнения, частотные и другие характеристики систем.

Признаки, позволяющие иметь суждения об устойчивости системы «Водитель - Транспортное средство - Среда» без решения уравнения (3), получили в теории автоматического регулирования название критериев устойчивости. К настоящему времени разработано много критериев устойчивости, как алгебраических, так и частотных. Применительно к нашей задаче далее рассматривается алгебраический критерий Гурвица.

### Алгебраический критерий устойчивости Гурвица

Наиболее распространенная в технической практике форма алгебраического критерия устойчивости известна под названием критерия Гурвица [9]. Этот критерий может быть применен для определения устойчивости как разомкнутых, так и замкнутых САР в зависимости от того, характеристическое уравнение какой из вышеназванных САР принято для исследования.

Ниже рассматриваемый критерий приводится без доказательства.

Для характеристического уравнения (3) составим квадратную матрицу (таблицу) коэффициентов, содержащую  $n$  строк и  $n$  столбцов (матрицу Гурвица)

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix} \quad (6)$$

Эта матрица составляется следующим образом.

По диагонали от левого верхнего до правого нижнего углов выписываются все коэффициенты по порядку от  $a_1$  до  $a_n$ . Каждая

строка дополняется коэффициентами с возрастающими слева направо индексами так, чтобы чередовались строки с нечётными и чётными индексами. В случае отсутствия данного коэффициента, а также, если индекс его меньше нуля или больше  $n$ , на месте его пишется нуль. Можно заметить, что индексы в столбцах нарастают снизу вверх, поэтому нетрудно понять, что в правом крайнем столбце единственным элементом, отличным от 0, будет нижний элемент  $a_n$ .

Главные диагональные миноры или определители матрицы Гурвица (6) имеют вид

$$\Delta_1 = a_1,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1}.$$

Формулировка критерия устойчивости Гурвица обычно дается в следующем виде:

Для устойчивости системы «Водитель - Транспортное средство – Среда» необходимо и достаточно, чтобы при  $a_0 > 0$  все главные диагональные миноры матрицы Гурвица были бы больше нуля  $\Delta_i > 0 (i=1, 2, \dots, n)$ .

Условие нахождения системы на границе устойчивости можно получить, приравняв нулю последний минор  $\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1} = 0$  при положительности всех остальных главных диагональных миноров. Это условие распадается на два условия:  $a_n = 0$  и  $\Delta_{n-1} = 0$ . Первое условие  $a_n = 0$  свидетельствует о том, что характеристическое уравнение имеет один нулевой корень, это соответствует границе устойчивости апериодического типа, а второе  $\Delta_{n-1} = 0$  говорит о наличии пары чисто мнимых корней и существовании колебательной границы устойчивости.

Если интересует граничное значение какого-то параметра (например, коэффициента усиления  $k_{гп}$ ), при котором система становится нейтральной, то его можно найти из выражения

$$\Delta_n = a_n \cdot \Delta_{n-1} = 0 \quad (7)$$

Для исследования устойчивости системы «Водитель – Транспортное средство – Среда» необходимо проанализировать уравнение четвёртого порядка вида (4). Тогда матрица Гурвица выглядит следующим образом

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix}.$$

Условия устойчивости по Гурвицу выглядят

$$a_0 > 0;$$

$$\Delta_1 = |a_1| = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_1^2 a_4 - a_0 a_3^2 = a_3 \cdot \Delta_2 - a_1^2 a_4 > 0;$$

$$\Delta_4 = a_4 \cdot \Delta_3 > 0.$$

При всех положительных минорах последнее неравенство выполняется лишь при  $a_4 > 0$  и тогда в предпоследнем неравенстве второе слагаемое  $a_1^2 a_4$  положительно. При  $\Delta_2 > 0$  минор  $\Delta_3$  будет положительным только при  $a_3 > 0$ . Отсюда следует, что  $\Delta_2$  будет положительным при  $a_0 > 0$ ,  $a_1 > 0$  и  $a_3 > 0$ , только при  $a_2 > 0$ .

Итак, необходимые условия устойчивости  $a_0 > 0$ ,  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$ ,  $a_3 > 0$  и  $a_4 > 0$  установлены. Кроме того, необходимо добавить достаточное условие

$$a_3 \cdot \Delta_2 - a_1^2 a_4 > 0,$$

которое включает в себя требование

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0.$$

Поступила 22.03.2018; принята к публикации 16.07.2018

#### Информация об авторах

**Бурковский Виктор Леонидович** - д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

**Андриков Дмитрий Анатольевич** - аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: andrikovdm@gmail.com

**Халин Юрий Алексеевич** - канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: yur-khalin@yandex.ru

#### Заключение

Таким образом, в статье разработана математическая модель для автоматизированной оценки устойчивости системы «Водитель - Транспортное средство – Среда» и управления навигационными системами транспортного средства [10].

Данная модель позволяет получить количественную оценку устойчивости, используя классический алгебраический критерий Гурвица. Вычислительная особенность предлагаемого метода заключается в замене трудоемкой по времени процедуры поиска собственных чисел матрицы на вычисление диагональных миноров матрицы. При этом корни характеристического уравнения можно не находить, что сокращает вычислительные процедуры.

#### Литература

1. Зак Ю.А. Принятие многокритериальных решений. М.: Экономика, 2011. 235 с.
2. Халин Ю.А., Лисицин Л.А., Лисицин А.Л. Системы поддержки принятия управленческих решений в условиях неполной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2. С. 95.
3. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.
4. Дружинин В.В. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
5. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2002. 392 с.
6. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
7. Литвак Б.Г. Управленческое решение. М.: ЭКМОС, 2005. 248 с.
8. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 2010. С.463- 560.
9. Острейковский В.А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф. М.: Высш. шк., 2005. 236 с.
10. Управляемая инерциальная навигационная мультисистема / В.П. Напольский и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 4. С. 8-14.

**Титенко Евгений Анатольевич** - канд. техн. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: johntit@mail.ru

**Курочкин Александр Геннадиевич** - аспирант, Юго-Западный государственный университет (305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: ak.kursk@gmail.com

## ESTIMATION OF THE STABILITY OF THE SYSTEM "DRIVER - VEHICLE - ENVIRONMENT"

V.L. Burkovskiy<sup>1</sup>, D.A. Andrikov<sup>2</sup>, Yu.A. Khalin<sup>2</sup>, E.A. Titenko<sup>2</sup>, A.G. Kurochkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>South West State University, Kursk, Russia

**Abstract:** the solution of the problem of driving a vehicle under the conditions of braking is considered. The classical approach is based on the understanding of a driver as a subject of management, and a vehicle as an object of control. This is a well-known mechanistic-deterministic approach with an unambiguous prediction of the vehicle's motion and the target reaction of the driver. The management system is a tool that gives deterministic estimates and forms a forecast. Intellectualization of information-computational processes in the vehicle is associated with an analysis of the state of the metasystem "Driver-Vehicle-Environment". It is shown that in this metasystem the interaction of elements can be formalized using the theory of conflict. This means that the objects of consideration are open systems. Unlike closed systems that tend to conserve rest energy, open systems with several active objects (players) form different coalitions. The coalition seeks to subordinate the "losers" of the metasystem and to ensure further extremum of the coalition function. The coalition "Driver - Vehicle" is being considered. To provide such an approach, the estimation of the stability of oscillatory processes is chosen as the mathematical basis of motion control. The form of the algebraic criterion in the form of the Hurwitz criterion is chosen. This criterion can be applied to determine the stability of both open and closed systems. The matrix and the Hurwitz criterion use the idea of stratifying the coefficients to reduce the degree of the solved equations. Stratification is performed on even and odd positions with a variable length of a series of coefficients. This two-dimensional combination of coefficients allows to maintain the correctness of the result and simplify the decision process. Consequently, the calculations of the Hurwitz criterion are hardware-oriented and provide a reduction in time. The Hurwitz stability conditions necessary for controlling the metasystem "Driver-Vehicle-Environment" are shown

**Key words:** traffic control system, vehicle, stability, Hurwitz criterion, characteristic equation

### References

1. Zack Yu.A. "The multi-criteria decision tasking" (Prinyatie mnogokriterial'nykh resheniy), Moscow, Ekonomika, 2011, 235 p.
2. Khalin Yu.A., Lisitsin L.A., Lisitsyn A.L. "Support systems for making managerial decisions in conditions of incomplete information", *News of Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2012, no. 4-2, p. 95.
3. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. "Introduction to the theory of conflict" ("Vvedenie v teoriyu konflikta"), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 288 p.
4. Druzhinin V.V. "System engineering" ("Sistemotekhnika), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 200 p.
5. Larichev O.I. "Theory and methods of decision-making" ("Teoriya i metody prinyatiya reshenii"), Moscow, Logos, 2002, 392 p.
6. Sobol' I.M., Statnikov R.B. "Selecting optimal parameters in tasks with many criteria" ("Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami"), Moscow, Drofa, 2006, 175 p.
7. Litvak B.G. "Controlling decision" ("Upravlencheskoe reshenie"), Moscow, EKMO, 2005, 248 p.
8. Gantmakher F.R. "Theory of matrices" ("Teoriya matrits"), Moscow, Nauka, 2010, pp. 463-560.
9. Ostreykovskiy V.A. "Analysis of stability and controllability of dynamic systems by methods of catastrophe theory" ("Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinamicheskikh sistem metodami teorii katastrof"), Moscow, Vysshaya shkola, 2005, 236 p.
10. Napolskiy V.P. et al. "Controlled inertial navigation multi system", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016. vol. 12, no.4, pp. 8-14.

Submitted 22.03.2018; revised 16.07.2018

### Information about the authors

**Victor L. Burkovskiy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Honored Scientist of Russia, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

**Dmitriy A. Andrikov**, Graduate student, South West State University (94 50-years of October st., Kursk 305040, Russia), e-mail: andrikovdm@gmail.com

**Yuriy A. Khalin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South West State University (94 50-years of October st., Kursk 305040, Russia), e-mail: yur-khalin@yandex.ru

**Evgeniy A. Titenko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South West State University (94 50-years of October st., Kursk 305040, Russia), e-mail: johntit@mail.ru

**Aleksandr G. Kurochkin**, Graduate student, South West State University (305040 Kursk, street 50 years of October home 94), e-mail: ak.kursk@gmail.com

**РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ  
СЕРВЕРНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ НА ЯЗЫКЕ JAVA****В.Ф. Барабанов<sup>1</sup>, Н.И. Гребенникова<sup>1</sup>, Д.С. Галамага<sup>1</sup>, С.Л. Кенин<sup>2</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>Atos, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** дано общее описание технологии разработки крупных проектов, показано значение прототипирования в целях минимизации потерь при использовании библиотек. Сокращение времени разработки прототипа и удешевление процесса разработки происходит с сохранением возможности доработки и замены любой составляющей без вмешательства в остальные части продукта без ограничения имеющегося функционала. Разработанная библиотека предназначена для написания серверного приложения с любыми требованиями в максимально короткие сроки. Рассмотрен состав библиотеки, представляющей собой набор сервисов и утилит, позволяющих организовать распределенную нагрузку, работу с файлами и базами данных, организовать взаимодействие различных частей приложения, мониторинг и логирование работы приложения, сериализацию и десериализацию объектов. Приведен пример работы с данной библиотекой, с этой целью создано серверное приложение, приведен алгоритм его работы. Структура разработанного серверного приложения позволяет использовать функции логирования и серверных метрик на всех этапах всеми функциональными частями. Приведены условия работы программы, порядок установки и настройки программного продукта, предложен конфигурационный файл, содержащий необходимые настройки. Рассмотренные последовательность и порядок настройки позволяют наиболее полно воспользоваться предлагаемыми возможностями библиотеки классов

**Ключевые слова:** разработка библиотеки классов, серверное приложение, мониторинг, логирование

**Введение**

Развитие технологий в современном мире привело к значительному росту количества сервер-ориентированных систем и сервисов. Они имеют множество разновидностей: облачные сервисы, web-серверы, серверы приложений. Каждый месяц появляются и закрываются десятки крупных проектов, многие из которых даже не успевают компенсировать затраты на разработку.

Для минимизации потерь от таких проектов крупные компании постепенно переходят к концепции прототипирования: на начальных этапах одновременно разрабатывается несколько схожих приложений разными командами. Затем, в определенный момент, проводится оценка каждого разработанного приложения и сравнение его с остальными. В итоге, из нескольких схожих по функционалу прототипов выбирается один лучший по ключевым показателям и далее ведется разработка исключительно этого проекта [1,2].

Разрабатываемая библиотека предназначена для программистов, готовящих свой новый продукт. Она призвана сократить время разработки прототипа и удешевить процесс, сохра-

няя возможность доработки и замены любой составляющей без вмешательства в остальные части продукта и не ограничивая конечных разработчиков имеющимся функционалом.

**Основные требования, предъявляемые  
к серверным приложениям**

Существуют современные решения для реализации серверных приложений: ApacheTomcat, Nginx, JavaEnterpriseUserSolution (JEUS) и др. ApacheTomcat - это контейнер, позволяющий использовать такие приложения, как сервлеты и серверные страницы [3]. Nginx— веб-сервер и почтовый прокси-сервер, работающий на Unix-подобных операционных системах. JavaEnterpriseUserSolution (JEUS) —сервер приложений, разрабатываемый TmaxSoft.

У каждого из этих решений есть несколько общих минусов: они реализуют очень узкий набор действий, не имеют функционала для масштабирования нагрузки, преимущественно ориентированы в направлении веб-разработки и сложны в использовании.

Целью данной работы является разработка библиотеки классов, решающих основные проблемы разработки серверного приложения: распределение нагрузки приложения, работа с файлами и базами данных.

Данный программный продукт должен обладать следующими функциональными возможностями:

- простота использования;
- кроссплатформенность;
- возможность расширения функционала с помощью написания стандартизированных модулей;
- удобная система обмена сообщениями между различными узлами системы;
- реализованные системы серверных метрик, логирования, мониторинга производительности;
- возможность конфигурирования всех узлов системы;
- работа с любыми реляционными базами данных;
- реализация ресурсной системы, позволяющей конфигурировать экземпляры объектов без вмешательства непосредственно в код приложения.

При разработке библиотеки классов должны быть решены следующие задачи:

- разработана структура серверного приложения, реализующая горизонтальное масштабирование;
- проведена стандартизация основных составляющих серверного приложения для возможности реализации замены одной части приложения независимо от остальных;
- реализован мониторинг состояния приложения: логирование, серверные метрики;
- простая и удобная работа с любой реляционной базой данных;
- организовано сетевое взаимодействие как микросервисов серверного приложения, так и серверного приложения с множествами клиентских приложений;
- простота установки, настройки и использования;
- доступность (программное обеспечение должно быть в свободном доступе с открытым исходным кодом, что позволит привлечь большее количество пользователей и разработчиков).

### Программная реализация серверного приложения

Разработанная библиотека предназначена для написания серверного приложения с любыми требованиями в максимально короткие сроки. Библиотека легко и быстро позволяет обеспечить ключевые требования к серверному

приложению: распределение нагрузки, мониторинг, работа с базами данных и многое другое.

Полный состав библиотеки:

- мастер-сервис для организации распределенной нагрузки;
- сервис для работы с базами данных;
- сервис для работы с пользовательскими приложениями;
- сервис для реализации внутренней логики;
- утилита для обмена информацией между различными частями приложения;
- сервис для работы с метриками, телеметрией и аналитикой;
- утилита для работы с файловой системой;
- утилита для логирования событий;
- утилита для сериализации и десериализации объектов;
- утилита для мониторинга скорости выполнения тактов каждой отдельной части системы.

Возможная структура серверного приложения, использующего все возможности библиотек, представлена на рис. 1.

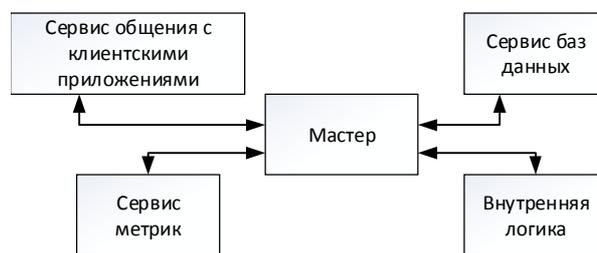


Рис. 1. Возможная структура серверного приложения

На рисунке видно, что в предполагаемой реализации приложения будет существовать множество различных сервисов, соединенных между собой одним отдельным мастер-сервисом. Такая архитектура позволяет [4]:

- дожидаться перехода всех необходимых частей приложения в рабочее состояние;
- контролировать состояния частей приложения и детектировать критичные проблемы в работе приложения для своевременного принятия необходимых мер по их устранению;
- отделить «транспортную» нагрузку от остальных частей приложения;
- обеспечить работу нескольких дублирующих сервисов, равномерно распределяя по ним нагрузку.

Несмотря на то, что представленная выше архитектура приложения имеет множество

плюсов, использование отдельного сервиса для распределения транспортной нагрузки может быть нецелесообразно. В таком случае в библиотеке предусмотрена организация прямого общения между различными частями приложения. В программе имеется возможность настраивать любые параметры, необходимые для работы приложения в удобном для чтения и изменения xml-формате. По умолчанию, например, необходимо задать сетевые порты для интересующих частей сервера. Для задания базовых параметров предусмотрена удобная работа с файловой системой и десериализация данных XML в объекты классов Java.

Для примера работы с данной библиотекой создано небольшое серверное приложение, использующее все имеющиеся функции: созданы мастер-сервис, сервис по работе с БД, два сервиса внутренней логики (лобби-сервис и простейший сервис, считающий секунды и отправляющий их клиентскому приложению) и сервис для обмена информацией с клиентским приложением (frontend). Предполагается следующая линейная работа приложения, приведенная ниже.

Пользователь отправляет свои данные на Frontend. Frontend отправляет запрос сервису работы с базами данных (DBService) через мастер-сервис. DBService производит поиск пользователя с переданными из Frontend данными входа. Если их нет – DBService отправляет информацию о неверно введенных данных на Frontend, который, в свою очередь, сообщает об ошибке пользовательскому приложению. Если сервис БД находит нужную запись, то он отправляет на Frontend информацию о найденном пользователе.

Получив информацию от сервиса БД, Frontend производит поиск по созданным клиентским сессиям. Если находит – перенаправляет новому известному клиенту данные с сервера mechanics (о нем будет написано позднее). Если Frontend не находит пользовательской сессии, то он создает новую сессию и перенаправляет информацию о пользователе на Lobby-сервис.

Lobby – промежуточный сервис, использующийся как временное хранилище пользователя до того, как будет произведена процедура перехода к сервису mechanics. Однако библиотека не ограничивает использование Lobby только как временного хранилища. Разработчик финального продукта может запрограммировать любой необходимый функционал. После успешного присоединения пользователя к Lobby-сервису, последний отправляет на Frontend

информацию об этом, а frontend, в свою очередь, на клиентское приложение.

Алгоритм работы приложения представлен на рис. 2.

При этом на всех этапах всеми функциональными частями приложения используются функции логирования и серверных метрик. Логирование организовано по следующим правилам:

- логи одного запуска серверного приложения хранятся в одной уникальной директории. Логи разных запусков не смешиваются;
- логи каждой функциональной части пишутся в уникальные файлы, в названии которых указано название функциональной части и время запуска;
- в каждом событии логируется файл и строка, из которой осуществляется логирование, а также точное время записи;
- для критичных событий логируется полный стек вызова;
- логируются все события, включая исключения времени выполнения.

Метрики реализованы через отдельный сервис, собирающий информацию и выводящий ее в стороннее приложение Prometheus. Этот сервис получает через систему сообщений команды от других сервисов с командой на инкремент либо декремент и название конкретной серверной метрики.

Для нормальной работы программы на компьютере пользователя должен быть установлен пакет JavaSE версии 8.0 или выше.

Для установки программного продукта «Библиотека для реализации серверного приложения» необходимо скопировать все содержимое в папку со сторонними библиотеками разрабатываемого проекта. Затем необходимо добавить данную библиотеку в список зависимостей для модулей серверного приложения, создаваемого на основе данной библиотеки.

### Конфигурация серверного приложения

Настройка логирования осуществляется путем создания файла `vclasspath` проекта, соответствующего одному из возможных форматов:

`log4j2.yaml` или `log4j2.yml` – настройки задаются в формате Yaml;

`log4j2.json` или `log4j2.jsn` – настройки задаются в формате Json;

`log4j2.xml` – настройки задаются в формате xml.

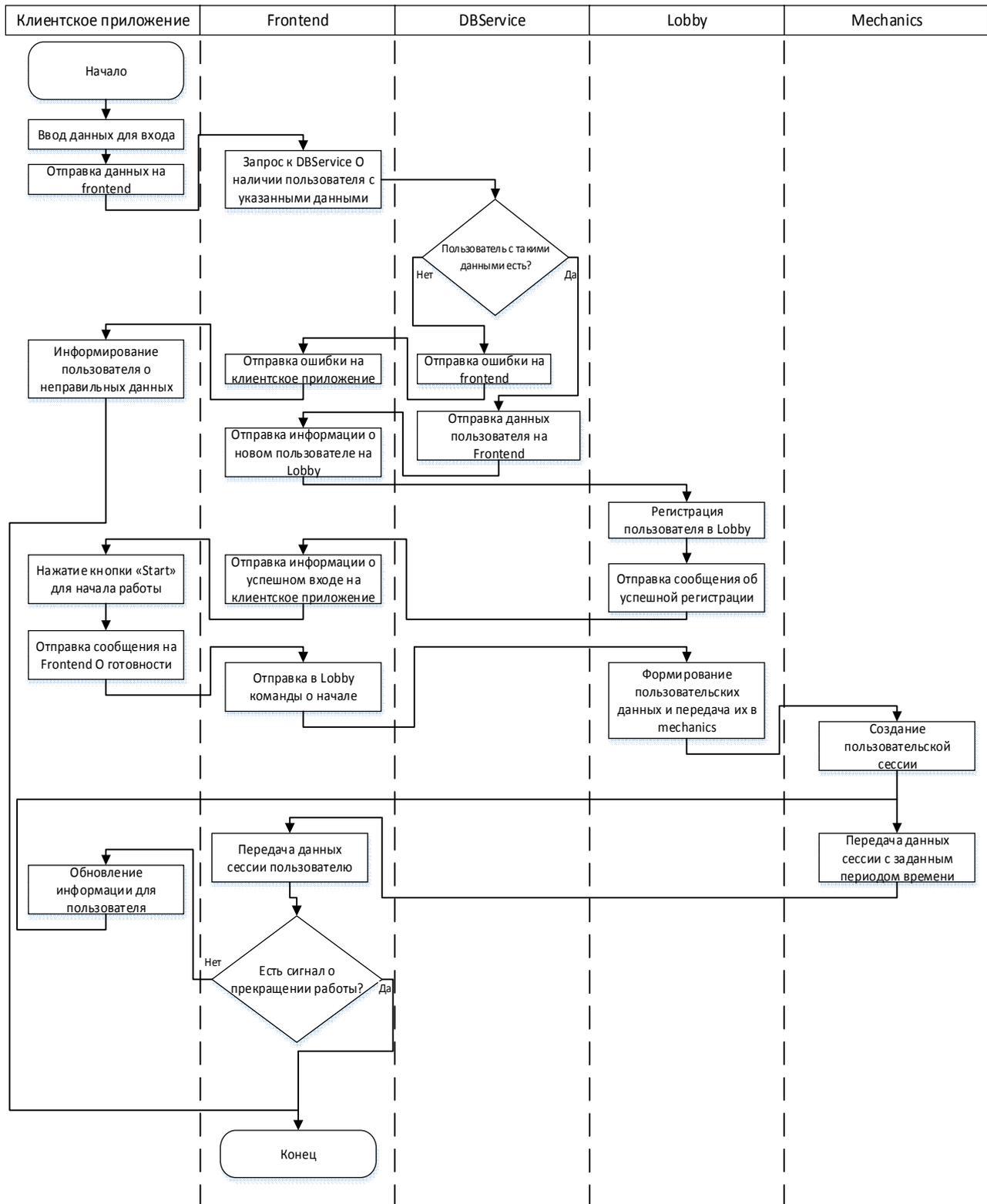


Рис. 2. Алгоритм работы приложения

Независимо от выбранного формата, конфигурационный файл должен иметь две главные категории: Appenders и Loggers. В категории Appenders настраивается поведение логов: способ вывода (файл, консоль) и формат

записи. Loggers определяют, какие уровни логирования в какие appenders будут выводиться [5]. Пример настроенного в формате XML лога представлен на рис. 3.

```

1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2  <configuration monitorInterval="3">
3    <Properties>
4      <Property name="name">${ctx:LOGNAME}</Property>
5      <Property name="time">${ctx:STARTTIME}</Property>
6    </Properties>
7    <appenders>
8      <File name="FILE" fileName="logs/${time}/${name}.log" append="true">
9        <PatternLayout pattern="%d{ISO8601} [%-5p] (%F:%L) - %m%n"/>
10     </File>
11     <Async name="Async">
12       <AppenderRef ref="FILE"/>
13     </Async>
14     <Console name="STDOUT" target="SYSTEM_OUT">
15       <PatternLayout pattern="%d{HH:mm:ss.SSS} %-5level %class{36}:%L %M - %m%n"/>
16     </Console>
17   </appenders>
18   <loggers>
19     <root level="info">
20       <appender-ref ref="STDOUT"/>
21     </root>
22     <logger name="file" level="info">
23       <appender-ref ref="Async"/>
24     </logger>
25   </loggers>
26 </configuration>

```

Рис. 3. Пример конфигурационного файла в формате XML

Для использования метрик в первую очередь необходимо настроить их использование в самом приложении. Это возможно двумя способами: использованием микросервиса `MetricServiceImpl` (для централизованного вывода метрик) либо использованием класса `MetricsHelper` (для возможности реализации вывода метрик отдельно для каждого микросервиса). Для настройки метрик необходимо установить бесплатные сторонние приложения Prometheus и Grafana.

Prometheus настраивается в конфигурационном файле `prometheus.yml`. В конфигурационном файле можно ссылаться на файлы правил. Правила помогают предварительно вычислять наиболее используемые или требующие затрат ресурсов параметры и сохранять их в виде новых временных рядов. Осуществлять поиск по предварительно рассчитанным параметрам значительно проще, чем при каждом запросе заново вычислять их значения. Это может оказаться полезным, например, при работе с дашбордами, которые запрашивают значения параметров при каждом обновлении. В общем виде синтаксис правил можно представить так [6,7]:

<имя временного ряда>{метки} = <параметр для записи>

Prometheus сверяется с правилами с определённой периодичностью, указанной в конфигурационном файле в параметре `evaluation_interval`. После каждой сверки Prometheus пересчитывает значение параметра и сохраняет его под новым именем с текущей временной меткой.

В последнюю очередь необходимо настроить Grafana. Для этого нет необходимости в правках конфигурационных файлов, простейшие настройки можно производить напрямую из приложения. После запуска Графаны необходимо с помощью любого браузера зайти по адресу `http://localhost:3000/` (в случае, если необходимо изменить это, настройки хранятся в файле `conf/defaults.ini`). В появившемся окне необходимо ввести «admin» в качестве логина и пароля (это значения по умолчанию, их можно изменить в настройках программы). Далее необходимо войти в существующий или создать новый Dashboard, настроить название и основные свойства отображения на вкладке «General».

Для конфигурации серверного приложения служит конфигурационный файл `config.xml`, находящийся в пакете `configs` модуля `base`. Данный файл является сериализованной версией объекта класса `ServerConfig` пакета утилит (`utils`), но может быть заменен любым файлом, путь к которому указан в аргументах при запуске каждого отдельного микросервиса.

Файл содержит отдельные настройки для IP (`ip`) и портов (`masterPort` и `secondPort`) каждого из микросервисов, а также настройки для соединения с базой данных: `databasePath` – сетевой путь до базы данных, `dbLogin` и `dbPass` для данных авторизации к базе пользователя, от имени которого будут производиться операции с базой.

### Структура серверного приложения

Все перечисленные далее микросервисы

реализуют один общий интерфейс Node, содержащий следующие методы:

- Main() – для запуска только этого сервиса отдельно от остальных;
- getLog() – получить текущий логгер микросервиса;
- run() – унаследованный от Runnable метод для запуска;
- getAddress() – получение уникального адреса микросервиса;

setMasterReady(boolean) – установить значение готовности мастера;

getMasterService() – метод, возвращающий адрес мастер-сервиса, к которому подключен текущий микросервис (возвращает свой адрес).

Основной микросервис, реализованный в библиотеке – класс MasterServiceImpl. Это микросервис, служащий для синхронизации работы других сервисов и для передачи отдельных сообщений (рис. 4).

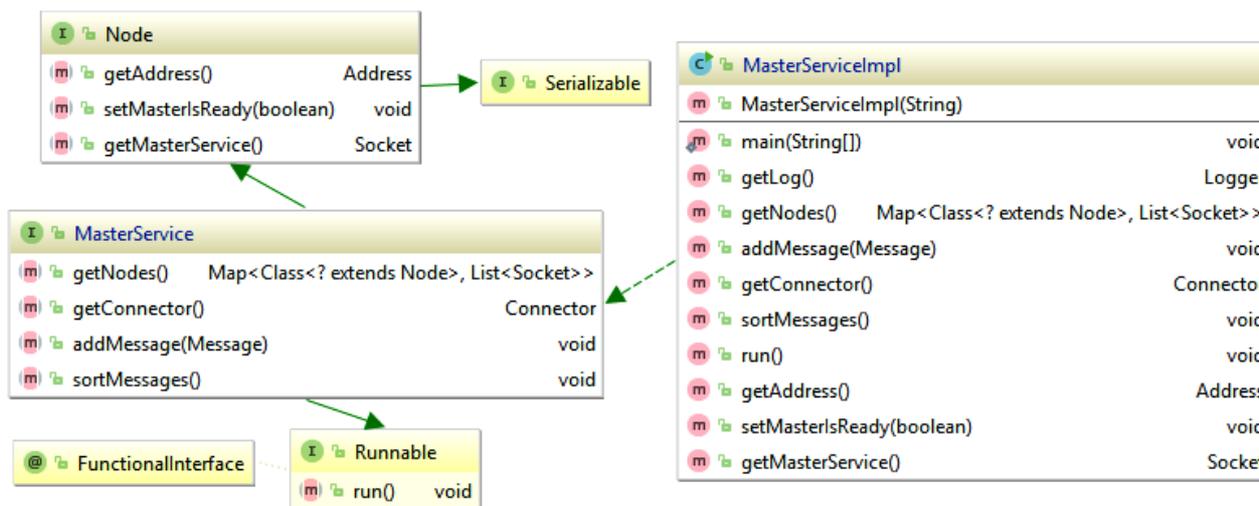


Рис. 4. Диаграмма класса MasterServiceImpl

Для работы с базой данных реализован сервис HDBServiceImpl, использующий для своей работы стороннюю библиотеку Hibernate.

Frontend – это микросервис, полностью отвечающий за коммуникации с пользовательскими приложениями. Это также значит, что пользователи знают о существовании только этого сервиса.

LobbyServiceImpl – микросервис, в котором пользователь зарегистрирован до начала сессии в микросервисе механики и в который пользователь попадает после завершения механической сессии. При необходимости есть возможность реализовать любой необходимый функционал на базе LobbyServiceImpl.

GameMechanicsImpl – основной сервис, на котором происходят некоторые действия. Для каждой механической сессии создается отдельный поток в приложении.

ClientImpl – демонстрационное клиентское приложение.

Клиентское приложение имеет два окна. Первое окно – окно авторизации. Данное окно имеет поля для ввода логина и пароля пользователя, поле для ввода адреса серверного при-

ложения и кнопки для авторизации и создания нового пользователя.

В разработанной программе есть два типа принципиально разных модулей: микросервисы и утилиты. При разработке дополнительных модулей следует придерживаться следующего алгоритма:

- выбрать наиболее близкий по назначению существующий базовый модуль;
- выделить утилиты и реализовать их в коде в специальном пакете (utils);
- разработать и реализовать входящие и исходящие сообщения для микросервиса;
- реализовать методы выбранного базового интерфейса и методы разрабатываемого сервиса;
- настроить Gradle для правильной сборки нового модуля.

Выбор базового модуля производится среди реализованных интерфейсов в пакете base, однако есть возможность создания нового базового интерфейса модуля. Главным требованием к разработанному интерфейсу микромодуля является наследование его от интерфейса Node – родительского интерфейса всех микромодулей. Базовый функционал, необходимый в микромодуле (но в перспективе или уже в момент реализации

необходимый и в других модулях приложения), следует реализовывать отдельно в пакете `utils`. Примером такого функционала может являться работа с файлами или система сообщений между микросервисами. Для каждой отдельной утилиты следует создать свой пакет и интерфейс, содержащий все основные методы, в модуле `base`.

Все микромодули осуществляют обмен данными (через мастер-сервис или напрямую) с помощью единой системы сообщений. Каждое сообщение представляет собой класс, унаследованный от класса `base.masterService.Message`. Этот класс содержит уникальный идентификатор (адрес) отправителя, ссылку на класс получателя (конкретного адресата мастер-сервис выбирает сам по заданному алгоритму), конструктор и метод `exec`, выполняемый получателем сообщения.

Каждая встроенная утилита находится в отдельном пакете в модуле `utils`. Утилита может содержать как один класс, так и несколько различных классов. С целью упрощения процедуры замены утилиты со стандартной на уникальную, написанную разработчиком конечного приложения для каждого из основных классов утилит, предусмотрен интерфейс в модуле `base`. Ресурсная система (`ResourceSystem`) – одна из основных утилит библиотеки. Она позволяет конфигурировать объекты с различными особенностями путем изменения не исходного кода, а отдельных файлов любым текстовым редактором. Реализованная система работает с файлами в формате `xml`.

Для сериализации и десериализации (`SerializerHelper`) разработан отдельный класс – `SerializerHelper`. Он включает в себя все основные способы сериализации объектов: бинарную сериализацию и несколько видов файловой сериализации [8].

Для серверных микросервисов (например, мастер-сервиса и фронтенда), которые работают с большим количеством одновременных подключений через один сокет, разработан отдельный набор утилит, реализующих соединения и обрабатывающих входящие сообщения. Для контроля скорости работы каждого микросервиса служит класс `TickSleeper`, алгоритм работы которого показан на рис. 5.

### Заключение

Данная библиотека исходного кода предназначена для облегчения разработки серверного приложения любой сложности. Основное направление – микросервисные серверные приложения с возможностью реализации распределенной нагрузки.

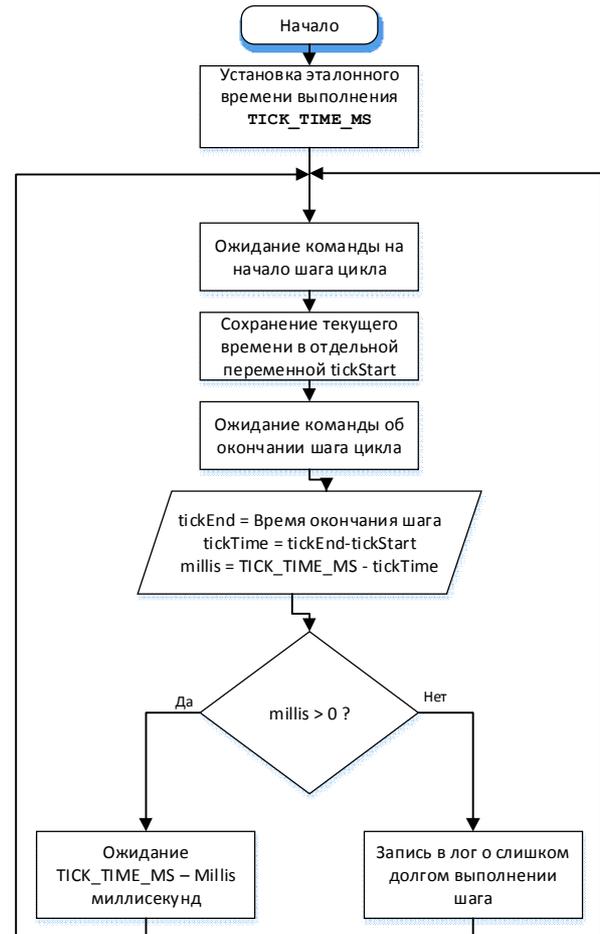


Рис. 5. Алгоритм работы TickSleeper

### Литература

1. Интеграционные решения при построении корпоративных информационных систем / В.В. Сафронов и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т.18. № 4(3). С. 646-654.
2. Интеграционная модель распределённой информационной системы предприятия нефтехимической отрасли / В.В. Сафронов и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2017. № 10. С. 34-39.
3. ApacheTomcat. Руководство по UbuntuServer [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://help.ubuntu.com/lts/serverguide/tomcat.html>
4. Эккель Б. Философия Java. Библиотека программиста. Изд. 4-е. СПб.: Питер, 2009. 640 с.
5. Конфигурация Log4j2 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://logging.apache.org/log4j/2.x/manual/configuration.html>
6. Мониторинг сервисов с Prometheus [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blog.selectel.ru/monitoring-servisov-s-prometheus/>
7. Кравец О.Я., Подвальный С.Л. Разработка компонент информационного обеспечения поддержки запросов к подсистеме выдачи результатов мониторинга // Системы управления и информационные технологии. 2011. Т. 45. № 3.1. С. 158-161.
8. Сериализация в Java [Электронный ресурс] Режим доступа : <https://habr.com/post/60317/>

Поступила 29.04.2018; принята к публикации 16.07.2018

### Информация об авторах

**Барабанов Владимир Федорович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvf@list.ru

**Гребенникова Наталия Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: g-naty@yandex.ru

**Галамага Дмитрий Сергеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: graf2242@gmail.com

**Кенин Сергей Леонидович** – канд. техн. наук, руководитель проектов, Atos (IT Solutions end Services) (394026, Россия, г. Воронеж, пр. Труда, 65), e-mail: sergey.kenin@atos.net

## DEVELOPMENT OF SPECIALIZED LIBRARIES FOR IMPLEMENTING SERVER APPLICATIONS IN JAVA

V.F. Barabanov<sup>1</sup>, N.I. Grebennikova<sup>1</sup>, D.S. Galamaga<sup>1</sup>, S.L. Kenin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Atos, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article gives a general description of the technology for the development of large projects, shows the importance of prototyping in order to minimize losses when using libraries. Reducing the development time of the prototype and reducing the cost of the development process occurs with the preservation of the possibility of finalizing and replacing any component without interfering with the rest of the product without limiting the available functionality. The developed library is intended for writing a server application with any requirements in the shortest possible time. The composition of the library, which is a set of services and utilities, allows organizing distributed load, working with files and databases, organizing interaction of various parts of the application, monitoring and logging of the application, serialization and deserialization of objects. An example of working with this library is given, for this purpose a server application was created, an algorithm for its operation is given. The structure of the developed server application allows to use the logging and server metrics functions at all stages by all the functional parts. The working conditions of the program, the order of installation and configuration of the program product are given, the configuration file containing the necessary settings is offered. The sequence and order of tuning described allows to make full use of the proposed features of the class library

**Key words:** class library development, server application, monitoring, logging

### References

1. Safronov V.V. et al. "Integration solutions in the construction of corporate information systems", *Proceedings of the Samara scientific center of RAS (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN)*, 2016, vol. 18, no. 4 (3), pp. 646-654.
2. Safronov V.V. et al. "Integration model of distributed information system of petrochemical industry", *Chemical and oil and gas engineering (Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye)*, 2017, no. 10, pp. 34-39.
3. "ApacheTomcat. Guide to UbuntuServer", available at: <https://help.ubuntu.com/lts/serverguide/tomcat.html>
4. Eckel B. "The philosophy of Java. Programmer's library. Ed. 4<sup>th</sup>" ("Filosofiya Java. Biblioteka programmista. Izd. 4-e"), St. Petersburg, Piter, 2009, 640 p.
5. "Log4j2 configuration", available at: <https://logging.apache.org/log4j/2.x/manual/configuration.html>
6. "Monitoring services with Prometheus", available at: <https://blog.selectel.ru/monitoring-servisov-s-prometheus/>
7. Kravets O.Ya., Podval'nyy S.L. "Development of information support components to support requests to the subsystem of monitoring results", *Control systems and information technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2011, vol. 45, no. 3.1, pp. 158-161.
8. "Serialization in Java", available at: <https://habr.com/post/60317/>

Submitted 29.04.2018; revised 16.07.2018

### Information about the authors

**Vladimir F. Barabanov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvf@list.ru

**Natalia I. Grebennikova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

**Dmitriy S. Galamaga**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: graf2242@gmail.com

**Sergey L. Kenin**, Cand. Sc. (Technical), Project Manager, Atos (65 Prospekt Truda, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergey.kenin@atos.net

## ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ХРАНЕНИИ КРИОГЕННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

М.В. Богданова

Воронежский государственный педагогический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается построение интеллектуальной информационной системы распространения тепла в цилиндрической емкости, частично заполненной криогенной жидкостью. Сосуд подвергается внешнему тепловому воздействию. В результате конвективных процессов и процессов теплопереноса возникают значительные градиенты температуры и давления, которые могут привести к нарушению условий хранения криогенных жидкостей. Рост давления исследуется с помощью нечеткой составляющей, что в свою очередь позволяет уменьшить внешнее тепловое воздействие. Рассматриваются уравнения Навье-Стокса. Делается переход от трехмерной задачи к последовательности двумерных задач. После определения теплового поля и поля течений с помощью нечеткой математики определяется давление, возникающее внутри сосуда. В работе происходит совмещение вычислительной физики и нечеткой логики. С опорой на симбиоз указанных наук выполняется задача управления отдельно взятой интеллектуальной системы. Основным методом решения является метод конечных разностей, который позволяет определить состояние как жидкости, так и газообразной среды в каждой фиксированной точке в каждый фиксированный момент времени. Решение подобных задач будет полезно во многих областях науки и техники. Среди них можно выделить технические области безопасного хранения криогенных жидкостей

**Ключевые слова:** нечеткая интеллектуальная система, уравнения Навье-Стокса, криогенная жидкость, конвекция, процессы теплопереноса, двумерная задача, процесс фазификации и дефазификации, алгоритм Мамдани.

### Введение

Во многих развитых странах мира интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких контроллеров и регуляторов и созданию на их основе интеллектуальных систем управления. Создание нечетких интеллектуальных систем по-прежнему остается одним из наиболее современных и актуальных направлений развития науки и техники. В качестве математического аппарата, используемого в основе создания подобных систем, в большинстве случаев рассматривается нечеткая математика. Нечеткие модели имеют ряд особенностей по сравнению с традиционными, наиболее существенными из них являются следующие: их гибкость, адекватность моделируемой реальности и получение решения соотносимого с исходными данными; требование меньшего времени для получения результата; увеличение скорости обработки качественной информации при использовании относительно несложных специализированных устройств. Нечеткие модели создаются в тех случаях, когда построение четких невозможно или затруднительно.

Криогенные жидкости по-прежнему находят свое применение в различных технических областях. Это в первую очередь топливо для

авиационно-космической техники. Известно, что в резервуаре с жидким криопродуктом реализуется свободно-конвективное движение, зависящее от времени, геометрических размеров резервуара, распределения теплового потока по поверхности емкости, теплофизических свойств жидкого криопродукта и его паров, степени заполнения резервуара, начального распределения температуры в нем. Под воздействием внешнего теплового воздействия в емкостях с криогенными жидкостями может усиливаться конвекция, возникать значительные тепловые градиенты вплоть до турбулентных состояний. Это в свою очередь приводит к увеличению давления в емкости, а затем может привести к возможности возникновения взрыва в данной емкости с криогенной жидкостью, что в свою очередь может привести к возникновению технической катастрофы. Создана адекватная модель теплофизического процесса, которая учитывает возможные характеристики процесса, а также дает возможность изменять необходимые параметры в зависимости от изменения внешних тепловых воздействий.

### Постановка задачи

В данной статье рассматривается горизонтальный сосуд цилиндрической формы с полусферическими днищами. Сосуд частично за-

полнен криогенной жидкостью до высоты  $h$ . Зеркало жидкости параллельно оси цилиндра. Имеется капиллярный сток заданной мощности.  $V_0$  – скорость вытекания жидкости вдоль линии  $AB$ . К внешней поверхности цилиндра подводится поток тепла  $q$ . Свободная поверхность жидкости предполагается недеформируемой и прямолинейной. Трение на этой поверхности равно нулю. Внешняя массовая сила  $k$  перпендикулярна оси цилиндра.  $V_0 = 0,8$ ,  $H = 3,2$  м (рис. 1).

Среда внутри цилиндра неоднородна. Известны ее теплофизические характеристики. Рассматривая одно из поперечных сечений сосуда, можно ввести следующие обозначения:  $\Gamma$  – подвижная граница раздела сред (рис. 2);  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – внешняя и внутренняя поверхности оболочки сосуда;  $\Delta d$  – толщина оболочки;  $D_1, D_2$  – области, заполненные газом и жидкостью соответственно;  $D_3$  – область, соответствующая оболочке сосуда (металл);  $R$  – радиус сечения. Он различен для сечений в области полусферического дна и равен  $R_0$  в цилиндрической части сосуда. Известно, что нестационарный прогрев жидкости в сосуде при подводе тепла извне и при наличии внешней массовой силы сопровождается конвективным движением, которое зависит от основного критерия подобия – числа Релея (диапазон чисел Релея ограничен значением  $10^3 - 10^5$ ,  $Gr - 10^3 - 10^5$ ).

Задана начальная температура внутри цилиндра и в его оболочке – 70 К. При увеличении числа Релея или Грасгофа существенно меняется характер конвекции. Особенности конвективных процессов, а также методам для их исследования посвящено большое количество работ.

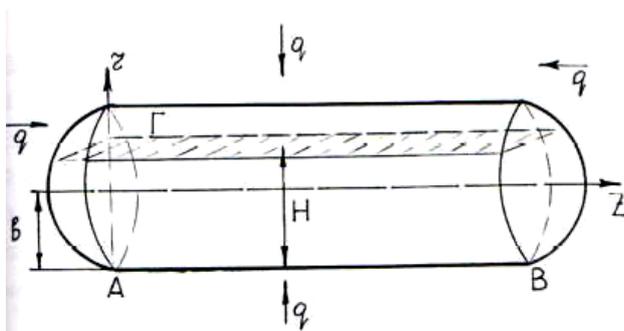


Рис. 1. Схема сосуда с криогенной жидкостью

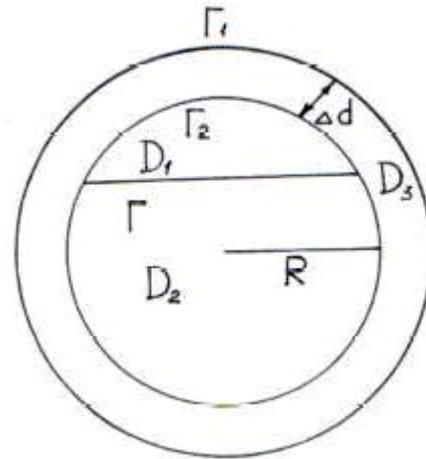


Рис. 2. Фрагмент поперечного сечения топливного бака

**Необходимо определить:**

- 1) температурное поле внутри, в оболочке и на поверхности цилиндра (т.е. значения  $T$ );
- 2) значения проекций скорости на оси координат (т.е. поле скоростей), а именно:  $U, W, V$  (проекции скорости на оси  $r, \varphi, z$ ).
- 3) значение давления, учитывая нечеткую составляющую.

**Методы исследования**

Для определения изменения во времени полей течения и температур используются уравнения теплогидродинамики [1, 2].

Уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \cdot W) = 0; \quad (1)$$

Уравнение импульса

$$\rho \frac{DW}{Dt} = k - \text{grad } p; \quad (2)$$

Уравнение внутренней энергии

$$\rho \cdot C_p \frac{DW}{Dt} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \beta T \cdot \frac{Dp}{Dt}; \quad (3)$$

$k$  – массовая сила,  $\text{grad } p$  – сила давления.

Если рассматривать трехмерное течение, то данная система уравнений будет определять пять скалярных переменных  $U, W, V, P$  и  $T$ , зависящих от координат  $r$  и времени  $t$ . Кроме того, должны быть известны зависимости  $\rho(T, p), C_p(T, p), \beta(T, p), \eta(T, p), \lambda(T, p)$ , описывающие свойства жидкости.

Таким образом, получаем замкнутую систему 5 уравнений относительно 5 неизвестных.

Зададим граничные условия

На поверхности твердой стенки используются условия прилипания

$$(W)\omega = 0 \quad (4)$$

Граничное условие для температуры  $T(r, t)$

$$q\omega = -(\lambda_n \text{grad } T)\omega \quad (5)$$

Фазовые переходы 1-го рода всегда связаны с поглощением или выделением тепла, называемого теплотой (скрытой теплотой) фазового перехода. Так как к рассматриваемому сосуду тепло подводится постоянно, то будем считать, что преобладают процессы испарения.

Определяется средняя температура на каждом фиксированном слое, прилежащем к границе раздела.

Средняя температура слоя вычисляется следующим образом:

$$T_{pcp} = \frac{\sum_{i=1}^M \left( \sum_{j=1}^n T_{ij} \right)}{F} \quad (6)$$

$F$  – число узлов на  $p$ -м слое.

Затем аналогично определяем среднюю температуру для этого же слоя в следующий момент времени  $\Delta t$ . Тогда масса вещества данного слоя получит определенное количество тепла, вычисляемое по следующей формуле  $\delta\theta = MCdT$ , где  $\delta\theta$  – количество тепла,  $dT$  – изменение температуры,  $M$  – масса тела,  $C$  – удельная теплоемкость. Если данное количество теплоты окажется  $\delta\theta > Mr$ , где  $r$  – удельная теплота испарения для полученной средней температуры, то данный слой переходит в газ. Затем уточняем давление на данном

слое, предварительно усреднив его. Таким образом, можно имитировать процесс испарения.

Поставленная трехмерная задача может быть сведена к последовательному решению двумерных задач. В общем виде задача зависит от трех переменных. Сведем ее к последовательности двумерных задач. Разобьем данный цилиндрический сосуд плоскостями, перпендикулярными его оси.

Рассматривать температурное поле будем в каждом из поперечных сечений бака. В цилиндрической части фигуры сечения представляют собой круги одного радиуса. А в области полусферического днища радиусы сечений различны.

Разбиение можно выбрать различным, поэтому количество сечений также меняется в зависимости от шага по  $z$ .

Тогда рассматриваемое температурное поле в каждом из поперечных сечений будет описываться системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для двумерного случая.

Решение дифференциальных уравнений, необходимых для построения модели, осуществлялось методом конечных разностей. Для этого построили объемную сетку, а затем сделали переход к плоским сеткам: на продольном и поперечном сечениях, причем переход сначала к поперечной, а затем к продольной сетке можно осуществить в каждый момент времени.

Рассматриваемое температурное поле в каждом из поперечных сечений будет описываться системой уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска для двумерного случая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dt} + U \frac{dU}{dr} + \frac{W}{r} \cdot \frac{dU}{d\phi} - \frac{W^2}{r} = -\frac{dP}{dr} - \frac{2}{r^2} \cdot \frac{dW}{d\phi} + \frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU}{dr} + f_1 \\ \frac{dW}{dt} + U \frac{dW}{dr} + \frac{W}{r} \cdot \frac{dW}{d\phi} + \frac{UW}{r} + \frac{W}{r^2} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{d\phi} + \frac{2}{r^2} \cdot \frac{dU}{d\phi} + \frac{d^2W}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dW}{dr} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2W}{d\phi^2} + f_2 \\ \frac{d(rU)}{dr} + \frac{dW}{d\phi} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + U \frac{d\theta}{dr} + W \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{1}{Pr} \left[ \frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2\theta}{d\phi^2} \right] \\ \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=R_0+\Delta d} = q \\ U|_{r=R_0} = W|_{r=R_0} = 0. \end{array} \right. \quad (7)$$

Аналогичную систему составляем и для продольного сечения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dU}{dt} + U \frac{dU}{dr} + V \frac{dU}{dz} + \frac{U}{r^2} = -\frac{dP}{dr} + \frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU}{dr} + f_1 \\ \frac{dV}{dt} + U \frac{dV}{dr} + V \frac{dV}{dz} = -\frac{dP}{dz} + f_3 \\ \frac{dU}{dr} + \frac{dV}{dz} + \frac{U}{r} = 0 \\ \frac{d\theta}{dt} + U \frac{d\theta}{dr} + V \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{Pr} \left[ \frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} + \frac{d^2\theta}{dz^2} \right] \\ \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=R_0+\Delta d} = q \\ \left. \frac{d\theta}{dr} \right|_{r=\sqrt{R_0^2-(z-l/2)^2}+\Delta d} = \gamma, \text{ если } z > l/2 \\ U|_{r=R_0} = V|_{r=R_0} = 0 \\ U|_{r=\sqrt{R_0^2-(z-l/2)^2}} = V|_{r=\sqrt{R_0^2-(z-l/2)^2}} = 0, \text{ если } z > l/2. \end{array} \right. \quad (8)$$

Далее, переходя к методу сеток и заменяя системы дифференциальных уравнений системами алгебраических уравнений, находим  $U$ ,  $V$ ,  $\theta$  для каждого фиксированного шага по времени и каждого фиксированного шага по координате.

После каждого шага, в результате которого было определено тепловое поле и поле течений в каждом поперечном и продольном сечении, уточнялось давление с помощью нечеткой математики.

### Выводы

Найдя из решения задачи значения температуры и конвективной составляющей, зададим определенные терма для лингвистической переменных температуры и конвективных составляющих [3]. Затем создадим определенные правила и получим выходную переменную давление, также принимающую определенное значение терма. Процесс фаззификации происходит с помощью функции принадлежности.

Расчет функции принадлежности  $\mu(x)$  типа кривой Гаусса. Формула для расчета в процессе фаззификации

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (9)$$

Когда происходит процесс фаззификации, то

используется набор правил, по которым можно уточнять значение давления.

1. **ЕСЛИ** температура = высокая и конвекция = высокая **ТО** давление = высокое
2. **ЕСЛИ** температура = нормальная и конвекция = высокая **ТО** давление = высокое
3. **ЕСЛИ** температура = нормальная и конвекция = нормальная **ТО** давление = нормальное
4. **ЕСЛИ** температура = нормальная и конвекция = низкая **ТО** давление = нормальное
5. **ЕСЛИ** температура = низкая и конвекция = нормальная **ТО** давление = нормальное

Получив определенное значение терма давление, производим операцию дефаззификации по алгоритму Мамдани и получаем конкретное значение давления, которое затем подставляем в систему дифференциальных уравнений. Данные действия повторяются для каждого поперечного и каждого продольного сечения. В результате полученных значений температуры и давления возможна корректировка внешнего теплового воздействия [4, 5].

Таким образом, разработанная методика позволяет выполнить численный эксперимент по определению теплового и конвективного режимов в горизонтальном цилиндрическом сосуде с полусферическими днищами, частично заполненном криогенной жидкостью. В данной работе предложена дискретно-

непрерывная математическая модель, позволяющая рассчитать процесс тепломассопереноса в криогенных системах при наличии фазовых превращений.

Решена трехмерная пространственная задача тепломассопереноса в замкнутой цилиндрической области, частично заполненной низкотемпературной жидкостью.

Разработана методика компьютерного эксперимента по определению теплового и конвективного режимов в горизонтальном цилиндрическом сосуде с полусферическими днищами, частично заполненном криогенной жидкостью. Программа реализована в среде Delphi 7, подключен графический интерфейс.

Результаты моделирования показали, что в баке возникают значительные температурные градиенты в пристеночном слое, а также значительное изменение давления в центральной части бака.

#### Обозначения

$U, W$  – проекции скорости на оси  $r$  и  $\varphi$ ;  $f_1, f_2$  – проекции внешней силы на оси  $r$  и  $\varphi$ ;  $R$  – радиус цилиндра;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Pr$  – число Прандтля;  $p$  – отклонение давления от статического;  $\theta$  –

безразмерная температура,  $\theta = \frac{T - T_0}{q \cdot R} \cdot \lambda$ ;  $T_0$  –

начальная температура  $U$  и  $W$  – проекции скорости на оси  $r$  и  $z$ ;  $p$  – отклонение давления от статического;  $\theta$  –

безразмерная температура,  $\theta = \frac{T - T_0}{q \cdot R} \cdot \lambda$ ;  $T_0$  –

начальная температура;  $f_1, f_2$  – проекции внешней силы на оси  $r$  и  $z$ ;  $R_0$  – радиус в цилиндрической части;

$w = w(r, t)$  – вектор скорости,  $\rho$  – плотность,

$C_p$  – удельная теплоемкость,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $p$  – давление,  $q\omega$  – плотность теплового потока на стенке,  $W\omega$  – значение скорости на стенке,

$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2 \cdot \text{sigma}^2}}$  – функция Гаусса, позволяющая выполнить процедуру фаззификации.

#### Литература

1. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие для вузов / под ред. П.В.Трусова. М.: Логос, 2005. 438 с.

2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры, 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 320 с.

3. Системы искусственного интеллекта: практ. курс: учеб. пособие / В. А. Чулюков [и др.]; под ред. И.Ф. Астаховой. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 292 с.

4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

5. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.

Поступила 03.05.2018; принята к публикации 16.07.2018

#### Информация об авторе

**Богданова Мария Васильевна** - канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и методики преподавания математики, Воронежский государственный педагогический университет (394043, Россия, г. Воронеж, Ленина, 86), e-mail: bmw14@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6769-0024>

## CONSTRUCTION OF FUZZY INTELLIGENT SYSTEM OF CRYOGENIC LIQUIDS STORAGE

**M.V. Bogdanova**

**Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the construction of an intelligent information system for the propagation of heat in a cylindrical vessel partially filled with a cryogenic liquid is considered. The vessel is exposed to external heat. As a result of convective processes and heat transfer processes, significant temperature and pressure gradients arise which can lead to a violation of the storage conditions of cryogenic liquids. The growth of pressure is investigated with the aid of a fuzzy component, which in turn makes it possible to reduce the external thermal effect. The Navier-Stokes equations are considered. The transition is made from the three-dimensional problem to a sequence of two-dimensional problems. After determining the thermal field and flow field with the help of fuzzy mathematics, the pressure that arises inside the vessel is determined. In the work there is a combination of computational physics and fuzzy logic. With the support of the symbiosis of these sciences, the task of managing an individual intellectual system is carried out. The main method of solution is the method of finite differences, which allows to determine the state of both fluid and gaseous medium at each fixed point at each fixed time. The solution of such problems will be useful in many fields of science and technology. Technical areas of safe storage of cryogenic liquids are among them

**Key words:** fuzzy intelligent system, Navier-Stokes equations, cryogenic liquid, convection, heat-and-mass transfer, two-dimensional problem, the process of fuzzification and defuzzification, algorithm Mamdani

#### References

1. Ed. Trusova P.V. "Introduction into mathematical modeling: manual" ("Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Logos, 2005, 438 p.
2. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. "Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples", ("Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery"), Moscow, FIZMATLIT, 2005, 320 p.
3. Chulyukov V.A. "Systems of artificial intelligence: practical manual" ("Sistemy iskusstvennogo intellekta: prakt. kurs: ucheb. posobie"), Moscow, BINOM, 2008, 292 p.
4. Leonenkov A.V. "Fuzzy modeling in MATLAB environment and fuzzyTECH" ("Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2005, 736 p.
5. Pegat A. "Fuzzy modeling and control" ("Nechetkoe modelirovanie i upravlenie"), Moscow, Binom, Laboratoriya znaniy, 2009, 798 p.

Submitted 03.05.2018; revised 16.07.2018

#### Information about the author

**Mariya V. Bogdanova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Pedagogical University (86 Lenin st., Voronezh 394043, Russia), e-mail: [bmw14@inbox.ru](mailto:bmw14@inbox.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6769-0024>

УДК 621.5:664.7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ПШЕНИЧНЫХ ЗАРОДЫШЕЙ

О.А. Орловцева<sup>2</sup>, В.В. Портнов<sup>1</sup>, Л.И. Назина<sup>2</sup>, Н.Л. Клейменова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** работа посвящена определению оптимальных режимов теплоносителя для стабилизации качества зародышей пшеницы при хранении. Выбор исследуемого продукта обусловлен ценным биохимическим составом и широтой его применения. Источником горячего и холодного потоков выбрана вихревая труба, работа которой основана на эффекте Ранка-Хилша. Для определения значений параметров пшеничных зародышей, которые позволят обеспечить неизменность качества продукта при хранении, применили ортогональное композиционное планирование. В результате обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс стабилизации пшеничных зародышей под влиянием нагрева, введения ингибитора и охлаждения. В результате решения задачи оптимизации были получены значения оптимальных режимов исследуемых факторов: температура нагретых пшеничных зародышей 57 °С, концентрация аскорбиновой кислоты 9,5 %, значение температуры охлажденного продукта 4°С. На основании полученных данных установлены значения горячего и холодного потоков, необходимые для управления качеством продукта. Проанализированы методики расчета параметров вихревой трубы

**Ключевые слова:** вихревая труба, теплоноситель, планирование, оптимизация, пшеничные зародыши, управление качеством

### Введение

В пищевой промышленности важным процессом любого производства является термическая обработка продукции: кипячение, нагрев, обработка паром, охлаждение, замерзание и т.д. В связи с этим важным аспектом разработки технологии является расчет оптимальных режимов теплоносителей и выбор теплообменного аппарата или установки. В связи с важностью возложенных на данное оборудование функций, оно должно отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечить подачу на требуемый этап производства передачу теплоносителя в необходимом количестве для получения заданной технологической документацией температуры;
- обладать пропускной способностью, соответствующей уровню гидравлических сопротивлений для каждой из рабочих сред;
- поверхность теплообмена и элементы конструкции должны обладать достаточной химической стойкостью к воздействию агрессивных сред;
- конструкция должна быть таковой, чтобы предусматривалась возможность осмотра поверхности теплообмена и доступность для её периодической очистки и ремонта;

- обладать достаточным запасом прочности от напряжений, возникающих в результате воздействия давления рабочих сред и температурных деформаций;

- быть надёжными в эксплуатации, эргономичным, иметь возможно меньшие габариты и металлоёмкость.

Технологическая линия производства пищевых продуктов часто предусматривает последовательный нагрев и охлаждение. В этом случае существует возможность выбора для производства теплоносителей вихревой трубы, в основу работы которой заложен эффект Ранка-Хилша (рис. 1). Его суть состоит в разделении подаваемого в нее воздуха на два потока - с температурой выше и ниже исходной. Помимо этого данный источник обладает рядом преимуществ: простота конструкции, небольшие размер и масса, а отсутствие подвижных частей в устройстве обуславливает стремление значений показателей надежности и ресурса к 100 %; устройство действует при высоких температурах среды (газа), показатель расхода воздуха может варьироваться в пределах, необходимых для применения.

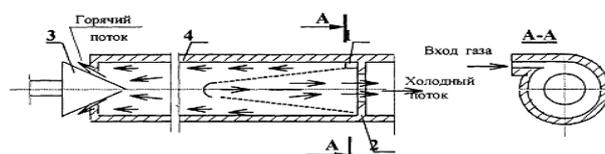


Рис. 1. Принцип действия вихревой трубы

### Постановка задачи

Одним из продуктов, качество которого зависит от своевременной тепловой обработки, является побочный продукт мукомольного производства - пшеничные зародыши. Они широко применяются в пищевой промышленности, косметической индустрии и медицине. Входящие в состав аминокислоты (в том числе незаменимые), витамины, микроэлементы, а также белковая и жировая составляющие обуславливают высокую ценность зародышевого продукта. Однако происходящие в пшеничных зародышах биохимические процессы, особенно действие ферментов липазы, липоксигеназы и каталазы, приводят к тому, что данный продукт быстро теряет свои качественные характеристики. Комплексное действие данных ферментов с течением времени приводит к интенсивному росту перекисного и кислотного чисел, которые являются важнейшими показателями безопасности, регламентированными Техническими регламентами. Первоначально под действием липазы происходит углубленный гидролиз липидов, при этом происходит формирование свободных жирных кислот, которые в дальнейшем интенсивно окисляются. На втором этапе действие липоксигеназы приводит к усилению разложения гидроперекисей жирных кислот на продукты кислой природы. При этом каталаза, находящаяся в продукте, обеспечивает наличие в составе молекулярного кислорода, который, в свою очередь, играет роль катализатора во всех окислительных реакциях. Согласно исследованиям [1, 2, 3], основными параметрами, влияющими на ферментативную активность, являются температура и рН среды.

Для расчета режимов теплоносителя необходимо установить значения температуры, достижение которых приведет к инактивации липазы, липоксигеназы и каталазы, что позволит стабилизировать качество пшеничных зародышей. Для этого применили математические методы планирования эксперимента [4]. Математическое описание процесса основано на данных, полученных при проведении серии опытов. Статистическая обработка результатов позволила сформулировать математическую модель – уравнение регрессии в виде полинома второй степени (1):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^N b_i x_i + \sum_{i=1}^N b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^N b_{ij} x_i x_j, (1)$$

где  $b_0$  – коэффициент, значение которого равно средней величине отклика, если влияющие

факторы принимают значения основного («нулевого») уровня;  $x$  – масштабированные варьирующиеся значения факторов, определяющие функцию отклика;  $i, j$  – индексы факторов;  $b_i$  – коэффициенты при линейных членах;  $b_{ij}$  – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, значения которых отражают взаимосвязь между ними;  $b_{ii}$  – коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие степень нелинейности выходного параметра в зависимости от рассматриваемых факторов;  $N$  – число факторов в матрице планирования.

Для решения поставленной задачи на основе проведенных литературных исследований в качестве факторов, оказывающих влияние на процесс управления качеством пшеничных зародышей, были выбраны температура пшеничных зародышей при нагреве ( $x_1$ , °С); концентрация ингибитора - в наших исследованиях аскорбиновой кислоты ( $x_2$ , %); температура охлажденного продукта ( $x_3$ , °С).

Выбранные факторы являются между собой совместимыми и невязанными (корреляция отсутствует). Пределы изменения исследуемых факторов приведены в табл. 1. Выбор интервалов изменения факторов (табл. 1) обусловлен проведенными исследованиями влияния температуры и рН среды на активность липазы ( $Y_1$ ), липоксигеназы ( $Y_2$ ) и каталазы ( $Y_3$ ), а также технологическими режимами процесса инактивации ферментативной активности пшеничных зародышей.

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов

Условия планирования	Пределы измерения факторов		
	Температура нагрева, °С	Концентрация аскорбиновой кислоты, %	Температура охлаждения, °С
Основной уровень	52	8	10
Верхний уровень	56	11	13
Нижний уровень	48	5	7
Верхняя «звездная точка»	59	13	15
Нижняя «звездная точка»	45	3	5

### Решение задачи

Для исследования было применено ортогональное композиционное планирование и был выбран полный факторный эксперимент ПФЭ<sup>3</sup> [4]  $z = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ . Порядок опытов рандомизировали посредством таблицы случайных

чисел, что исключало влияние неконтролируемых параметров на результаты эксперимента.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии (2), (3), (4), адекватно описывающие процесс стабилизации пшеничных зародышей под влиянием исследуемых факторов:

$$y_1 = 3,968 - 0,694x_1 - 0,337x_2 + 0,338x_3 + 0,188x_1x_2 + 0,102x_1x_3 - 0,082x_2x_3 + 0,067x_1^2 \quad (2)$$

$$y_2 = 4,187 - 0,532x_1 - 0,234x_2 + 0,196x_3 + 0,157x_1x_3 \quad (3)$$

$$y_3 = 3,409 - 0,553x_1 - 0,280x_2 + 0,209x_3 \quad (4)$$

Анализ полученных уравнений (2)–(4), характеризующих активность липазы, липоксигеназы и каталазы от температуры нагретого и охлажденного продукта, а также от концентрации аскорбиновой кислоты, позволяет сделать вывод о значимости факторов для изучаемого процесса. На активность ферментов наибольшее влияние оказывает температура нагрева, при этом значение коэффициентов перед  $x_2$  и  $x_3$  меньше, но их величина говорит о существенном воздействии температуры охлаждения и концентрации ингибитора на процесс.

Задача оптимизации была определена таким образом: активность липазы, липоксигеназы и каталазы пшеничных зародышей должна стремиться к минимально возможному значению, для чего должны быть определены значения температуры нагретого продукта, концентрации аскорбиновой кислоты в качестве антиокислителя и температуры охлажденных зародышей. Модель постановки задачи оптимизации в математической форме (5) выглядит следующим образом:

$$q = q(y_1, y_2, y_3) \xrightarrow{x \in D} opt$$

$$D: \begin{matrix} y_1(x_1, x_2, x_3) & \longrightarrow & min \\ y_2(x_1, x_2, x_3) & \longrightarrow & min \\ y_3(x_1, x_2, x_3) & \longrightarrow & min \end{matrix} \quad (5)$$

$$y_i \geq 0, i = \overline{1,3}; x_j \leq [-2; 2], j = \overline{1,5}$$

Обобщенный критерий оптимизации представим в виде свертки критериев

$$q(x) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \frac{(q_i(\bar{x}) - q_{i \min})^2}{q_{i \min}^2} \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – вес  $i$ -го критерия ( $0 \leq \alpha \leq 1, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ );

$q_{i \min}$  – минимальное значение критериев  $q_i(\bar{X})$ .

Будем считать, что степени важности всех критериев равны, тогда  $\alpha_i = \alpha = \frac{1}{3}$ .

В результате проведенных вычислений путем решения данного уравнения и вычисления частных производных по каждому фактору определили, что оптимальное значение обобщенный критерий принимает при входных параметрах в заданной области в точке (1,032, 0,502, -1,785). Натуральные значения факторов, соответственно, температура нагретых пшеничных зародышей 57 °С, концентрация аскорбиновой кислоты 9,5 %, значение температуры охлажденного продукта 4 °С.

В табл. 2 сведены выбранные интервалы изменения оптимальных значений параметров  $x_i$  для всех исследуемых выходных факторов.

Таблица 2  
Интервалы оптимальных значений параметров

y	$x_1, ^\circ\text{C}$		$x_2, \%$		$x_3, ^\circ\text{C}$	
	min	max	min	max	min	max
y	56	58	9	10	3	5

Полученные на основе математического планирования эксперимента и решенной задачи оптимизации оптимальные значения влияющих факторов позволили разработать способ стабилизации качества пшеничных зародышей (рис. 2), основанной на инактивации их ферментов [5]. Данная технология включает следующие этапы:

- 1) предварительную очистку от металломагнитных примесей;
- 2) нагрев зародышей пшеницы до температуры 56–58 °С, что приведет к значительному снижению значения ферментативной активности;
- 3) смешивание пшеничных зародышей с аскорбиновой кислотой, взятой в качестве ингибитора в количестве 9–10 % от массы продукта;
- 4) охлаждение полученной смеси до температуры 3–5 °С для снижения значения активности ферментов до минимально возможного значения и доведения до температуры, рациональной для хранения продукта.

Для подготовки воздуха для нагрева пшеничных зародышей и охлаждения смеси с аскорбиновой кислотой используют энергоэффективную вихревую трубу [6]. Сжатый нагнетателем 9 всасываемый воздух тангенциально подается в вихревую трубу. При

вращении закрученного потока и перемещении его в направлении диафрагмы и сопла наблюдается расслоение температурных потоков. Осевые слои с температурой до (-7) - (-5) °С истекают через сопло, а периферийные с нагревом до 70–75 °С выводятся через своеобразный дроссель в виде кольцевого зазора между управляющим конусом и стенкой трубы. Изменяя этот зазор можно управлять температурой потоков, следствием чего является изменение давления и расхода каждого из потоков. Отработанный воздух сбрасывается в атмосферу.

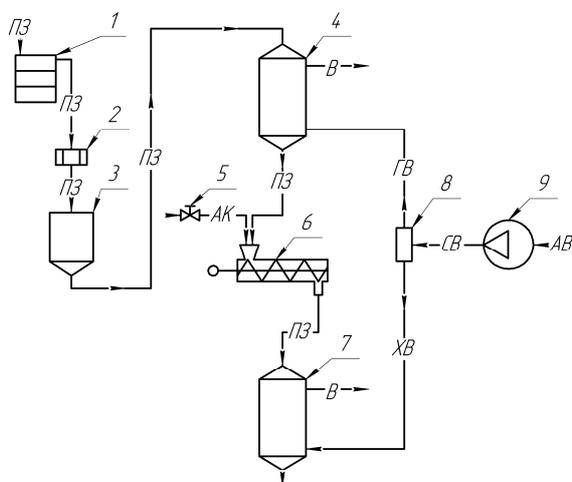


Рис. 2. Технологическая линия инактивации ферментативной активности пшеничных зародышей: 1 – рассев 4 размольной системы, 2 – магнитная защита, 3 – оперативный бункер, 4 – камера нагрева, 5 – клапан подачи ингибитора, 6 – смеситель, 7 – камера охлаждения, 8 – вихревая труба, 9 – компрессор.  
ПЗ – пшеничные зародыши, В – воздух, АВ – атмосферный воздух, СВ – сжатый воздух, ГВ – горячий воздух, ХВ – холодный воздух, АК – аскорбиновая кислота

### Выводы

Для обеспечения нагрева и охлаждения продукта до требуемых значений необходимо определить параметры вихревой трубы. Входными факторами при этом являются температуры горячего и холодного потоков, вырабаты-

ваемых устройством, температура окружающей среды, производительность линии.

Любая методика вихревых энергоразделителей сводится к расчету определяющего размера – диаметра трубы и требуемого значения давления на входе [7, 8]. В зависимости от выбранного типа вихревой трубы, к другим важным параметрам могут относиться относительная длина камеры энергоразделения и угол конусности камеры.

### Литература

1. Капраников В.С. Липаза зародышей семян пшеницы: препаративное получение, свойства, регуляция активности: дис. ... канд. биол. наук. Воронеж, 2003. 185 с.
2. Зяблова Т.В. Разработка и научное обоснование рационального режима хранения пшеничных зародышей: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2000. 138 с.
3. Бондаренко О.А. Разработка и научное обоснование технологии стабилизации пшеничных зародышей: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 199 с.
4. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 105 с.
5. Разработка способа инактивации ферментативной активности пшеничных зародышей / О.А. Орловцева, Н.Л. Клейменова, В.В. Портнов, С.В. Ершов // Успехи современной науки. 2016. Т. 4. № 11. С. 133-137.
6. Тарасенко Ф.Н. Энергоэффективная вихревая труба Ранка на основе новой физической модели вихревого процесса. Адрес доступа: <http://docplayer.ru/34213917-Energoeffektivnaya-vihrevaya-truba-ranka-na-osnove-novoy-fizicheskoy-modeli-vihrevogo-processa.html>.
7. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Т. 1. Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование. Адрес доступа: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1916797#3](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1916797#3).
8. Пиралишвили Ш.А. Вихревой эффект. Т. 2. Технические приложения. Адрес доступа: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1921248#9](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1921248#9).
9. Kumar A., Vivekanand, Subudhi S. Cooling and dehumidification using vortex tube // Applied Thermal Engineering. 2017. Т. 122. С. 181-193.
10. The experimental investigation and thermodynamic analysis of vortex tube / M. Kaya, A. Celik, M. Yilmaz, S. Karagoz // Heat and Mass Transfer. 2017. Т. 53. № 2. С. 395-405.
11. Numerical investigation on flow behavior and energy separation in a micro-scale vortex tube / N. Rahbar, M. Taherian, M. Shateri, M.S. Valipour // Thermal Science. 2015. Т. 9. № 2. С. 619-630.

Поступила 04.05.2018; принята к публикации 20.07.2018

### Информация об авторах

- Орловцева Ольга Александровна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: Starosta1981@inbox.ru  
**Портнов Владимир Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: g\_beard@mail.ru  
**Назина Людмила Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: nazina\_lyudmila@mail.ru  
**Клейменова Наталья Леонидовна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: klesha78@list.ru

## DETERMINATION OF THE OPTIMUM PARAMETERS OF THE HEAT-TRANSFER AGENT IN THE TECHNOLOGY OF QUALITY MANAGEMENT OF WHEAT GERMS

O.A. Orlovitseva<sup>2</sup>, V.V. Portnov<sup>1</sup>, L.I. Nazina<sup>2</sup>, N.L. Kleimenova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University

<sup>2</sup>Voronezh State University of Engineering Technologies

**Abstract:** the work is devoted to the determination of the optimum heat-transfer agent regimes for stabilizing the quality of wheat germs during storage. The choice of the investigated product is due to the valuable biochemical composition and the variety of its application. The source of the hot and cold flows is a vortex tube, the work of which is based on the Rank-Hilsch effect. To determine the parameters of wheat germs, which will ensure the invariability of the quality of the product during storage, orthogonal compositional planning was used. As a result of the processing of experimental data, regression equations were obtained adequately describing the process of stabilization of wheat germs under the influence of heating, inhibitor introduction, and cooling. As a result of the solution of the optimization problem, the values of the optimal regimes of the investigated factors were obtained: the temperature of the heated wheat germs was 57 °C, the concentration of ascorbic acid was 9.5%, and the temperature of the cooled product was 4 °C. Based on the received data, the values of the hot and cold flows were established necessary for controlling the quality of the product. The methods for calculating the parameters of the vortex tube were analyzed

**Key words:** vortex tube, heat-transfer agent, planning, optimization, wheat germs, quality management

### References

1. Kapranchikov V.S. "Lipaza of wheat seeds: preparative preparation, properties, regulation of activity. Cand. biol. sci. diss." ("Lipaza zarodyshey semyan pshenitsy: preparativnoe poluchenie, svoystva, regulyatsiya aktivnosti: dis. kand. biol. nauk"), Voronezh, 2003, 185 p.
2. Zyablova T.V. "Development and scientific substantiation of rational storage regime for wheat germs: Cand. tech. sci. diss." ("Razrabotka i nauchnoe obosnovanie ratsional'nogo rezhima khraneniya pshenichnykh zarodyshey: dis. kand. tekhn. nauk"), Voronezh, 2000, 138 p.
3. Bondarenko O.A. "Development and scientific substantiation of stabilization technology of wheat germs: Cand. tech. sci. diss." ("Razrabotka i nauchnoe obosnovaniye tekhnologii stabilizatsii pshenichnykh zarodyshey: dis. kand. tekhn. nauk"), Voronezh, 2006, 199 p.
4. Rebrova I.A. "Planning of the experiment: manual" ("Planirovanie eksperimenta: ucheb. posobie"), Omsk, SibADI, 2010, 105 p.
5. Orlovitseva O.A., Kleimenova N.L., Portnov V.V., Ershov S.V. "Development of the method for inactivating the enzymatic activity of wheat germs", *Advances in Modern Science (Uspekhi sovremennoy nauki)*, 2016, vol. 4, no. 11, pp. 133-137.
6. Tarasenko F.N. "Energy-efficient vortex Rank tube based on the new physical model of the vortex process", available at: <http://docplayer.ru/34213917-Energoeffektivnaya-vihrevaya-truba-ranka-na-osnove-novoy-fizicheskoy-modeli-vihrevogoy-processa.html>.
7. Piralishvili Sh.A. "The vortex effect. Volume 1. Physical phenomenon, experiment, theoretical modeling", available at: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1916797#3](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1916797#3).
8. Piralishvili Sh.A. "The vortex effect. Volume 2. Technical applications", available at: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_1921248#9](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1921248#9).
9. Kumar A., Vivekanand, Subudhi S. "Cooling and dehumidification using vortex tube", *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 122, pp. 181-193.
10. Kaya M., Celik A., Yilmaz M., Karagoz S. "The experimental investigation and thermodynamic analysis of vortex tube", *Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 395-405.
11. Rahbar N., Taherian M., Shateri M., Valipour M.S. "Numerical investigation on flow behavior and energy separation in a micro-scale vortex tube", *Thermal Science*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 619-630.

Submitted 04.05.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Ol'ga A. Orlovitseva**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 prospekt Revolyutsii, Voronezh, 394036, Russia), e-mail: Starosta1981@inbox.ru  
**Vladimir V. Portnov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospect, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: g\_beard@mail.ru  
**Ludmila I. Nazina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolution Avenu, Voronezh, 394036, Russia), e-mail: nazina\_lyudmila@mail.ru  
**Natalia L. Kleimenova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolution Avenu, Voronezh, 394036, Russia), e-mail: klesha78@list.ru

## Радиотехника и связь

УДК 621.396

### СИСТЕМА АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ OFDM-ТИПА НА БАЗЕ КОДА LDPC С ПЕРЕМЕЖЕНИЕМ В ТУРБУЛЕНТНОМ КАНАЛЕ

Р.П. Краснов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведена модель системы атмосферной оптической связи, в которой входные данные кодируются LDPC-кодером с перемежением и преобразуются в выходной цифровой поток. В качестве метода модуляции предложено использовать OFDM. В приемном устройстве для оптоэлектрического преобразования использован массив фотоприемников, сигналы на выходе которого объединяются по методу максимального правдоподобия, последовательно проходя далее через операции обратного преобразования частоты, OFDM-демодуляции, LDPC-декодирования и перемежения. Для указанной модели получены зависимости величины битовой ошибки от отношения сигнал-шум в системе атмосферной оптической связи с OFDM-модуляцией на 64 поднесущих в случае малой и сильной турбулентности в канале связи, а также зависимости средней длительности замираний от величины порогового тока. Показано, что при наличии резервного радиоканала на его базе возможна организация обратной связи. Приведен метод определения размеров блока перемежения на основе расчета средней длительности замираний в канале

**Ключевые слова:** атмосферные оптические линии связи (АОЛС), лазер, код LDPC, модуляция OFDM

#### Введение

Атмосферные оптические линии связи (АОЛС) предоставляют широкополосный нелицензируемый канал для связи типа «точка-точка», «точка-многоточка» или mesh-топологии. Для городских сетей такая технология позволяет преодолевать проблему «последней мили», которая является узким местом между пользователем и высокоскоростной оптоволоконной сетью. Связь по открытому оптическому каналу дает большой выигрыш в скорости по сравнению с существующими технологиями радиосвязи [1].

Основным препятствием повсеместному внедрению АОЛС является их сильная чувствительность к атмосферным условиям в канале.

В общем, атмосферные воздействия можно подразделить на поглощение, рассеивание и отклонение пучка. Атмосферное поглощение можно свести до малых значений выбором длины волны оптического сигнала, попадающей в одно из окон прозрачности. В то же время атмосферное рассеяние, будучи весьма слабым в прозрачной атмосфере, значительно увеличивается при наступлении неблагоприятных метеоусловий (туман, сильный дождь, снего-

пад) и может приводить к росту ослабления оптического сигнала до 270 дБ/км [1].

Наиболее типичным будет воздействие атмосферной турбулентности, обусловленной хаотическими перепадами температуры, что приводит к локальным измерениям коэффициента передачи атмосферного канала. Эти изменения являются причинами флуктуаций амплитуды и фазы сигнала [2]. В результате искажается фазовый фронт, появляются «блуждания» пучка и перераспределение мощности по поперечному сечению (сцинтилляция).

Апертурное усреднение как основной метод борьбы со сцинтилляцией приводит к увеличению уровня шума в условиях сильных искажений из-за турбулентности. В этом случае предпочтительнее использование техники разнесенного приема.

Показано [3], что использование полупроводниковых лазеров на длинах волн волноводных окон прозрачности для частотного разнесения не дает эффективного результата. Поэтому целесообразным представляется совокупное использование полупроводникового и компактного CO<sub>2</sub>-лазерного излучателя дискового типа.

Снижение влияния атмосферного канала в АОЛС достигается соответствующим выбором методов кодирования, модуляции и разнесения.

### Модель приемопередающей системы

Замирания, связанные с ослаблением оптического излучения, компенсируются обычно за счет организации сравнительно низкоскоростного резервного радиоканала. Влияние атмосферной турбулентности может быть снижено использованием кода с малой плотностью единиц (low density parity check, LDPC) [4].

Поскольку цифровые потоки, модулированные сравнительно узкополосными поднесущими, подвергаются меньшим искажениям, чем более быстрые, а следовательно, более широкополосные, целесообразным представляется использование мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM). Этот метод модуляции заключается в преобразовании высокоскоростного потока в набор низкоскоростных, каждый из которых модулируется одной из ортогональных поднесущих и мультиплексируется в общий сигнал быстрым преобразованием Фурье.

Обычно при расчетах, связанных с влиянием канала в АОЛС, игнорируют наличие временной корреляции, что обусловлено как сравнительно высокими скоростями, так и сложностью применения многомерных законов распределения. Поэтому на практике часто прибегают к анализу статистики результатов измерений. В то же время, по аналогии с радиоканалом, существенно снизить влияние временной корреляции можно, используя перемежение. Последнее может быть представлено как преобразование кодовых символов потока LDPC длиной  $K$  в массив размерности  $K \times N$ , где  $N$  – длина символа получаемого кода. Массив заполняется строка за строкой, а передается столбец за столбцом. Пакетные ошибки канала длиной  $K$  тогда искажат в каждом кодовом слове не более одного бита и смогут быть эффективно исправлены на приемной стороне.

Модель передающей части АОЛС, построенная исходя из вышеперечисленных соображений, представлена на рис. 1.

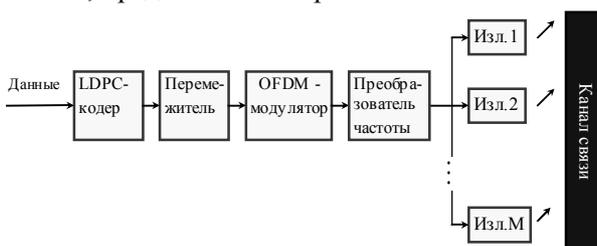


Рис. 1. Модель оптического передатчика

Входные данные кодируются LDPC-кодером с перемежением и преобразуются в поток OFDM-модулятором, включающим блоки цифровой модуляции, обратного быстрого преобразования Фурье, преобразования параллельного кода в последовательный и цифроаналогового преобразования. Получаемый сигнал поступает на преобразователь частоты и далее к излучателям.

Выходные сигналы формируют, используя технику пространственно-частотного разнесения. Для этого используется массив из  $M$  излучателей, основанных на лазерных диодах и  $CO_2$  лазере.

Модель приемника АОЛС представлена на рис. 2. В атмосферном канале оптический сигнал подвергается воздействию турбулентной среды и поступает на массив фотоприемных модулей, где происходит оптоэлектрическое преобразование. Сигналы фотодетекторов объединяются по одному из методов сложения (в дальнейшем анализе будем использовать метод максимального правдоподобия, maximum likelihood estimation, MLE). Далее последовательно выполняются процедуры обратного преобразования частоты, OFDM – демодуляции, деперемежения и декодирования LDPC – потока.

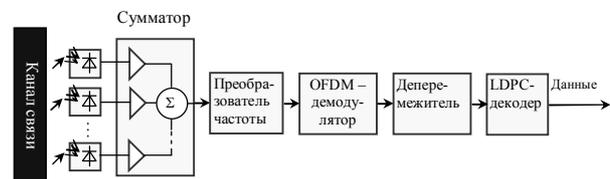


Рис. 2. Модель оптического приемника

### Статистическая модель приема

Информационный сигнал, представленный в виде LDPC-кода, демультиплексируется и разбивается на группы по  $B$  бит, каждая из которых также разбивается на  $K$  подгрупп, причем в  $i$ -й подгруппе содержится  $b_i$  бит так, что  $B = \sum_{i=1}^K b_i$ . Получаемый от  $K$  подканалов ком-

плексный сигнал преобразуется быстрым обратным преобразованием Фурье в сигнал OFDM на нескольких поднесущих. Таким образом, длина символа (интервал между двумя последовательно сформированными символами OFDM) будет равна  $T = KT_s$ , где  $T_s$  – длина символа на одной поднесущей.

Следуя [5], представим комплексную огибающую сигнала OFDM как

$$s_{OFDM}(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} w(t-kT) \sum_{i=-N_{FFT}/2}^{N_{FFT}/2-1} X_{ik} \times \exp \left[ 2\pi j \frac{i}{T_{FFT}}(t-kT) + 2\pi j f_{PЧ} t \right] \right\} \quad (1)$$

$t$  определяется для интервала  $kT - T_{ок} \leq t \leq kT + T_{FFT} + T_{ок}$ .

Здесь  $X_{ik}$  определяет  $k$ -й символ OFDM на  $i$ -й поднесущей,  $w(t)$  – оконная функция,  $f_{PЧ}$  – частота несущей радиодиапазона,  $T_{FFT}$  – период быстрого преобразования Фурье,  $T_{ок}$  – интервал действия оконной функции,  $N_{FFT}$  – число отсчетов для преобразования Фурье.

Использование оконной функции позволяет эффективно подавлять внеполосные спектральные компоненты.

Далее сформированный поток символов OFDM поступает в атмосферный канал связи.

Рассмотрим его влияние на оптический сигнал. Ослабление сигнала атмосферным каналом описывается законом Бира-Ламберта

$$I_R / I_0 = \exp(-\gamma L), \quad (2)$$

где  $I_R$ ,  $I_0$  – интенсивности оптического сигнала на выходе оптического приемника и передатчика соответственно,  $L$  – длина оптической трассы;  $\gamma$  – коэффициент затухания. В случае преобладания Ми-рассеяния он определяется следующим образом [2, 6]:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda_0}{550} \right)^{-q_V}. \quad (3)$$

Здесь  $V$  – метеорологическая дальность видимости,  $\lambda_0$  – длина волны излучения в нанометрах,  $q_V$  – параметр, определяемый из текущих метеоусловий, например, из [2].

Воздушные течения, возникающие из-за температурных перепадов и действия ветра, приводят к возникновению областей турбулентной среды со случайными значениями коэффициента преломления, что, в свою очередь, приводит к искажению фазового фронта проходящего через них оптического пучка. Вторичные волны, образованные таким фазовым фронтом, имеют случайные фазы и в силу интерференции также неодинаковые амплитуды. Следовательно, в турбулентной среде интенсивность принимаемого оптического сигнала описывается случайной величиной. Влияние турбулентности на оптические сигналы, согласно текущим представлениям, описывается в случае слабой турбулентности лог-нормальным, а в случае умеренной и сильной –

гамма-гамма распределением плотности вероятности [2].

Вид турбулентности (слабая, умеренная, сильная) определяется дисперсией  $\sigma_p^2 = 1,23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ , где  $C_n^2$  – структурная константа показателя преломления. При этом слабой, умеренной и сильной турбулентности будут соответствовать значения  $\sigma_p^2 < 1$ ,  $\sigma_p^2 \approx 1$  и  $\sigma_p^2 \gg 1$  соответственно.

В дальнейшем анализе будем рассматривать наихудшие условия приема, поэтому для описания флуктуаций интенсивности принимаемого сигнала применим гамма-гамма распределение [2, 6].

$$p(I_R) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_R^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left( 2\sqrt{\alpha\beta} I_R \right), \quad (4)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – эффективные размеры крупно- и мелкомасштабных областей в турбулентной среде соответственно, для плоской волны [6]:

$$\alpha = \left( \exp \left[ \frac{0,49\sigma_p^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right)^{-1},$$

$$\beta = \left( \exp \left[ \frac{0,51\sigma_p^2(1+0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1+0,9d^2+0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (5)$$

$K_\alpha(x)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода порядка  $\alpha$ .

Дисперсия флуктуаций (индекс сцинтилляции)  $\sigma_I^2$  дается выражением [7]:

$$\sigma_I^2 = \frac{m[I_R^2]}{m^2[I_R]-1}, \quad (6)$$

где  $m$  – оператор математического ожидания. При апертурном усреднении при использовании входной линзы диаметром  $D$  в приближении плоской волны индекс сцинтилляции [6]:

$$\sigma_I^2(D) = \exp \left[ \frac{0,49\sigma_p^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_p^{12/5})^{7/6}} + \frac{0,51\sigma_p^2(1+0,69\sigma_p^{12/5})^{-5/6}}{1+0,9d^2+0,62d^2\sigma_p^{12/5}} \right] - 1, \quad (7)$$

где  $d = \sqrt{\frac{kD^2}{4L}}$ .

Принимаемый от  $M$  фотодетекторов сигнал по-прежнему описывается гамма-гамма распределением, в котором параметры  $\alpha$  и  $\beta$  требуется заменить параметрами  $\alpha_M$  и  $\beta_M$ , равными [6]:

$$\alpha_M = \frac{1+M\beta}{M\beta\sigma_I^2-1}, \beta_M = M\beta. \quad (8)$$

Выходной ток фотодиода может быть описан таким образом, как [7]

$$\begin{aligned}
 i(t) &= K_{\phi Д} |h(t)s_{OFDM}(t) + h(t)b|^2 = \\
 &= K_{\phi Д} \left[ |h^2(t)s_{OFDM}^2(t)|^2 + |h(t)b|^2 + \right. \\
 &\quad \left. + 2 \operatorname{Re}(h(t)s_{OFDM}(t)h^*(t)b) \right]
 \end{aligned} \tag{9}$$

где  $|h(t)|^2$  - флуктуации интенсивности оптического сигнала, вызванные атмосферной турбулентностью,  $K_{\phi Д}$  - чувствительность фотодиода,  $()^*$  - операция комплексного сопряжения.

После понижения частоты и фильтрации сигнал представляется в виде

$$r(t) = [i(t)k_{pq} \cos(\omega_{pq}t)] \otimes h_{pq}(\tau) + n(t), \tag{10}$$

где  $h_{pq}(t)$  - импульсная характеристика ФНЧ,  $n(t)$  - собственный шум приемника, обычно описываемый как гауссовский процесс,  $k_{pq}$  - коэффициент пропорциональности при понижении частоты,  $\otimes$  - знак операции свертки.

### Результаты моделирования для различных методов модуляции поднесущих

Ниже на рис. 3 представлены зависимости величины битовой ошибки от отношения сигнал-шум для системы атмосферной связи с OFDM-модуляцией на 64 поднесущих для условий слабой (а) и сильной (б) турбулентности с дисперсиями  $\sigma_p^2$  равными 0,25 и 9 соответственно при длине оптической трассы 500 м.

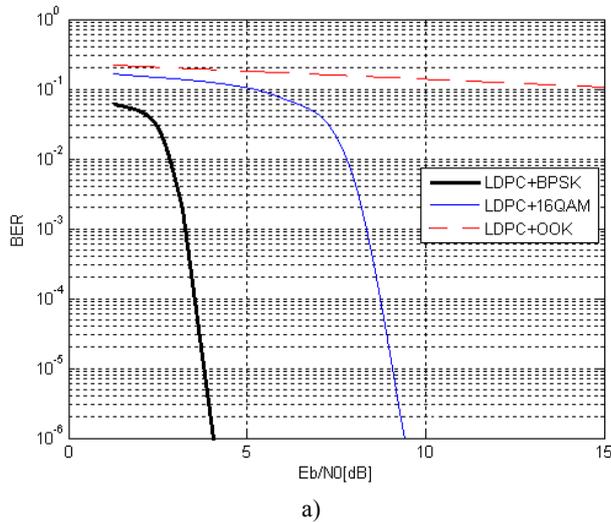


Рис. 3. Зависимости BER от отношения сигнал/шум для различных видов кодирования

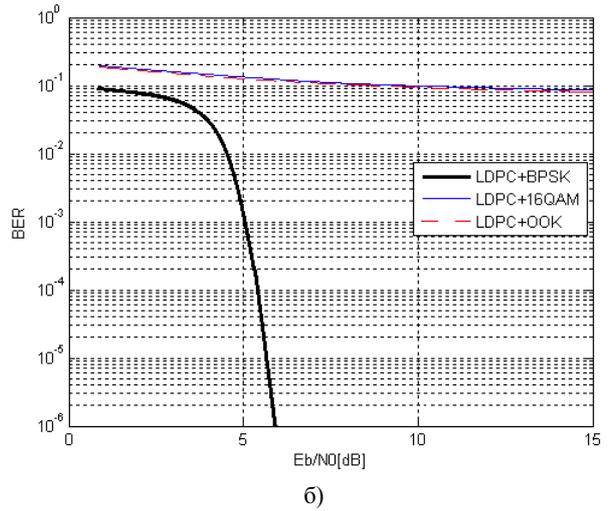


Рис. 3. Зависимости BER от отношения сигнал/шум для различных видов кодирования (продолжение)

Очевидно, что применение фазовой манипуляции дает наибольший выигрыш в отношении сигнал-шум при любой турбулентности.

Зададимся порогом  $I_{tr}$  интенсивности принимаемого сигнала, определяемым чувствительностью приемника. Качество связи будем оценивать вероятностью замираний. При возникновении замираний связь прерывается, поскольку интенсивность принимаемого оптического сигнала падает ниже  $I_{tr}$ .

Пороговый уровень для приемника с чувствительностью  $P_s$  [5]:

$$I_{tr} = \frac{2P_s}{\pi w^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{D}{2w^2}\right) \right]^{-1}, \tag{11}$$

где  $D$  - диаметр приемной апертуры,  $w$  - диаметр гауссовского пучка в точке приема.

Количество переходов (как положительных, так и отрицательных) через пороговый уровень дает ожидаемое число замираний в единицу времени  $\langle n(I_{tr}) \rangle$ , подчиняющееся гамма-гамма распределению [2].

Теперь, располагая указанными вероятностями, определим время, в течение которого в среднем принимается оптическое излучение оказывается ниже порогового уровня

$$\langle t(I_{tr}) \rangle = \frac{P(I \leq I_{tr})}{\langle n(I_{tr}) \rangle}. \tag{12}$$

Очевидно,  $\langle t(I_{tr}) \rangle$  определяет среднюю длительность замираний

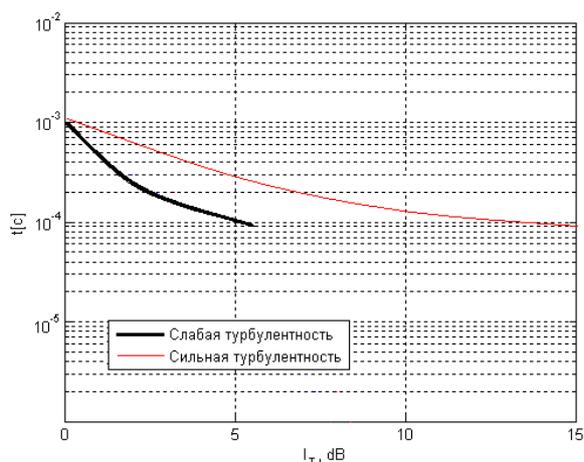


Рис. 4. Зависимости средней длительности замираний от величины порогового тока

На рис. 4 представлены зависимости средней длительности замираний  $t$  от величины порогового тока  $I_T$  для вышеописанной системы связи. Следует учитывать, что длительность замираний определяется не только влиянием атмосферной турбулентности, но и собственными шумами оптического приемника. При наличии резервного радиоканала на его базе возможна организация петли обратной связи, что даст возможность реализации адаптивных методов кодирования и приема.

## Заключение

Использование комбинации специальных методов кодирования, перемежения и мультиплексирования с ортогональным частотным разделением позволяет снизить влияние турбулентного канала на качество передачи в атмосферных оптических системах связи.

## Литература

1. Willebrand H., Ghuman B.S. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks. Indianapolis, USA: Sams Publishing, 2002, 288 p.
2. Andrews L.C., Philips R.L. Laser Beam Propagation Through Random Media, 2<sup>nd</sup> ed. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005, 820 p.
3. Kim I.I., Bruce McArthur, Eric Korevaar. Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications // Proc. of SPIE – vol. 4214, Optical Wireless Communications III. Ed. Eric J. Korevaar, February 2001, pp. 26-37.
4. Jiley Hou, Paul H. Siegel, Laurenzce B. Milstein, Henry D. Pfister Multilevel Coding With Low-Density Parity-Check Components Codes, IEEE, 2001.
5. William Shieh, Ivan Djordjevic OFDM for optical communications. – Elsevier/Academic Press, 2009, 440 p.
6. Arun R. Majumadar, Jennifer C. Ricklin Optical and fiber communication reports. Free-Space Laser Communication. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 417 p.
7. Ivan B. Djordjevic, Bane Vasic, Mark A. Neifeld LDPC coded OFDM over atmospheric turbulence channel // Optics Express, vol. 15, No 10, pp. 6332-6345, May 2007.

Поступила 19.04.2018; принята к публикации 20.07.2018

## Информация об авторах

**Краснов Роман Петрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: rpkrasnov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-4557>

## OFDM FREE SPACE OPTICAL SYSTEM BASED ON LDPC CODE WITH INTERLEAVING IN TURBULENT ATMOSPHERIC CHANNEL

**R.P. Krasnov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** a model of an atmospheric optical communication system is presented in which the input data is encoded by an interlaced LDPC encoder and converted to an output digital stream. It is proposed to use OFDM As a modulation method. In the receiver for optoelectrical transformation, an array of photodetectors is used, the signals at the output of which are combined according to the maximum likelihood method, successively passing through the operations of inverse frequency conversion, OFDM demodulation, LDPC decoding and deinterleaving. For this model, the dependence of the bit error value on the signal-to-noise ratio in the atmospheric optical communication system with OFDM modulation on 64 subcarriers in the case of small and strong turbulence in the communication channel was obtained, as well as the dependence of the average fading duration on the threshold current value. It is shown that if there is a backup radio channel, it is possible to organize a feedback. The method for determining the size of an interleaving block based on the calculation of the average fading time in a channel is given

**Key words:** FSO, laser, LDPC code, OFDM modulation

### References

1. Willebrand H., Ghuman B.S. "Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks", Indianapolis, USA, Sams Publishing, 2002, 288 p.
2. Andrews L.C., Philips R.L. "Laser beam propagation through random media, 2<sup>nd</sup> ed", Bellingham, Washington, SPIE Press, 2005, 820 p.
3. Kim I.I., McArthur B., Korevaar E. "Comparision of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications", *Proc. of SPIE – vol. 4214, Optical Wireless Communications III*, 2001, pp. 26-37.
4. Hou J., Siegel P. H., Milstein L. B., Pfister H. D. "Multilevel coding with low-density parity-check components codes", *IEEE*, 2001.
5. Shieh W., Djordjevic I. "OFDM for optical communications", Elsevier/Academic Press, 2009, 440 p.
6. Majumadar A. R., Ricklin J. C. "Optical and fiber communication reports. Free-Space Laser Communication", New York, Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 417 p.
7. Djordjevic I. B., Vasic B., Neifeld M. A. "LDPC coded OFDM over atmospheric turbulence channel", *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 10, pp. 6332-6345.

Submitted 19.04.2018; revised 20.07.2018

### Information about the author

**Roman P. Krasnov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: rpkrasnov@gmail.com

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НЕЭКВИДИСТАНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

И.А. Кирпичева, А.В. Останков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** разработка антенных решеток с заданными или специальными характеристиками направленности требует использования алгоритмов параметрического синтеза. Несмотря на критику, отдельные разновидности эволюционных алгоритмов (в частности, генетические алгоритмы) могут успешно применяться для решения задач оптимизации и синтеза антенной техники. Анализ источников показывает, что отечественная практика использования генетических алгоритмов для синтеза антенн является преимущественно эпизодической. Демонстрируется целесообразность и результативность применения генетического алгоритма для синтеза апертуры линейных антенных решеток. Приведены примеры подобного синтеза на основе известной модификации генетического алгоритма. Выполнена оптимизация направленных свойств неэквидистантных разреженных равноамплитудных антенных решеток. Поиск оптимальных межэлементных расстояний по критерию максимума коэффициента направленного действия (в поперечном направлении излучения) приводит к симметричной относительно центра геометрии. Особенность такой решетки заключается в свободной от элементов центральной части, элементы которой смещены к периферии решетки и выстроены там почти периодически с шагом от 0.8 до 0.9 длины волны. Далее излагается постановка задачи синтеза линейной равноамплитудной неэквидистантной антенной решетки. Критерий синтеза заключается в минимизации уровня боковых лепестков диаграммы направленности в режиме поперечного излучения. Приведены основные математические соотношения, описана целевая функция и ограничения, накладываемые на расстояния между элементами решетки. Изложены частные результаты синтеза решеток с разным числом элементов (от 4 до 20) и заданным коэффициентом разреженности 0.5, определяемым отношением периода решетки к длине волны при эквидистантном размещении элементов. Анализ результатов показывает, что выигрыш по уровню боковых лепестков оптимальной решетки по отношению к периодической решетке составляет 6.74 дБ для десяти и 10.5 дБ для двадцати элементов. Результаты могут быть использованы при разработке соответствующих антенных систем, а также для потенциальной оценки направленных свойств равноамплитудных антенных решеток

**Ключевые слова:** неэквидистантная антенная решетка, синтез, генетический алгоритм, уровень боковых лепестков

### Введение

В антенной технике часто возникает задача параметрического синтеза, связанная с отысканием таких значений совокупности конструктивных параметров апертуры или распределительно-излучающей структуры, при реализации которых качественный показатель антенны принимает близкое к оптимальному значение. Поскольку число таких искомых параметров может быть достаточно велико, а диапазон их возможных значений весьма широк, то простой последовательный перебор различных комбинаций значений параметров с целью отыскания предпочтительной совокупности значений является крайне неэффективным, так как требует больших затрат времени. В этой связи одним из возможных численных методов решения оптимизационных задач антенной техники является применение эволюционных алгоритмов [1].

Несмотря на имеющуюся критику эволюционных алгоритмов (см., например, монографию [2]), отдельные их разновидности приобрели широкое распространение. В частности, для

задач, где пространство поиска неограниченно, а целевая функция является многопараметрической и обладает локальными экстремумами, так что точное решение найти не представляется возможным, применяются различные модификации генетических алгоритмов [3]. Так, генетические алгоритмы получили распространение при решении таких задач техники антенн, как синтез геометрии микрополосковой антенны [4], оптимизация расположения элементов фазированной антенной решетки в целях расширения полосы рабочих частот [5], поиск амплитудно-фазового распределения, обеспечивающего специальную форму диаграммы направленности антенной решетки [6] и т.п. Вместе с тем, анализ литературных источников показывает, что отечественная практика применения генетических алгоритмов при решении задач антенной техники не только не носит массовый характер, но и даже является скорее эпизодической.

Цель работы — на примере линейных антенных решеток продемонстрировать целесообразность и результативность применения генетического алгоритма для параметрического синтеза апертуры.

**Методы достижения цели**

Особенностью антенной решётки является не наличие конечного числа элементов, разнесённых друг относительно друга в общем случае на неравные расстояния, а также возможность вариации амплитуд и начальных фаз полей (токов), питающих элементы. В связи с этим достижение оптимальных характеристик излучения решётки возможно за счёт разных подходов — обеспечения неравномерного амплитудно-фазового распределения на раскрыве, неэквидистантной реализации и т.д.

У авторов имеется опыт параметрического синтеза линейных антенных решёток (далее – ЛАР) по разным критериям на основе использования известной модификации генетического алгоритма [7]. Особенностью данной модификации алгоритма является использование при генерации потомков данных о локальном рельефе целевой функции, что увеличивает вероятность приспособленности потомков по сравнению с родительскими особями. Тогда в процессе эволюции количество обращений к целевой функции, а значит, и время поиска глобального экстремума целевой функции уменьшается.

Так, в работе [8] выполнена оптимизация направленных свойств неэквидистантной разреженной ЛАР при равноамплитудном и синфазном возбуждениях по критерию максимума коэффициента направленного действия (КНД). Установлено, что оптимизация расположения элементов ЛАР с исходным значением периода  $\Delta = (1-2)\cdot\lambda$  приводит к увеличению КНД в среднем на 3 дБ при фиксированной длине решетки  $N\cdot\lambda$ , где  $N$  — число элементов, а  $\lambda$  — длина волны. На основе анализа результатов обнаружено, что оптимальная неэквидистантная ЛАР близка по геометрии к симметричной эквидистантной ЛАР с элементами, смещёнными от центра к периферии и разнесёнными друг относительно друга на  $(0.8-0.9)\cdot\lambda$ .

В работе [9] предложена методика синтеза апертуры антенны вытекающей волны, основанная на строгой модели рассеяния поверхностной волны диэлектрического волновода периодической профилированной гребенчатой решёткой. В качестве оптимизационной процедуры использован генетический алгоритм. Методика позволяет отыскать период и форму глубинного профиля решётки, параметры волновода, обеспечивающие максимальную эффективность (или минимальный уровень бокового излучения) антенны за счёт оптимизации амплитудного распределения на раскрыве.

Остановимся подробнее на параметрическом синтезе неэквидистантной равноамплитудной ЛАР с минимальным уровнем бокового излучения [10] и месте генетического алгоритма в таком синтезе.

Рассматривается ЛАР с разными расстояниями между элементами (рисунок), представляющими собой изотропные излучатели. Пусть при числе элементов  $N$  расстояние между  $n$ -м и  $(n+1)$ -м элементами составляет  $\Delta_n$ , так что текущая координата  $n$ -го элемента ЛАР равна  $z_n = \sum_{k=1}^{n-1} \Delta_k, n=1, \overline{N}$ .



Будем полагать, что основной лепесток диаграммы направленности (ДН) ЛАР ориентирован строго по нормали:  $\Theta=0^\circ$ . Тогда расположив элементы ЛАР симметрично относительно её центра, так чтобы расстояния между элементами с  $n = \overline{1/2N+1, N-1}$  и  $(n+1)$  не отличались от расстояний с  $n = \overline{1, 1/2N-1}$  и  $(n+1)$ , искомыми параметрами следует считать расстояния  $\Delta_n = \Delta_{N-n}, n = \overline{1, 1/2N-1}$ .

Комплексная ДН антенной решётки в силу изотропности её элементов определяется множителем линейной решётки:

$$F(\Theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot \exp(-j\psi_n) \cdot \exp[j(2\pi z_n \sin\Theta)/\lambda],$$

где  $\Theta$  — угол наблюдения;

$A_n, \psi_n$  — амплитуды и фазы токов (полей) на  $n$ -м элементе, которые полагаются одинаковыми (случай равномерного амплитудного и фазового распределения).

Пусть решению задачи удовлетворяют расстояния  $\Delta_n$ , обеспечивающие минимальную величину максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) амплитудной ДН.

Наложим ограничение на длину ЛАР  $L = \sum_{n=1}^{N-1} \Delta_n$ , полагая, что она определяется заданным коэффициентом разреженности  $k$ . Последний показывает, во сколько раз период эквидистантной решетки длины, аналогичной неэквидистантной ЛАР, превышает длину волны:  $k = L/[\lambda \cdot (N-1)]$ .

В качестве целевой функции, минимум которой следует достичь в результате оптимизации, взята зависимость максимального УБЛ нормиро-

ванной ДН в дБ от межэлементных расстояний  $\Delta_n$ . При расчётах значений целевой функции для текущей популяции особей определяются координаты элементов  $z_n$ , затем рассчитывается амплитудная ДН, и по ней определяется максимальный УБЛ. Если текущие координаты  $z_n$  выходят за рамки физически реализуемых значений, целевая функция заменяется барьерной экспоненциальной функцией, принимающей тем большие значения, чем дальше "уход"  $z_n$  от области физических значений. Аналогично накладывается ограничение на минимальную величину  $\Delta_n$  ( $\Delta_n \geq \Delta_{\min}$ ), обусловленное конструктивными ограничениями. При численной реализации используется модифицированный генетический алгоритм [7] с числом популяций от 150 до 250.

### Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены минимальные значения максимального УБЛ равноамплитудной неэквидистантной ЛАР для коэффициента разреженности  $\kappa=0.5$  и числа элементов  $N=4,6,\dots,20$ , полученные в результате параметрического синтеза при  $\Delta_{\min} = \frac{1}{4}\lambda$ .

В табл. 2 приведены найденные расстояния  $\Delta_n$  ( $n = \overline{1, \frac{1}{2}N-1}$ ) между элементами ЛАР, при которых максимальный уровень боковых лепестков амплитудной ДН является минимальным для числа элементов в решётке  $N=20$  и коэффициента разреженности решетки  $\kappa=0.5$  ( $L = \frac{1}{2}\lambda \cdot (N-1) = 9.5\lambda$ ).

Анализ результатов показывает, что выигрыш по УБЛ за счет неэквидистантного размещения излучателей с ростом  $N$  увеличивается. Данные, полученные для других значений коэффициента разреженности  $\kappa$ , свидетельствуют о том, что выигрыш оказывается тем больше, чем меньше  $\kappa$ . Например, при  $N=10$  выигрыш составляет 4.72 при  $\kappa=0.7$  и 6.74 дБ при  $\kappa=0.5$ , в то время как при  $N=20$  — 6.58 и 10.5 дБ соответственно. Следует отметить, что зависимость УБЛ от числа элементов ЛАР имеет в общем случае осциллирующий вид.

### Заключение

Описана авторская практика использования эволюционных алгоритмов для оптимизации линейных антенных решёток. На примере равноамплитудной неэквидистантной ЛАР продемонстрирована эффективность применения генетического алгоритма, позволившего отыс-

кать расстояния между элементами с заданными ограничениями конструктивного характера по критерию минимума максимального значения УБЛ ДН решётки.

Таблица 1  
Оптимальные УБЛ неэквидистантной ЛАР для  $\kappa=0.5$

$N$	УБЛ, дБ	$N$	УБЛ, дБ	$N$	УБЛ, дБ
4	-15.49	10	-19.71	16	-22.98
6	-16.91	12	-20.90	18	-23.37
8	-18.39	14	-21.99	20	-23.69

Таблица 2  
Расстояния между элементами ЛАР длиной  $9.5\lambda$  с оптимальным УБЛ при  $N=20$

$n$	$\Delta_n/\lambda$	$n$	$\Delta_n/\lambda$
1	0.78253	6	0.47879
2	0.71164	7	0.32354
3	0.58631	8	0.45180
4	0.47191	9	0.27120
5	0.42359	10	0.49738

### Литература

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 452 с.
2. Skiena S.S. The Algorithm design manual. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. 752 p.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.
4. Слюсар В. Синтез антенн на основе генетических алгоритмов // Первая миля. 2009. Ч. 2. Т. 10. № 1. С. 22-25.
5. Расширение полосы рабочих частот многофункциональных фазированных антенных решёток / А.Ю. Гринёв и др. // Радиолокация и радиосвязь: материалы 4-й Всерос. конф. ИРЭ РАН, 2010. С. 631-635.
6. Аверина Л.И., Лещинский А.А., Балашов Ю.С. Синтез кольцевых антенных решёток на основе эвристических алгоритмов // Теория и техника радиосвязи. 2015. № 4. С. 18-22.
7. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3-4. С. 78-85.
8. Останков А.В., Кирпичева И.А. Оптимизация направленных свойств линейных неэквидистантных антенных решёток // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 4. С. 8-11.
9. Останков А.В. Синтез излучающего гребенчатого раскрыва антенны вытекающей волны // Радиотехника. 2012. № 2. С. 38-44.
10. Останков А.В., Антипов С.А., Сахаров Ю.С. Минимальный уровень бокового излучения равноамплитудной неэквидистантной антенной решетки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.3. С. 10-12.

## Информация об авторах

**Кирпичева Инна Анатольевна** — аспирант факультета радиотехники и электроники, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kirpicheva89@mail.ru

**Останков Александр Витальевич** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: avostankov@mail.ru

## RESULTS OF APPLICATION OF EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR PARAMETRIC SYNTHESIS OF NOT-EQUIDISTANT ANTENNA ARRAYS

I.A. Kirpicheva, A.V. Ostankov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** development of antenna arrays with adjusted or special characteristics of directivity involves algorithms of parametrical synthesis. In spite of critics, individual types of evolution algorithms (in particular, genetic algorithms) can be successfully used for solution tasks of optimization and synthesis of antenna technics. Analysis of sources shows that domestic practice of using genetic algorithms for synthesis of antennas appears mainly occasional. The article shows expediency and potency of using genetic algorithm for synthesis of aperture linear antenna arrays. The authors represent examples of such synthesis which are based on using well-known modification of the genetic algorithm. In particular, optimization of the directional properties of nonequidistant rarefied uniform antenna arrays is performed. The search of the optimal dimensions between elements by criterion of the maximum directivity of antenna (in normal direction of radiation) results in symmetric geometry relative to the center. The feature of such array is the fact that the center part is free of elements. The central elements are appeared displaced at periphery of the array and are located there nearly periodically with the step from 0.8 to 0.9 of wavelength. Further, the article contains the statement of problem of synthesis of a linear uniform nonequidistant antenna array. Criterion of the synthesis is concluded in minimization of side lobe level of antenna pattern in broadside mode. The authors adduce the basic mathematic relations, describe the goal function and constraints imposed on dimensions between elements of the array. The article includes particular results of synthesis of the arrays with various numbers of elements (from 4 to 20) and set point of rarefaction factor. It is equal to the ratio of period the array to wavelength at equidistant arrangement of elements. The analysis of the results showed that scoring by side lobe level of an optimal array with respect to periodic array amount 6.74 dB for 10 elements and 10.5 dB for 20 elements. The results described in the article can be used for design corresponding antenna systems and also for potential estimation of directional properties of uniform antenna arrays

**Key words:** not-equidistant antenna array, synthesis, genetic algorithm, side lobes level

### References

1. Rutkovskaya D., Pilinskiy M., Rutkovskiy L. "Neural networks, genetic algorithms and unsharp systems" ("Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy"), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2008, 452 p.
2. Skiena S.S. "The Algorithm design manual", Springer Publishing Company, Incorporated, 2008, 752 p.
3. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. "Genetic algorithms" ("Geneticheskie algoritmy"), Moscow, FIZMATLIT, 2006, 320 p.
4. Slyusar V. "Antenna synthesis based on genetic algorithms. Part 2", *The first mile (Pervaja milja)*, 2009, vol. 10, no. 1, pp. 22-25.
5. Grinyev A.Yu., Bagno D.V., Sinani A.I., Moseychuk G.F. "Expansion of a strip of working frequencies of the multipurpose phased arrays", *Proc. of the 4th all-Russian conference Radiolocation and a radio communication (Radiolokaciya i radiosvyaz)*, IRE RAS, 2010, pp. 631-635.
6. Averina L.I., Leshchinskiy A.A., Balashov Yu.S. "Ring antenna array synthesis based on heuristic algorithms", *The Theory and engineering of radio communication (Teoriya i tekhnika radiosvyazi)*, 2015, no. 4, pp. 18-22.
7. Sabanin V.R., Smirnov N.I., Repin A.I. "Modified genetic algorithm for optimization problems in control", *Exponenta Pro. Mathematics in applications (Matematika v prilozheniyakh)*, 2004, no. 3-4, pp. 78-85
8. Ostankov A.V., Kirpicheva I.A. "Optimization of the directional properties of linear nonequidistant antenna arrays", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 8-11.
9. Ostankov A.V. "Synthesis of comb-like aperture of the antenna leaky wave", *Radio engineering (Radiotekhnika)*, 2012, no. 2, pp. 38-44.
10. Ostankov A.V., Antipov S.A., Sakharov Yu.S. "Minimax level of side radiation of the nonequidistant antenna array with the uniform amplitude distribution", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6-3, pp. 10-12.

Submitted 24.05.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Inna A. Kirpicheva**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kirpicheva89@mail.ru

**Aleksandr V. Ostankov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

**МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ****Н.В. Ципина, С.С. Потапов, И.В. Чепрасов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** при проектировании современных радиоэлектронных устройств возникает необходимость в соблюдении температурного режима для функционирования силовых элементов аппаратуры. Чаще всего задачу можно решить установкой радиатора. Сложность заключается в выборе его размеров, формы и материала, из какого он будет изготовлен. Для того, чтобы определить все эти характеристики, конструкторы прибегают к аналитическим расчетным методам, которые страдают своей точностью и затратами времени на проектировку. В данной статье рассматривается конструкция биметаллического (медь—алюминий) паяного радиатора, эффективно охлаждающего элементы электронного модуля с высокой неравномерностью тепловых потоков. Приведены характеристики радиатора и метод построения начальной (неоптимизированной) модели с учетом требуемых ограничений. С помощью современных средств автоматизированного проектирования было произведено исследование, на основе результатов которого осуществлена дальнейшая оптимизация конструкции. Оптимизация производилась в два этапа. Первый этап состоял в поиске оптимальной геометрии конструкции радиатора, где в роли переменных выступали толщины и высоты ребер и планок. Второй этап заключался в постепенной замене материала элементов с меди на алюминиевый сплав. Описано влияние изменения того или иного параметра конструкции. Приведены графики и таблицы результатов, на основе которых можно сделать выводы о значимости конкретного параметра на распределение тепловых потоков. Описаны все сложности, с которыми авторы столкнулись в ходе оптимизации конструкции радиатора в среде моделирования, и способы их решения. Основными задачами, решаемыми с помощью разработанного алгоритма оптимизации, являются повышение точности, снижение трудоемкости и продолжительности поиска оптимальной конструкции, исключение влияния «человеческого» фактора

**Ключевые слова:** биметаллический радиатор, термическое исследование, оптимизация, система охлаждения Solidworks Simulation

**Введение**

В процессе проектирования радиоэлектронной аппаратуры возникает необходимость в обеспечении требуемого температурного режима [1-2]. Для функционирования мощных электронных компонентов малых размеров используются различные охлаждающие устройства. Чаще всего это медные либо алюминиевые радиаторы, минимизация массы которых актуальна для проектировки устройства задача.

В современных электронных устройствах контактная площадь используемых элементов составляет порядка  $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , а выделяемая мощность достигает до 300 Вт. Площадь корпуса силового элемента часто значительно превосходит контактную площадь элемента. В этом случае при большом значении коэффициента теплоотдачи оребренной поверхности локальным источником теплоты создается неравномерность температурного поля основания радиатора.

Плотности теплового потока в зоне расположения локального источника теплоты и в об-

ластях, удаленных от источника, существенно различаются. Поэтому в области, близкой к источнику теплоты, используют высокотеплопроводные материалы. На краях основания радиатора можно применить материал (сплав алюминия), имеющий меньшую плотность и теплопроводность по сравнению с медными сплавами. Таким образом можно существенно уменьшить массу радиатора и, соответственно, его стоимость.

Такое техническое решение можно реализовать, используя технологию создания паяных радиаторов, разработанную в БНТ „Прибой“ (г. Санкт-Петербург). Такие радиаторы состоят из спаянных между собой ребер и планок. Основание радиатора образуют планки и торцы ребер. Каждое ребро запаяно в два параллельных основания. Толщина основания есть толщина планки. Как планки, так и ребра могут быть медными и алюминиевыми в различных сочетаниях, например, по краям — из сплава алюминия, а в центре — из меди [3-4].

**Постановка задачи и описание математической модели**

В работе [3] предлагается оптимизация электронного модуля в целях минимизации его веса аналитическим расчетом.

В настоящей работе предлагается оптимизация системы охлаждения подобного модуля (рис. 1) с использованием современных программных средств моделирования (CreoParametric, ANSYS, TFlex, Nastran), в частности используем Solidworks Simulation [5-6].

Solidworks Simulation так же, как и многие другие системы автоматизированного проектирования, для теплового расчёта использует метод конечных элементов, но также программа обладает удобным инструментом конфигурации сценариев, позволяющим определить ход исследования проектирования и реализовать оптимизацию сложных многосегментных конструкций. Подробнее о конфигураторе сценариев можно узнать из статьи [7].

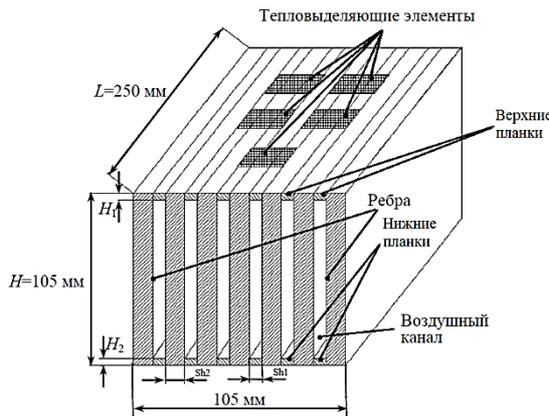


Рис. 1. Конструкция радиатора

Все параметры исследования и характеристики начальной конструкции соответствуют проведенному исследованию в работе [3].

Для обеспечения требуемого температурного режима электронных компонентов используется принудительное воздушное охлаждение. Несущими элементами конструкции являются пластины, образующие каналы прямоугольного сечения. На входе и выходе каналов (длиной  $L = 0,25$  м) закреплены вентиляторы. На двух противоположных пластинах (основаниях радиатора) размещены тепловыделяющие элементы. Ширина оснований фиксирована. На основании 1 расположены два транзистора мощностью по 175 Вт, отстоящие на расстоянии 10 мм. Удельная мощность тепловыде-

лений каждого из них составляет  $8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Кроме того, на основании 1 размещены также три транзистора мощностью по 15 Вт. Размеры контактных площадок транзисторов  $24 \times 9$  мм. На основании 2 расположены три преобразователя мощностью по 45 Вт, общее тепловыделение которых составляет 140 Вт. Размеры контактных площадок преобразователей  $60 \times 70$  мм. При температуре воздуха на входе в каналы  $t_{вх} = 50$  °С необходимо обеспечить предельную температуру контактных площадок преобразователя (95 °С) и транзистора (80 °С).

Площадь оснований радиатора значительно превосходит площадь контакта локальных источников теплоты. Самые мощные источники теплоты находятся в центре основания, поэтому при расчетах появляется возможность применения алюминиевых ребер в крайних областях. В рассматриваемой конструкции радиатора толщина всех ребер одинакова, также одинакова и толщина всех планок. Искомыми параметрами являются толщины двух оснований, ребер и планок между ними, количество медных ребер и планок, количество алюминиевых ребер и планок. Как показали предварительные оценки, плотность теплового потока на основании 2 в 50 раз меньше, чем на основании 1. Поэтому на начальном этапе расчетов используем сплав алюминия для всех планок основания 2 и сплав меди — для планок основания 1. Все ребра медные. Учитывая высокую плотность теплового потока, выбираем толщину ребра  $d = 1$  мм и толщину планки  $b = 1$  мм. Начальная толщина обоих оснований 8 мм.

Математическая постановка оптимизационной задачи реализована как однокритериальная задача с четырьмя варьируемыми параметрами и ограничениями по результатам теплового анализа. Критерием качества является масса изделия (минимизируемый критерий), он же и составляет целевую функцию. В целях сокращения рабочего времени оптимизации для каждого параметра сформирован ограниченный сценарий. Таким образом, целевая функция описывается формулой:

$$F = m_p(Sh_1, Sh_2, H_1, H_2) \rightarrow \min$$

при  $T_k \leq 80$  (°С),

где  $m_p$ — масса радиатора;  $Sh_1$  – ширина планок;  $Sh_2$  – ширина ребер;  $H_1$ – высота верхних планок;  $H_2$ – высота нижних планок;  $T_k$ – максимальная температура корпуса самого теплонагруженного компонента.

### Методика моделирования

Исходными данными моделирования является модель радиатора (рис. 2), построенная также в Solidworks и имеющая характеристики, представленные в табл. 1.

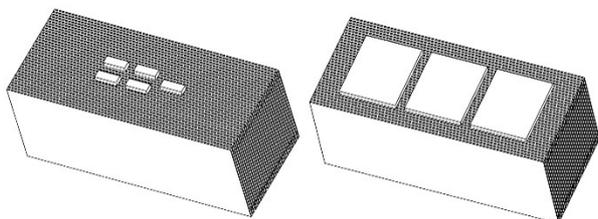


Рис. 2. Модель радиатора

Таблица 1

Исходные характеристики радиатора

Ширина планок, $Sh_1$ (мм)	1
Ширина ребер, $Sh_2$ (мм)	1
Высота верхних планок, $H_1$ (мм)	8
Высота нижних планок, $H_2$ (мм)	8
Масса радиатора, $m_p$ (кг)	12,9
Температура самого теплонагруженного транзистора, $T_k$ (°C)	68

Длина, высота и ширина радиатора - фиксированные величины. Изменяя ширину ребер либо планок, перестроение радиатора происходит без изменения его габаритов.

В список исходных данных моделирования входит коэффициент конвекции. Для расчета коэффициента конвекции использовали упрощенный алгоритм [5], учитывающий площадь поперечного сечения и длину канала, скорость потока воздуха, температуру окружающего воздуха и производительность вентиляторов. В результате получены следующие значения: при любой ширине канала от одного до двух миллиметров, коэффициент теплоотдачи принимает значения около  $150 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , согласно приведенной табл. 2 [5].

Таблица 2

Характерные коэффициенты конвекции

Теплоноситель и условия	Коэффициент конвекции $\alpha$ , $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$
Воздух (естественная конвекция)	5 - 25
Воздух/ перегретый пар (принудительная конвекция)	20 - 300
Масло (коэффициент конвекции)	60 - 1800
Вода (принудительная конвекция)	300 - 6000
Вода (кипящая)	3000 - 60000
Пар (конденсирующийся)	6000 - 120000

Для проведения термического исследования необходимо приложить тепловые нагрузки. Согласно начальным условиям [3] в качестве нагрузки применили тепловую мощность, рассеиваемую с поверхностей транзисторов и преобразователей.

После проведения термического исследования следует конфигурация процедуры оптимизации. Добавляются все варьируемые характеристики модели конструкции, устанавливается необходимое ограничение в виде максимальной температуры самого теплонагруженного силового элемента, а также производится конфигурация сценариев исследования [7].

Алгоритм исследования проектирования системы охлаждения можно представить следующей блок-схемой (рис. 3).

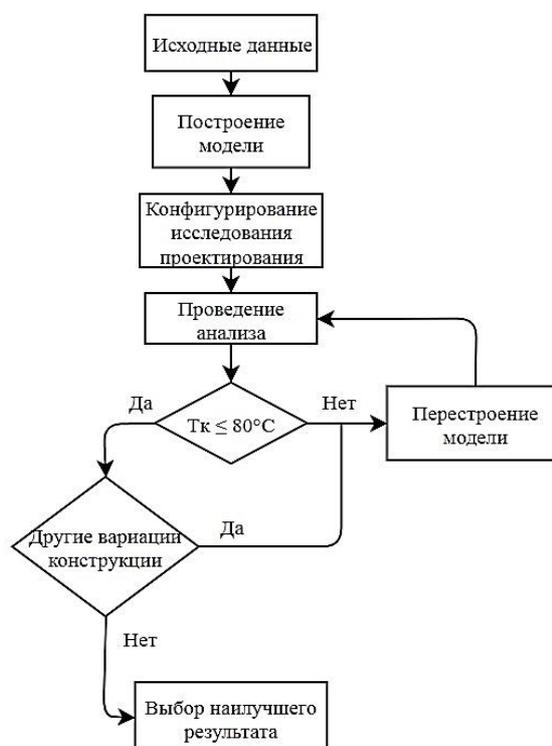


Рис. 3. Алгоритм исследования проектирования системы охлаждения электронного модуля

Оптимизация производится в два этапа. Первоначально исследована возможность минимизации массы радиатора путем изменения толщин планок, ребер и оснований, затем возможность замены материала крайних ребер и планок на алюминий. Разделение обусловлено необходимостью уменьшения количества сценариев, которое в случае проведения всех изменений в рамках одного исследования превышает допустимое количество в 4096.

Термический анализ исходной конструкции показал, что температура основания самого теплонагруженного транзистора составляет  $68^{\circ}\text{C}$ , температура основания преобразователей около  $52^{\circ}\text{C}$ . Распределение температурных полей представлено на рис. 4.



Рис. 4. Распределение температурных полей

Диапазон и шаг варьируемых характеристик конструкции приведены в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон и шаг параметров конструкции

Наименование параметра	Диапазон	Шаг
Ширина планок, $Sh_1$ (мм)	1-2	0,5
Ширина ребер, $Sh_2$ (мм)	1-2	0,5
Высота верхних планок, $H_1$ (мм)	4-10	2
Высота нижних планок, $H_2$ (мм)	4-10	2

С помощью программного комплекса Solidworks по завершению первого этапа исследования было быстро получено 144 варианта конструкции, каждый из которых был рассчитан. Все результаты сохраняются в истории исследования и с каждым из них можно ознакомиться. Среди всех значений программа отбирает самое оптимальное по массе и выводит на экран.

На рис. 5 представлена зависимость температуры от массы системы охлаждения при изменении одной из её характеристик.

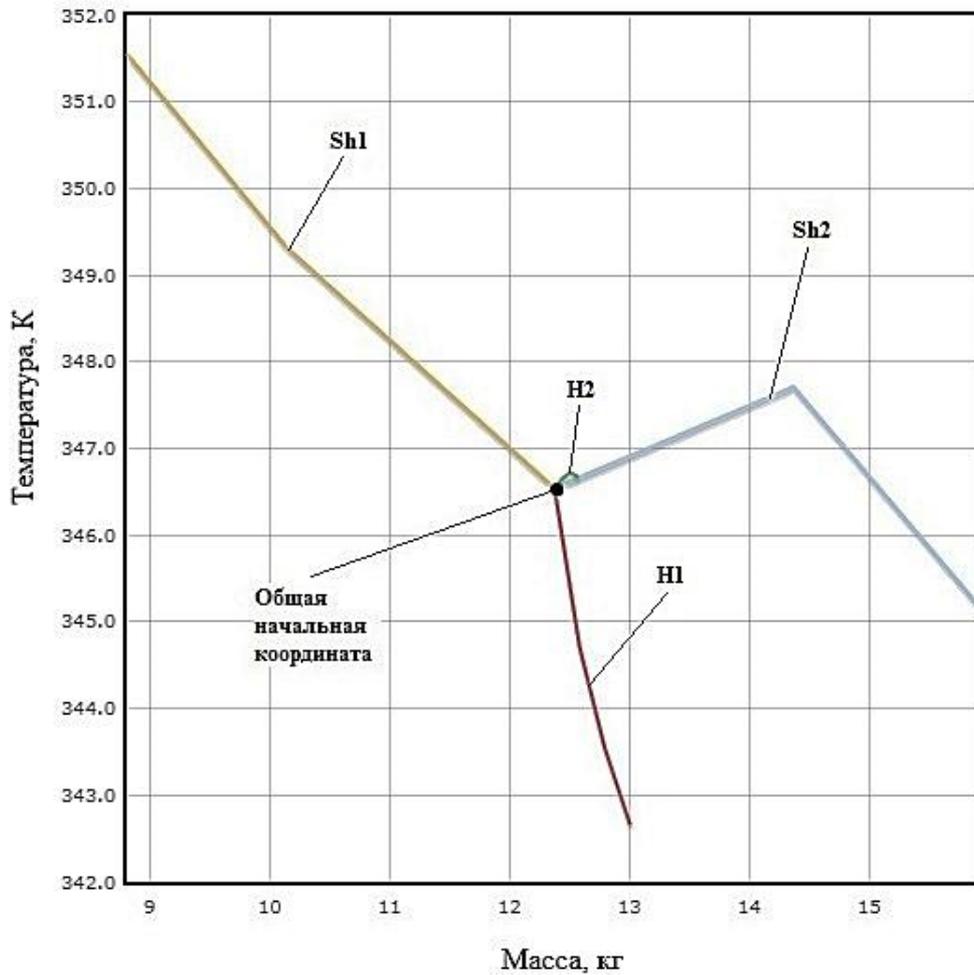


Рис. 5. График зависимости температуры от массы при изменении характеристик радиатора

Исходя из графика, стоит отметить, что изменение высоты нижних планок практически не оказало никакого влияния на максимальную температуру корпуса силовых элементов. С увеличением высоты верхних планок активно уменьшается максимальная температура. С увеличением ширины планок достаточно пропорционально понижается масса и увеличивается температура. И с увеличением ширины ребер активно увеличивается масса конструкции.

Все 144 варианта конструкции удовлетворяли ограничению в  $80^{\circ}\text{C}$ , и запас температуры для дальнейшей оптимизации по материалу ещё остаётся. Характеристики системы охлаждения после первого этапа оптимизации приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики радиатора после первого этапа

Ширина планок, $Sh_1$ (мм)	2
Ширина ребер, $Sh_2$ (мм)	1
Высота верхних планок, $H_1$ (мм)	4
Высота нижних планок, $H_2$ (мм)	4
Масса радиатора, $m_p$ (кг)	8,81
Температура самого теплонагруженного транзистора, $T_k$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	78,33

Ширина планок выбрана максимальной, так как при такой конфигурации минимальное количество ребер, тем самым облегчается конструкция и увеличивается воздушный канал.

Рассмотрена возможность замены материала крайних ребер и планок с меди на алюминий в целях уменьшения массы конструкции. Для этого необходимо создать индивидуальные конфигурации для каждого из интересующих нас элементов с помощью функции "Добавить конфигурацию" в дереве модели. Симметричные элементы при этом имеют одну конфигурацию, например, крайние ребра имеют конфигурацию с именем "1", крайние планки – "2" и так далее поочередно от края конструкции к ее центру. В новом исследовании оптимизации создаем переменные, каждой из которых в целях уменьшения количества сценариев присваиваем пару "ребро-планка". Всего переменных получилось десять, каждой из которых в ручном режиме создания сценариев назначен один из возможных материалов, медь или алюминий. Автоматический режим создания сценариев в данном случае не подходит, так как создает избыточное количество ( $10^2$ ) ненужных комбинаций, например, когда средние ребра алюминиевые, а крайние – медные.

Зависимость изменения температуры от количества алюминиевых ребер изображена на графике (рис. 6)

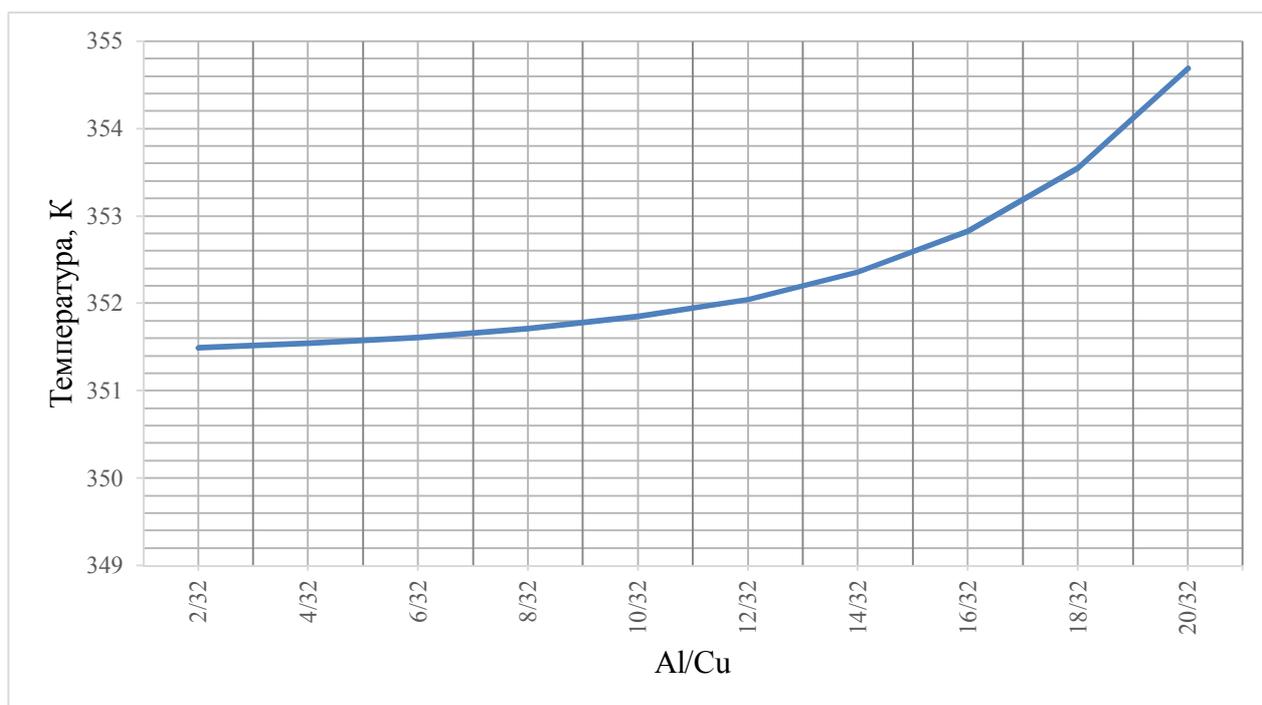


Рис. 6. График зависимости изменения температуры от количества алюминиевых сегментов "ребро-планка"

Из графика видно его характерное возрастание при замене ближайших к силовым элементам ребер и планок на алюминиевые. Также стоит отметить, что замена крайних ребер и планок практически не повлияла на рост температуры.

Результаты финального этапа оптимизации приведены в табл. 5.

В результате оптимизации 16 медных ребер и планок были заменены на алюминиевые, масса снижена с 8,81 кг до 6,05 кг, что составляет 47,3% от первоначальной массы конструкции.

Таблица 5

Результаты финального этапа оптимизации

Количество алюминиевых сегментов "ребро-планка", Al/Cu	2/32	4/32	6/32	8/32	10/32	12/32	14/32	16/32	18/32	20/32
Масса радиатора, $m_p$ (кг)	8,47	8,12	7,78	7,43	7,09	6,74	6,39	6,05	5,70	5,36
Температура самого теплонагруженного транзистора, $T_k$ (°C)	78,50	78,55	78,61	78,71	78,85	79,05	79,36	79,83	80,55	81,69

Последовательная замена по материалу крайних ребер и планок радиатора на более легкий и менее теплопроводящий сплав металла оказала эффективное воздействие на параметры конструкции. Заметно сильное уменьшение массы и медленное возрастание температуры.

Предлагаемая методика оптимального проектирования многосегментных систем охлаждения электронных модулей с использованием возможностей современных программ моделирования позволяет эффективно разрабатывать и оптимизировать конструкции сложных устройств теплоотвода.

### Выводы

Таким образом, благодаря полному использованию возможностей современных программ моделирования, становится возможным значительное повышение эффективности процесса проектирования и оптимизации различных конструкций, в том числе конструкций систем охлаждения электронных средств. В рамках данной работы удалось добиться снижения массы конструкции паяного биметаллического радиатора практически в два раза, что позволяет с уверенностью сказать о необходимости и

целесообразности применения описанных в статье методов в широком производстве.

### Литература

1. Комплексное моделирование и оптимизация характеристик в процессе конструкторского проектирования РЭС / О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, Н.В. Ципина, В.А. Шуваев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 100-104.
2. Комплексный подход при моделировании и оптимизации характеристик РЭС в процессе проектирования / О.Ю. Макаров, А.В. Турецкий, Н.В. Ципина, В.А. Шуваев // Радиотехника. 2016. № 6. С. 50-54.
3. Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля / Г.В. Бирюлин, В.И. Егоров, С.Ю. Муров, И.В. Невский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. № 3. С. 61-64.
4. CadLife [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://cad.life/index/rascheti/formuli-rascheta-radiatora-oxlazhdeniya.html>
5. Solidworks Web Help [Электронный ресурс] – Режим доступа: [help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm)
6. Solidworks Web Help [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks/cworks/id\\_c\\_help\\_meshsolid.htm](http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks/cworks/id_c_help_meshsolid.htm)
7. Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля с помощью применения системы автоматизированного проектирования SolidWorks / Н.Э. Самойленко, С.С. Потапов, И.В. Чепрасов, А.Ю. Барагузин // SciencesofEurope. 2017. Т. 1. № 16. С. 93-101.

Поступила 10.04.2018; принята к публикации 20.07.2018

### Информация об авторах

**Ципина Наталья Викторовна** - канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)-243-77-06, e-mail: tcnv@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-355X>

**Потапов Степан Сергеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stptpv@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8223>

**Чепрасов Игорь Викторович** - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: leoric16@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-9381>

## TECHNIQUE OF OPTIMUM DESIGNING OF AN ELECTRONIC MODULE COOLING SYSTEM

N.V. Tsipina, S.S. Potapov, I.V. Cheprasov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** when designing modern radioelectronic devices, there is a need for observing the temperature regime for the functioning of the power elements of the apparatus. Most often, the problem can be solved by installing a radiator. The difficulty lies in the choice of its size, shape and material, from which it will be made. In order to determine all these characteristics, the constructor resorts to analytical calculation methods that suffer from their accuracy and the time required to design. This article deals with the design of a bimetallic (copper-aluminum) brazed radiator, effectively cooling the elements of the electronic module with high heat flow unevenness. The characteristics of the radiator and the method of constructing the initial (non-optimized) model with allowance for the required constraints are given. With the help of modern computer-aided design tools, the study was carried out, based on the results of which further optimization of the design was carried out. The optimization was carried out in two stages. The first stage consisted in the search for the optimal geometry of the radiator structure, where the thicknesses and heights of the ribs and slats acted as variables. The second stage consisted in the gradual replacement of the material of elements from copper to an aluminum alloy. The influence of a change in a design parameter is described. Graphs and tables of results are given, on the basis of which it is possible to draw conclusions about the significance of a particular parameter on the distribution of heat fluxes. We describe all the difficulties that the authors encountered during the optimization of the design of the radiator in the modeling environment, and the ways to solve them. The main tasks solved with the help of the developed optimization algorithm are the increase in accuracy, the reduction in labor intensity and the duration of the search for the optimal design, the exclusion of the influence of the "human" factor

**Key words:** bimetallic radiator, thermal research, optimization, system Solidworks Simulation, cooling system

### References

1. Makarov O.Yu., Turetskiy A.V., Tsipina N.V., Shuvaev V.A. "Complex modeling and optimization of characteristics in the course of REM design", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp 100-104.
2. Makarov O.Yu., Turetsky A.V., Tsipina N.V., Shuvayev V.A. "An integrated approach during the modeling and optimization of characteristics of REM in a designing process", *Radiotechniques (Radiotekhnika)*, 2016, no. 6, pp 50-54.
3. Biryulin G.V., Egorov V.I., Murov S.Yu., Nevskiy I.V. "Optimization of a design of the cooling system of the electronic module", *Proc. of higher educational institutions. Instrument making (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye)*, 2012, no. 3, pp. 61-64.
4. "CadLife", available at: <http://cad.life/index/rascheti/formuli-rascheta-radiatora-oxlazhdeniya.html>
5. "Solidworks Web Help", available at: [http://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection\\_Heat\\_Coefficient.htm](http://help.solidworks.com/2012/Russian/solidworks/cworks/Convection_Heat_Coefficient.htm)
6. "Solidworks Web Help" available at: [http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks/cworks/idc\\_help\\_meshsolid.htm](http://help.solidworks.com/2012/russian/solidworks/cworks/idc_help_meshsolid.htm)
7. Samoylenko N.E., Potapov S.S., Cheprasov I.V., Baraguzin A.Yu. "Optimization of a design of system of cooling of the electronic module by means of the use of system automated design of SolidWorks", *SciencesofEurope*, 2017, vol. 1, no. 16, pp. 93-101

Submitted 10.04.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Natalia V. Tsypina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8(473)-243-77-06, e-mail: [tcnv@mail.ru](mailto:tcnv@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-355X>

**Stepan S. Potapov**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [stptpv@gmail.com](mailto:stptpv@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8223>

**Igor' V. Cheprasov**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [leoric16@mail.ru](mailto:leoric16@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-9381>

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

А.А. Пирогов<sup>1</sup>, А.Б. Буслаев<sup>2</sup>, А.С. Костюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в последние годы появляются новые технологии проектирования электронной аппаратуры, основанные на интегрированных системах автоматизированного проектирования и программируемых логических интегральных схемах. Данная работа затрагивает вопросы переноса структур интегральных схем с фиксированным функционалом на базу интегральных схем с изменяемым функционированием. Данные схемы, к которым относятся программируемые логические интегральные схемы с изменяемыми (программируемыми) структурами, являются наиболее перспективными на данный момент, отличаются высокой степенью универсальности, низкой стоимостью разработки и малым временем проектирования. Программируемые логические интегральные схемы применяются для построения реконфигурируемых систем в задачах логической эмуляции. Эффективность схем с программируемой структурой стимулирует быстрый рост соответствующей отрасли промышленности и объемов их производства, а также научных исследований по развитию их архитектур, схемотехники и алгоритмов решения практических задач. В работе были выполнены моделирование и анализ полученной структуры арифметико-логического устройства. Арифметико-логические устройства – это специализированные микросхемы, выполняющие в соответствии с программой на служебных входах арифметические или логические преобразования двоичной информации. В микропроцессорной технике арифметико-логические устройства являются базовыми элементами, они используются в сочетании с регистрами памяти и сдвига, оперативными запоминающими устройствами и другими цифровыми узлами

**Ключевые слова:** арифметико-логическое устройство, программируемая логическая интегральная схема, проектирование, верификация, моделирование

### Введение

В состав любого цифрового вычислительного устройства входит арифметико-логическое устройство (АЛУ). Оно выполняет некоторый набор арифметических и логических операций над входными словами фиксированной разрядности, выдавая результат в виде выходного слова той же разрядности. Вид выполняемой в АЛУ операции задается устройству внешним кодом операции. При арифметических операциях АЛУ учитывает перенос из младших разрядов и генерирует перенос в старшие разряды результата. Логические операции выполняются параллельно и независимо над соответствующими битами операндов [1].

### Проектирование арифметико-логического устройства

Для работы была выбрана базовая структура 4-разрядного арифметико-логического устройства (реализованного микросхемой К155ИПЗ). Микросхема

К155ИПЗ (рис. 1) предназначена для действий с двумя четырехразрядными двоичными словами:  $A = A_3A_2A_1A_0$  и  $B = B_3B_2B_1B_0$ . Конкретный вид операции, выполняемой микросхемой, задается 5-разрядным кодом на выходах  $MS_3S_2S_1S_0$ . Всего это АЛУ способно выполнить  $2^5 = 32$  операции. Операции сложения и вычитания проводятся с ускоренным переносом из разряда в разряд. На выходах  $F_0F_1F_2F_3$  формируются результаты логических преобразований и арифметических действий. На выходе переноса  $C_{n4}$  образуется сигнал старшего (пятого) разряда при выполнении арифметических операций. Дополнительные выходы (образования ускоренного переноса  $G$  и распространения ускоренного переноса  $P$ ) используются только при организации многоразрядных АЛУ в случае их сочетания с блоком ускоренного переноса К155ИП4, который будет рассмотрен далее (рис. 2).

Операнды  $A$  и  $B$ , подлежащие обработке, могут быть представлены в положительной либо отрицательной логике. Для положительной логики действительна табл. 1. Старший разряд кода выбора операции (вход  $M$ ) определяет характер действий,

выполняемых АЛУ. Когда на этом входе сигнал высокого уровня, АЛУ производит логические операции поразрядно над каждой парой бит слов А и В, а переносы между разрядами запрещаются.

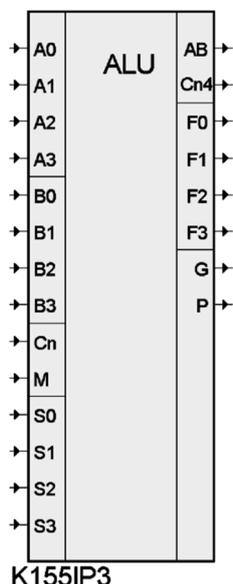


Рис. 1. Четырехразрядное арифметико-логическое устройство

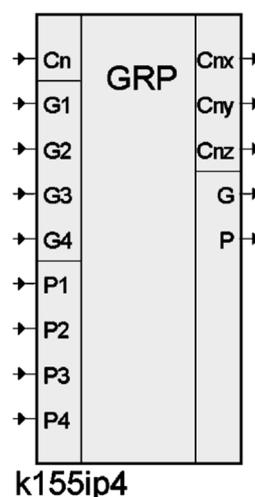


Рис. 2. Блок ускоренного переноса

При  $M = 0$  АЛУ выполняет арифметико-логические операции. При этом логические операции выполняются поразрядно, а арифметические – с переносом. Выходной результат формируется с учетом состояния входа переноса [2].

Таблица 1

Таблица состояний 4-разрядного арифметико-логического устройства

№	Код операции (выбор функции)				Логические операции (M=1)	Арифметические операции (M=0)	
	S <sub>3</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>0</sub>		C <sub>n</sub> =1	C <sub>n</sub> =0
1	0	0	0	0	$\bar{A}$	A	A+1
2	0	0	0	1	$\overline{A \vee B}$	$A \vee B$	$(A \vee B)+1$
3	0	0	1	0	$\overline{A \wedge B}$	$A \vee \bar{B}$	$(A \vee \bar{B})+1$
4	0	0	1	1	0	-1	0
5	0	1	0	0	$\overline{A \wedge \bar{B}}$	$A+(A \wedge \bar{B})$	$A+(A \wedge \bar{B})+1$
6	0	1	0	1	$\bar{B}$	$(A \vee B)+(A \wedge \bar{B})$	$(A \vee B)+(A \wedge \bar{B})+1$
7	0	1	1	0	$A \oplus \bar{B}$	A-B-1	A-B
8	0	1	1	1	$A \wedge \bar{B}$	$(A \wedge \bar{B})-1$	$(A \wedge \bar{B})$
9	1	0	0	0	$\overline{A \vee B}$	$(A \wedge B)+A$	$(A \wedge B)+A+1$
10	1	0	0	1	$\overline{A \oplus \bar{B}}$	A+B	A+B+1
11	1	0	1	0	B	$(A \vee \bar{B})+(A \wedge B)$	$(A \vee \bar{B})+(A \wedge B)+1$
12	1	0	1	1	$A \wedge B$	$(A \wedge B)-1$	$(A \wedge B)$
13	1	1	0	0	1	A+A	A+A+1
14	1	1	0	1	$A \vee \bar{B}$	$(A \vee B)+A$	$(A \vee B)+A+1$
15	1	1	1	0	$A \vee B$	$(A \vee \bar{B})+A$	$(A \vee \bar{B})+A+1$
16	1	1	1	1	A	A-1	A

При использовании АЛУ в качестве компаратора сигнал снимают с выхода  $A = B$  (вывод 14). Этот выход с открытым коллектором, к источнику питания его следует подключать через внешний резистор 1 кОм. Режим компаратора обеспечивается при  $M = 0$  и  $S_3S_2S_1S_0 = 0110$ . Когда числа  $A$  и  $B$  равны, на выходе  $A = B$  формируется сигнал высокого уровня (рис. 3).

### Увеличение разрядности АЛУ

Для увеличения разрядности чисел, например до восьми, необходимо использовать

два таких устройства. При этом сигнал на выходе  $C_{n+N}$  младших четырех разрядов должен поступить на вход  $C_n$  старших четырех разрядов. Такое соединение позволит увеличить разрядность обрабатываемых чисел до  $4N$ , где  $N$  – целое положительное число [3].

На рис. 4 в качестве примера представлена временная диаграмма работы АЛУ в режиме выполнения логических операций.

Высокоскоростная схема ускоренного переноса (рис. 5) предназначена для каскадного соединения АЛУ, имеющих емкость 4 бит и более. Данный модуль может работать с четырьмя АЛУ.

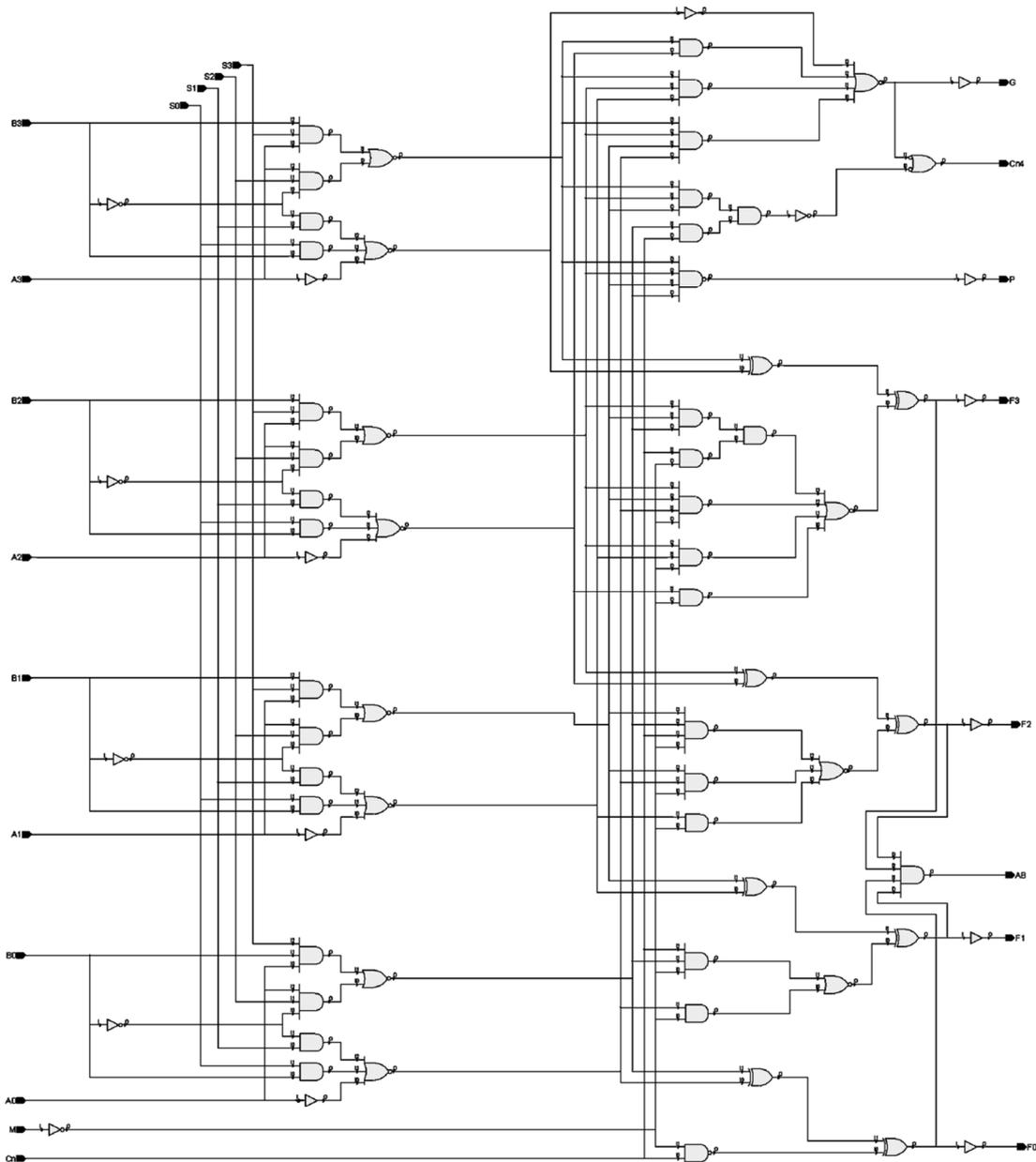


Рис. 3. Структурная схема четырехразрядного арифметико-логического устройства

Модуль имеет вход приема сигнала переноса  $C_n$ , четыре пары входов генерации переноса  $G_1-G_4$  и распространения переносов  $P_1-P_4$ , которые согласованы с аналогичными выходами АЛУ. Выходы устройства  $C_{n+x}$ ,  $C_{n+y}$ ,  $C_{n+z}$  предназначены для осуществления работы обслуживаемых АЛУ. Вспомогательные выходы  $P$  и  $G$  необходимы для организации схемы переноса более высокого порядка.

На рис. 6 и 7 показана схема шестнадцатиразрядного АЛУ, сформированная на основе четырехразрядных АЛУ и блока ускоренного переноса. Дополнительные выходы АЛУ – образования ускоренного переноса  $G$  и распространения ускоренного переноса  $P$  – используются при организации многоразрядных АЛУ, о чем было сказано ранее. Они подключаются к соответствующим входам генерации переноса  $G_1-G_4$  и распространения переносов  $P_1-P_4$ . Таблица

состояний аналогична четырехразрядному АЛУ. В данной схеме реализован иерархический подход проектирования.

Иерархические блоки (ИБ) применяются при проектировании схем для тех же целей, что и символы, но в отличие от последних они имеют несколько специфических свойств. Есть возможность создавать и редактировать ИБ непосредственно на схеме, сохранять иерархический блок в библиотеке элементов системы автоматизированного проектирования (САПР), что позволяет уже построенный и отлаженный блок использовать при создании новых проектов. Такой подход к проектированию логических схем в значительной мере снижает трудоемкость и время разработки. Также в качестве задания входных двоичных слов и режима работы использованы 16- и 4-разрядные шины передачи данных соответственно [4].

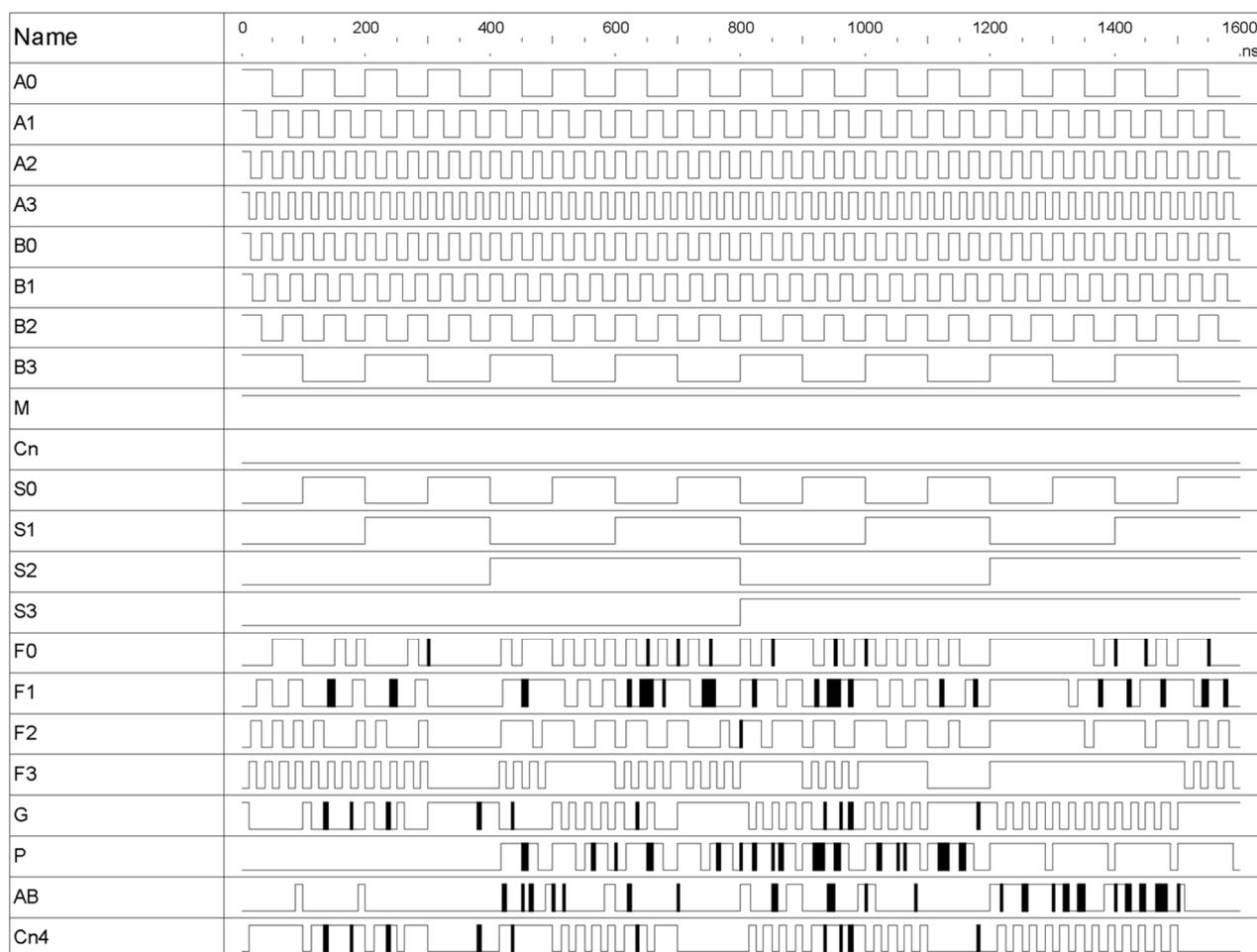


Рис. 4. Временная диаграмма работы четырехразрядного арифметико-логического устройства, реализация логических функций (на входе М напряжение высокого уровня)

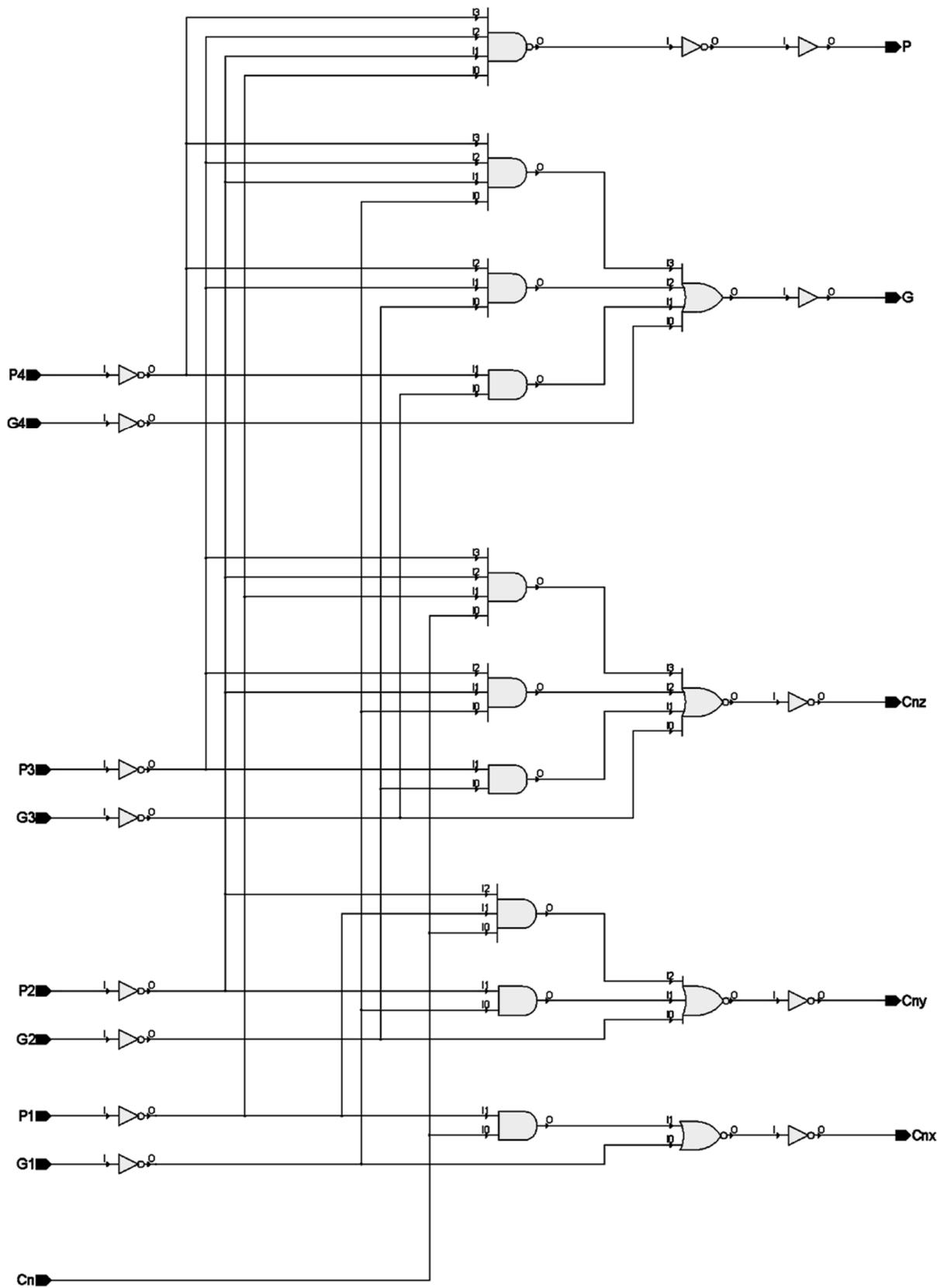


Рис. 5. Структурная схема блока ускоренного переноса

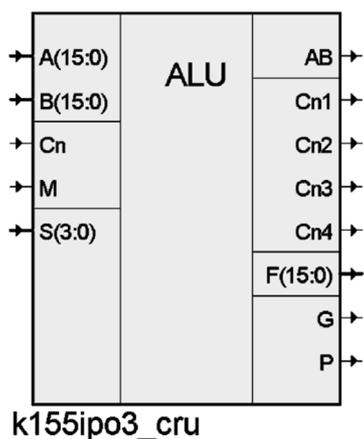


Рис. 6. Шестнадцатиразрядное арифметико-логическое устройство

### Физическое проектирование

В данной работе с использованием программного комплекса Xilinx PlanAhead произведено физическое назначение выводов интегральной схемы и размещение внутренних модулей программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). В табл. 2 указано наименование, тип порта (вход/выход) логического блока шестнадцатиразрядного

АЛУ и какой вывод на корпусе ПЛИС ему соответствует. Выбранная для работы ПЛИС Xilinx 3S250E (Spartan 3E) реализована в корпусе BGA CP132. Данная интегральная схема имеет 132 вывода, из которых 92 являются программируемыми. Возможность назначения выводов ПЛИС их взаимная перестановка позволяет реализовывать динамически реконфигурируемые устройства (изменяют свой функционал во время работы). При изменении функционала устройства прошивкой, установленной ПЛИС, выводы интегральной схемы назначаем согласно топологии печатной платы, что позволяет не проводить повторное проектирование печатной платы всего устройства, не вносить изменения печатного рисунка платы модуля (рис. 8).

От взаимного расположения компонентов на кристалле и их связи с выводами корпуса также зависят ключевые параметры устройства [5].

Карта задействованных конфигурируемых блоков ПЛИС для реализации шестнадцатиразрядного АЛУ также представлена на рис. 9.

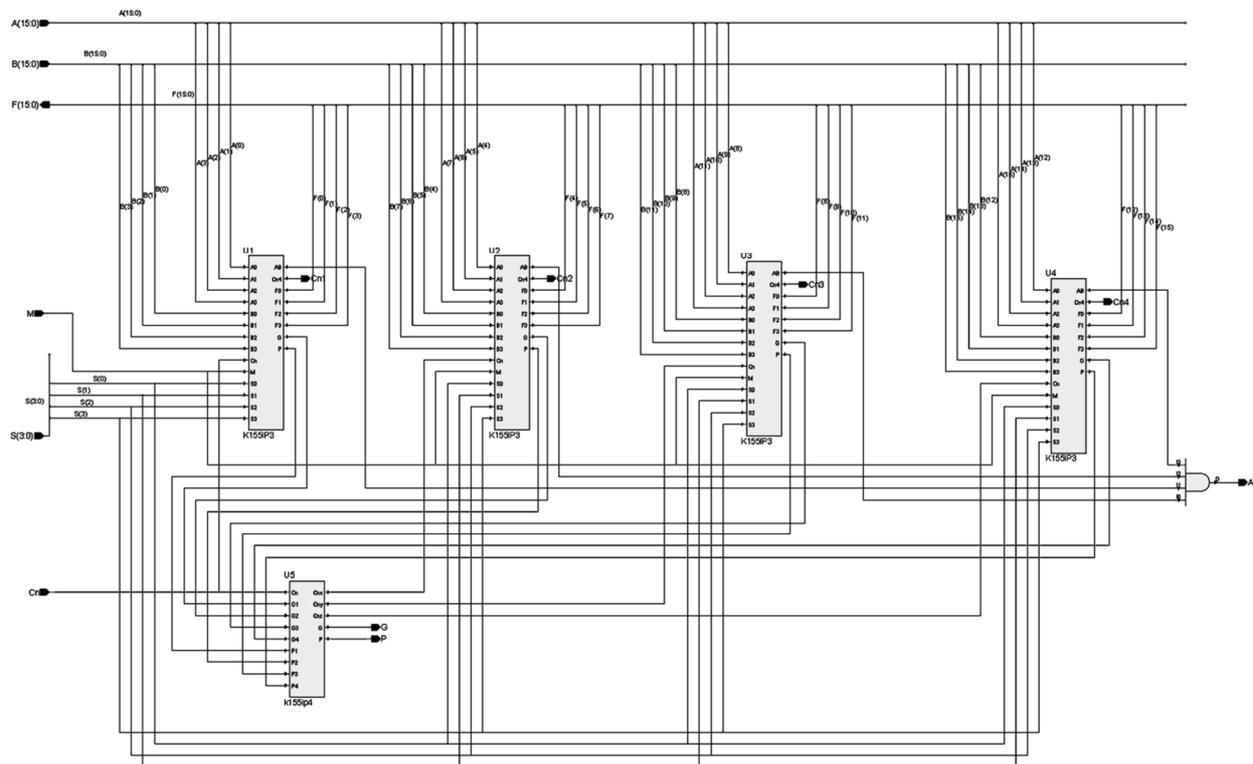


Рис. 7. Структурная схема шестнадцатиразрядного арифметико-логического устройства

Таблица 2

Таблица соответствия информационных портов АЛУ и выводов на интегральной схеме ПЛИС

In	Pin	In	Pin	Out	Pin
A(0)	J13	B(0)	H14	F(0)	L14
A(1)	H1	B(1)	C7	F(1)	P8
A(2)	K13	B(2)	K14	F(2)	J12
A(3)	E1	B(3)	A7	F(3)	G1
A(4)	E2	B(4)	L13	F(4)	F14
A(5)	A8	B(5)	C9	F(5)	A13
A(6)	G14	B(6)	J1	F(6)	P6
A(7)	G12	B(7)	E14	F(7)	B6
A(8)	A11	B(8)	A10	F(8)	E12
A(9)	H12	B(9)	G13	F(9)	D3
A(10)	F12	B(10)	C14	F(10)	D2
A(11)	B11	B(11)	E3	F(11)	D1
A(12)	B7	B(12)	B5	F(12)	C1
A(13)	C5	B(13)	A3	F(13)	C8
A(14)	C11	B(14)	E13	F(14)	B2
A(15)	A9	B(15)	N8	F(15)	A6
		S(0)	F3	G	K12
		S(1)	D12	P	H3
		S(2)	B13	Cn1	F2
		S(3)	G3	Cn2	P9
		Cn	F13	Cn3	A12
		M	M8	Cn4	C4
				A=B	B1

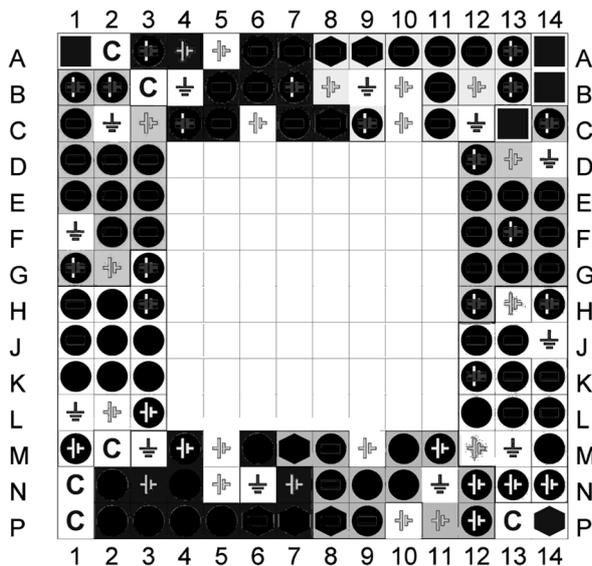


Рис. 8. Размещение выводов 3S250E Xilinx CP132 для шестнадцатиразрядного арифметико-логического устройства

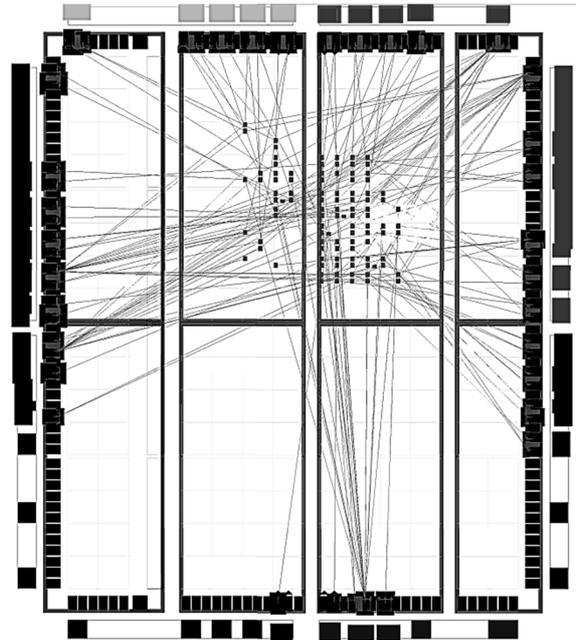


Рис. 9. Размещение внутренних модулей 3S250E xilinx CP132 шестнадцатиразрядного арифметико-логического устройства

**Выводы**

В данной работе проработаны вопросы, связанные с проектированием цифровых устройств на базе программируемых логических интегральных схем. Проведена разработка арифметико-логического устройства, построена схема каскадирования с применением блока быстрого переноса разряда, в итоге реализована модель шестнадцатиразрядного арифметико-логического устройства на вентиляльном (логическом) уровне. Проведены отладка устройства, временное моделирование логических и арифметических функций арифметико-логического устройства согласно таблице состояний устройства. Осуществлены анализ, размещение и назначение внешних выводов интегральной схемы, а также размещение внутренних модулей кристалла программируемой логической интегральной схемы, что позволяет реализовывать динамически реконфигурируемые устройства на базе ПЛИС.

**Литература**

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 800 с.
2. Солонина А.И. Основы цифровой обработки сигналов: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 768 с.
3. Новиков Ю.В. Введение в цифровую схемотехнику: учеб. пособие. М.: БИНОМ, 2007. 343 с.

4. Тарасов И.Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 252 с.

5. Тарасов И.Е., Потехин Д.С. Разработка систем цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 248 с.

Поступила 15.05.2018; принята к публикации 20.07.2018

#### Информация об авторах

**Пирогов Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

**Буслаев Алексей Борисович** – канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54 «А»), e-mail: bus-alex@yandex.ru

**Костюков Александр Сергеевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stalkerklon@mail.ru

### DEVELOPMENT OF MODELS AND DESIGN ALGORITHMS FOR DIGITAL DEVICES WITH THE USE OF PROGRAMMABLE LOGICAL INTEGRAL SCHEMES

A.A. Pirogov<sup>1</sup>, A.B. Buslaev<sup>2</sup>, A.S. Kostyukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russia

**Abstract:** in recent years, new technologies for the design of electronic equipment have emerged, based on integrated CAD systems and programmable logic integrated circuits. This paper deals with the transfer of the structures of integrated circuits with fixed functional to the base of integrated circuits with variable functioning. These circuits, which include programmable logic integrated circuits with variable (programmable) structures, are the most promising at the moment, they have a high degree of universality, low cost of development and short design time. Programmable logic integrated circuits are used to build reconfigurable systems, in logical emulation tasks. The effectiveness of schemes with a programmable structure stimulates the rapid growth of the relevant industry and the volume of their production, as well as scientific research on the development of their architectures, circuitry and algorithms for solving practical problems. Modeling and analysis of the received structure of the arithmetic logic unit was performed. Arithmetic logic devices are specialized microcircuits that perform arithmetic or logical transformations of binary information in accordance with the program on the service inputs. In microprocessor technology, arithmetic logic devices are basic elements, they are used in combination with memory and shift registers, random access memory and other digital nodes

**Key words:** arithmetic logic unit, programmable logic integrated circuit, design, verification, simulation

#### References

1. Ugryumov E.P. “Digital circuitry: Textbook” (“Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobie”), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2004. 800p.
2. Solonina A.I. “Fundamentals of digital signal processing: manual” (“Osnovy tsifrovoy obrabotki signalov: ucheb. posobie”), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2005, 768p.
3. Novikov Yu.V. “Introduction to digital circuitry: manual” (“Vvedenie v tsifrovuyu skhemotekhniku: ucheb. posobie”), Moscow, BINOM, 2007, 343p.
4. Tarasov I.E. “Development of digital devices based on FPGA Xilinx with the use of the language VHDL” (“Razrabotka tsifrovyykh ustroystv na osnove PLIS Xilinx s primeneniem yazyka VHDL”), Moscow, Goryachaya liniya – Telecom, 2005, 252p.
5. Tarasov I.E., Potekhin D.S. “Development of digital signal processing systems based on FPGA” (“Razrabotka sistem tsifrovoy obrabotki signalov na baze PLIS”), Moscow, Goryachaya liniya – Telecom, 2007, 248 p.

Submitted 15.05.2018; revised 20.07.2018

#### Information about the authors

**Aleksandr A. Pirogov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

**Aleksey B. Buslaev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy” (54 A starykh bolshevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: bus-alex@yandex.ru

**Aleksandr S. Kostyukov**, Bachelor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-950-778-00-65, e-mail: stalkerklon@mail.ru

## ФРОНТАЛЬНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДОМАШНЕГО КИНОТЕАТРА

А.С. Бадаев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлены методики расчета акустических оформлений типа «акустическая трансмиссионная линия (акустический лабиринт)» и «полосовой резонатор (Bandpass)». Показано, что оптимальной длиной лабиринта с точки зрения уровня звукового давления, КПД, излучаемой акустической мощности и минимальных искажений является четверть звуковой волны, излучаемой головкой громкоговорителя (ГГ) на частоте своего основного резонанса, а его площадь поперечного сечения равна эффективной площади диффузора ГГ. При этом входное сопротивление лабиринта максимально и имеет чисто активный характер, его поведение подобно параллельному электрическому контуру, настроенному в резонанс. На частоте этого резонанса труба лабиринта интенсивно излучает звуковую энергию в окружающее пространство, а амплитуда колебаний диффузора ГГ минимальна, вследствие чего резко снижаются искажения. Предложенный метод расчета полосового резонатора (ПР) четвертого порядка, использованного в качестве акустического оформления сабвуфера акустических систем (АС), основан на представлении ПР как ГГ, установленной в закрытом корпусе (задняя камера) и нагруженной на корпус с фазоинвертором (передняя камера). Учет влияния упругости воздуха в задней камере на параметры ГГ и их выбор позволили рассчитать ПР с высоким звуковым давлением и КПД не в ущерб переходным характеристикам. На основе предложенных методик были разработаны АС для домашнего кинотеатра, особенностью которых является использование двух конструктивно связанных в одном корпусе блоков, непосредственно АС и активного сабвуфера, выполненных на основе разных оформлений - лабиринта и полосового резонатора. Представлены технические параметры и характеристики разработанных АС. Анализ результатов измерений показывает правильность расчета АС, отмечены высокий уровень звукового давления и хорошее качество звучания разработанных АС

**Ключевые слова:** системы домашнего кинотеатра, акустические системы, акустическая трансмиссионная линия, акустический лабиринт, полосовой резонатор (Bandpass), головки громкоговорителей

### Введение

Для обеспечения эффекта присутствия системы домашнего кинотеатра (ДК) применяют, как минимум, 6 каналов: два фронтальных канала (левый и правый), два тыловых, центральный канал и канал для сабвуфера - активной акустической системы (АС) для воспроизведения низких частот (НЧ). К фронтальным АС ДК помимо общих предъявляется ряд специфических требований, в частности, высокая предельная долговременная мощность (не менее 100 Вт) и перегрузочная способность. Тем не менее, подобные системы далеко не всегда успешно вписываются в стереофонические системы высококачественного (Hi-Fi) звуковоспроизведения, поскольку решают несколько иные задачи.

В случае с ДК - это звуковая поддержка видеоряда и создание пространственных звуковых эффектов. В случае Hi-Fi - максимальное приближение к естественному слушанию и ощущениям, естественность и богатство тембров инструментов и голосов [1] и, наконец, эмоциональное воздействие музыки.

В связи с этой целью работы явилось создание высококачественных бюджетных АС на

основе отечественной комплектации с высоким уровнем характеристической чувствительности, способных успешно работать как в системах ДК, так и Hi-Fi.

### Выбор и расчет конструкции

Разработанные АС представляют собой два конструктивно связанных в одном корпусе блока (рис. 1).

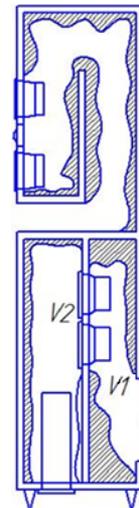


Рис. 1. Схема фронтальной АС для домашнего кинотеатра

Верхний – непосредственно АС, нижний – активный со встроенным усилителем сабвуфер. В верхнем блоке установлены 2 широкополосные доработанные головки громкоговорителей (ГГ) 25ГДШ-9Д, между ними – высокочастотная (ВЧ) ГГ 6ГДВ-4. Такое расположение позволяет улучшить диаграмму направленности АС в горизонтальной плоскости. В нижнем - 2 отобранные с низкой резонансной частотой ГГ 25ГДН-3, электрически включенные последовательно. Параметры ГГ следующие: 25ГДШ-9Д: номинальная мощность – 15 Вт; паспортная мощность – 25 Вт; номинальное электрическое сопротивление – 4 Ом; эффективный рабочий диапазон частот – 60-18000 Гц; уровень характеристической чувствительности – 87 дБ; частота основного резонанса – 70 Гц; полная добротность – 0,55 ; эквивалентный объем – 5,4 дм<sup>3</sup> ; диаметр – 12,5 см; 6ГДВ-4: паспортная мощность – 6 Вт; номинальное электрическое сопротивление – 8 Ом; диапазон частот – 3000-25000 Гц; уровень характеристической чувствительности – 93 дБ. 25ГДН-3: номинальная мощность – 15 Вт; паспортная мощность – 25 Вт; номинальное электрическое сопротивление – 4 Ом; диапазон частот – 40-5000 Гц; частота основного резонанса – 50 Гц; уровень характеристической чувствительности – 85 дБ; полная добротность – 0,42; эквивалентный объем – 8 дм<sup>3</sup>; диаметр – 12,5 см.

В качестве акустического оформления верхнего блока выбрана акустическая трансмиссионная линия [2]. Акустическая трансмиссионная линия (ТЛ) представляет собой трубу с поперечным сечением  $S$  и длиной  $l \gg \sqrt{S}$ , с одной стороны которой установлена ГГ, другая сторона открыта [2]. Для уменьшения габаритных размеров акустических систем (АС) на основе ТЛ часто применяют свернутые трубы, которые рассчитываются как и обычные. Такие АС получили название акустического лабиринта (АЛ). В некоторых работах, например [1], обсуждается разница между акустическими оформлениями «ТЛ» и «АЛ», нам представляется, что это вопрос терминологии.

ГГ не может эффективно работать в области низких частот (НЧ) без акустического оформления (т.е. корпуса), разделяющего излучения передней и задней стороны диффузора ГГ, которые складываются в противофазе, резко уменьшая звуковое давление в области НЧ. АЛ является одним из немногих акустических оформлений, в которых задняя сторона диффузора, нагруженная на грамотно рассчитанную и

настроенную трубу, не мешает, а помогает излучению передней стороны. АЛ является системой с распределенными параметрами, в отличие от наиболее широко распространенных оформлений «закрытый корпус» и «фазоинвертор», которые являются колебательными системами с сосредоточенными параметрами. Поэтому в АЛ помимо объемов и, соответственно, гибкостей воздуха важно учитывать и линейные размеры системы.

На сегодняшний день не существует общепринятой методики расчета ТЛ. Рекомендованные длины линий колеблются от четверти волны  $\lambda/4$ , излучаемой ГГ на частоте своего резонанса в воздухе (и даже от  $\lambda/8$  при плотном заполнении трубы звукопоглотителем) до полуволны. Нет единого мнения о площади поперечного сечения и законе изменения этого сечения вдоль длины трубы. Применяют ТЛ постоянного и переменного сечения, возрастающего и убывающего по линейным и нелинейным законам. Настройка этих устройств осуществляется на слух и, как правило, не всегда удачно.

Как было отмечено выше, ТЛ является системой с распределенными параметрами, поэтому электрическим аналогом трубы является длинная линия с произвольной нагрузкой.

В работе [2] с использованием метода электромеханических аналогий было показано, что оптимальной длиной ТЛ является четверть длины волны, излучаемой ГГ на частоте своего основного резонанса, а ее площадь поперечного сечения равна эффективной площади диффузора ГГ. Для описания волновых процессов и определения характеристик звукового поля в ТЛ и в точке прослушивания: звукового давления, колебательной скорости частиц среды, акустического сопротивления и т.д., необходимо найти решение волнового уравнения. Строгое решение трехмерного волнового уравнения для режима смешанных волн, установившегося в ТЛ, связано со значительными математическими трудностями, поэтому введем некоторые упрощающие допущения. Рассмотрим трубу постоянного сечения  $S$  и длиной  $l$ , с одной стороны которой находится колеблющийся диффузор ГГ, а другая сторона открыта. В этом случае звуковые лучи волны, распространяющейся в трубе, не будут расходиться, т.е. речь идет о плоской волне. Будем предполагать, что звуковое давление не меняется вдоль поперечного сечения ТЛ (т.е. от стенок до оси), форму звуковой волны будем считать неизменной.

Если бы, как в электрической длинной линии, механическое волновое сопротивление  $Z_{МВ}$  трубы было равно сопротивлению нагрузки  $Z_{Н}$ , то в трубе устанавливался бы режим бегущих волн. При этом вся звуковая энергия ГГ передается в нагрузку (воздушную среду). В нашем случае  $Z_{Н}$  является сопротивлением излучения  $Z_{ИЗЛ}$ , которое оказывает среда фронту звуковой волны, выходящей из ТЛ. В общем случае  $Z_{ИЗЛ}$  комплексное, только для плоской волны оно чисто активно и максимально.

$$Z_{МВ} = \rho c S, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;

$c$  – скорость звука в воздухе;

$S$  – площадь фронта волны (площадь сечения ТЛ).

В реальных условиях, когда  $S$  и  $l$  конечны, выходное отверстие ТЛ будет излучать сферическую волну,  $Z_{ИЗЛ}$  которой комплексное и отличается от  $Z_{МВ}$ . Таким образом, часть звуковой энергии отразится от выхода ТЛ, и в ней наряду с бегущей появится стоячая волна, т.е. установится режим смешанных волн.

Рассмотрим одномерное волновое уравнение, так называемое волновое уравнение Вебстера [3]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} + k^2 p = 0, \quad (2)$$

где  $p = p(x)e^{j\omega t}$  – переменное звуковое давление вдоль оси  $x$  ТЛ;

$S(x)$  – площадь поперечного сечения;

$k = \omega/c$  – волновое число;

$\omega$  – круговая частота звуковых колебаний;

$c$  – скорость звука в воздухе.

В нашем случае  $\frac{\partial S(x)}{\partial x} = 0$  и уравнение (2) принимает вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k^2 p = 0. \quad (3)$$

Решением этого уравнения будет [3]:

$$p(x, t) = \sqrt{2} [p_1 e^{jk(ct-x)} + p_2 e^{jk(ct+x)}], \quad (4)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – амплитуды давления прямой и отраженной волн.

Обозначим  $p_0$  – амплитуду звукового давления стоячей волны при  $x = 0$ . Установим следующие граничные условия:

при  $x = 0$ ,  $p(0, t) = \sqrt{2} p_0 e^{j\omega t}$ , таким образом

$$p_1 + p_2 = p_0;$$

при  $x = l$ ,  $p(l, t) = 0$ , отсюда следует

$$p_1 e^{-jkl} + p_2 e^{jkl} = 0. \quad (5)$$

Учитывая, что

$$\sin kl = \frac{e^{ikl} - e^{-jkl}}{2j},$$

получим

$$p(x, t) = \sqrt{2} p_0 e^{j\omega t} \frac{\sin k(l-x)}{\sin kl} \quad (6)$$

или

$$p(x) = p_0 \frac{\sin k(l-x)}{\sin kl}. \quad (7)$$

Учитывая, что колебательная скорость

$$v(x) = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

получим

$$v(x) = \frac{p_0}{j\omega\rho} \frac{\cos k(l-x)}{\sin kl}, \quad (9)$$

$$\dot{Z}_{ВХ} = \frac{p(0)}{v(0)} = j\omega\rho \operatorname{tg} kl. \quad (10)$$

Анализ полученного выражения показывает, что при длине ТЛ равной четверти длины волны, излучаемой ГГ на частоте своего основного резонанса  $l = \lambda_0/4$ ,  $\dot{Z}_{ВХ} \rightarrow \infty$ , при  $l = \lambda_0/2$ ,  $\dot{Z}_{ВХ} = 0$ . Следует напомнить, что в ТЛ помимо стоячей волны присутствует бегущая, поэтому  $\dot{Z}_{ВХ}$  при  $l = \lambda_0/4$  имеет конечное значение, а при  $l = \lambda_0/2$  не равно 0, при этом имеет и активную составляющую. У конца трубы ТЛ при  $l = \lambda_0/4$  звуковое давление минимально, но колебательная скорость максимальна, и ТЛ интенсивно излучает звуковую энергию в окружающее пространство. И, наоборот, при

$l = \lambda_0/4$  на входе ТЛ колебательная скорость диффузора ГГ и амплитуда колебаний минимальны, излучает в основном труба ТЛ, а диффузор подкачивает в этот процесс энергию. Вследствие этого резко снижаются все виды искажений. Поведение ТЛ на резонансной частоте напоминает фазоинвертор. Выше резонанса фазоинверторное отверстие оказывает на процессы все более и более ограниченное действие, труба же продолжает излучать на частотах  $3c/4l$ ,  $5c/4l$ ,  $7c/4l$  и т.д. В акустических системах (АС) типа ТЛ эти резонансы нежелательны, поскольку приводят к появлению провалов на АЧХ, поэтому с ними борются с помощью покрытия внутренних стенок звукопоглощающими материалами. Наличие звукопоглотителя необходимо учитывать, так как вышеприведенные расчеты относились к ТЛ без потерь. Таким образом, при  $l = \lambda_0/4$  труба ТЛ представляет собой оптимальную нагрузку для ГГ, обеспечивая наилучшие энергетические характеристики и минимальные искажения.

Все вышеизложенное относится к анализу волновых процессов, происходящих на входе и выходе ТЛ, представляется интересным изучить картину звукового поля в точке прослушивания, где складываются волны, излучаемые передней стороной диффузора ГГ и выходным отверстием ТЛ. Эти волны являются сферическими, и волновое уравнение для них имеет вид [3]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (11)$$

Частные решения этого уравнения в случае расходящихся волн:

$$p_{ГГ} = \frac{\sqrt{2} p_{ГГА}}{x} \sin(\omega t - kx), \quad (12)$$

$$p_{ТЛ} = -\frac{\sqrt{2} p_{ТЛА}}{x} \sin[\omega t - k(x + l)], \quad (13)$$

где  $p_{ГГ}$  и  $p_{ТЛ}$  – звуковые давления ГГ и отверстия ТЛ соответственно;

$p_{ГГА}$  и  $p_{ТЛА}$  – их амплитуды.

Знак «-» означает, что передняя и задняя сторона диффузора излучают в противофазе.

Полагая, что в точке прослушивания при  $x \gg l$  амплитуды звуковых давлений равны ( $p_{ГГА} = p_{ТЛА} = p_A$ ), получим результирующее давление

$$p = p_{ГГ} + p_{ТЛ} = \frac{\sqrt{2} p_A}{x} [\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t - k(x + l))] = \frac{\sqrt{2} p_A}{x} \sin \frac{kl}{2} \cos \left[ \omega t - k \left( x + \frac{l}{2} \right) \right]. \quad (14)$$

Максимальное результирующее давление

$$p_m = \frac{\rho \omega \sqrt{2} p_A}{x} \sin \frac{kl}{2}. \quad (15)$$

При  $l = \lambda_0/4$

$$p_m = \frac{\rho \omega p_A}{x}, \quad (16)$$

т.е. в точке прослушивания звуковые давления складываются со сдвигом фаз  $90^\circ$ . Это еще раз доказывает, что оптимальной длиной ТЛ является четверть волны  $\lambda_0/4$ .

На основе изложенной методики была рассчитана верхняя секция АС (рис. 1). Частота настройки лабиринта равна частоте основного резонанса ГГ 25ГДШ-9Д – 70 Гц, длина лабиринта – 1,2 м, площадь поперечного сечения выбрана равной эффективной площади диффузоров ГГ –  $180 \text{ см}^2$ . Схема разделительных фильтров представлена на рис. 2 [4].

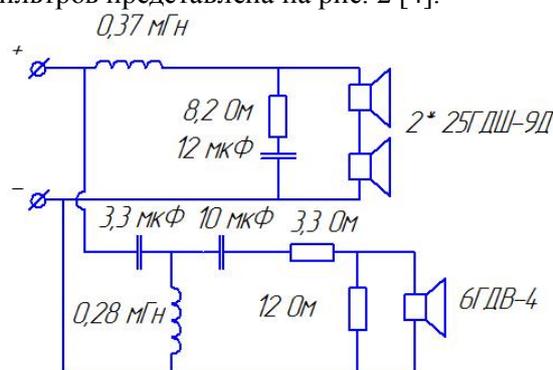


Рис. 2. Схема разделительных фильтров АС

Частота раздела составляет 3,8 кГц. В конструкции фильтров применены полипропиленовые конденсаторы К-78, катушки индуктивности без сердечников.

Из всех возможных оформлений сабвуфера мы остановили выбор на полосовом резонаторе (ПР) четвертого порядка (Bandpass) (рис.1), который в последнее время находит всё большее применение [5].

ПР (рис.1) состоит из закрытого объема (задней камеры –  $V_1$ ) и второго, снабженного тоннелем, как у обычного фазоинвертора ( $V_2$  –

передняя камера). Динамик установлен в перегородке между камерами так, что обе стороны диффузора работают на два объема, поэтому ПР иногда называют «громкоговоритель с симметричной нагрузкой».

Из традиционных конструкций полосовой громкоговоритель обладает наивысшим КПД, хотя импульсные характеристики не самые лучшие, что, тем не менее, позволяет успешно использовать это акустическое оформление в сабвуферах, особенно в автомобильных.

Если теория закрытого корпуса и фазоинвертора давно разработана и успешно работает, то методика расчета полосового громкоговорителя вызывает вопросы. Существующие компьютерные программы сконцентрированы на расчет «Bandpass» с максимальным звуковым давлением за счет формирования крайне высокой добротности системы в ущерб переходным характеристикам. Нами предложен иной подход, основанный на расчете классического «фазоинвертора», но с учетом влияния упругости воздуха в задней камере на параметры головок. Из рис. 1 следует, что полосовой громкоговоритель представляет собой нечто иное, чем динамик в закрытом корпусе, нагруженный на корпус с фазоинвертором, что позволяет, используя известные методики [1], рассчитать полосовой громкоговоритель.

При расчете фазоинвертора наиболее важными являются 3 параметра динамической головки:  $f_0$  – резонансная частота в воздухе,  $Q_0$  – полная добротность в воздухе,  $V_3$  – эквивалентный объем – параметр, характеризующий гибкость подвижной системы головки. Эти параметры приводятся изготовителем либо измеряются. В случае полосового громкоговорителя представляют интерес параметры системы головки – воздух в объеме камеры  $V_1$ . Согласно [1], резонансная частота головки в камере  $f_{ок}$ :

$$f_{ок} = f_0 \sqrt{1 + V_3/V_1} \quad (17)$$

где  $V_1$  – объем камеры.

Для получения максимально линейной АЧХ в области НЧ  $V_1$  выбирается так, чтобы  $Q_{ок}$  не превышала 0,5-0,6. Аналогично, полная добротность головки в камере  $Q_{ок}$ :

$$Q_{ок} = Q_0 \sqrt{1 + V_3/V_1} \quad (18)$$

Отношение гибкостей, а следовательно, эквивалентных объемов головки в воздухе и головки в задней камере обратно пропорцио-

нальны квадратам соответствующих резонансных частот:

$$V_{эк}/V_3 = (f_0/f_{ок})^2 \quad (19)$$

где  $V_{эк}$  – эквивалентный объем системы головка-воздух в камере.

С учетом (17) получаем:

$$V_{эк} = \frac{V_1 V_3}{V_1 + V_3} \quad (20)$$

Этого достаточно, чтобы используя известную методику расчета фазоинвертора [1], определить объем передней камеры  $V_2$ , частоту настройки фазоинвертора  $f_{\phi}$ , а следовательно, диаметр  $d$  и длину туннеля  $l$ .

По изложенной методике был рассчитан и изготовлен сабвуфер, предназначенный для использования в системах домашнего кинотеатра и входящий в состав разработанных фронтальных АС.

По результатам расчета  $V_1=14$  дм<sup>3</sup>; параметры 2-х ГГ 25ГДН-3, установленных в  $V_1$ :  $Q_{ок}=0.56$ ;  $V_{эк}=7$  дм<sup>3</sup>;  $f_{ок}=70$  Гц; частота настройки фазоинвертора ( $f_{\phi}$ ) 45 Гц,  $V_2=17$  дм<sup>3</sup>;  $d=68$  мм,  $l=28$  см. Труба фазоинвертора выведена вниз.

### Технические параметры и характеристики АС

Параметры верхнего блока АС следующие: номинальная мощность – 30 Вт; паспортная мощность – 50 Вт; номинальное сопротивление - 8 Ом; диапазон воспроизводимых частот 55-25000 Гц; уровень характеристической чувствительности – 90 дБ; габариты – 63\*21,5\*28,5 см. Частотная зависимость модуля полного сопротивления и АЧХ АС представлены на рис. 3 и 4.

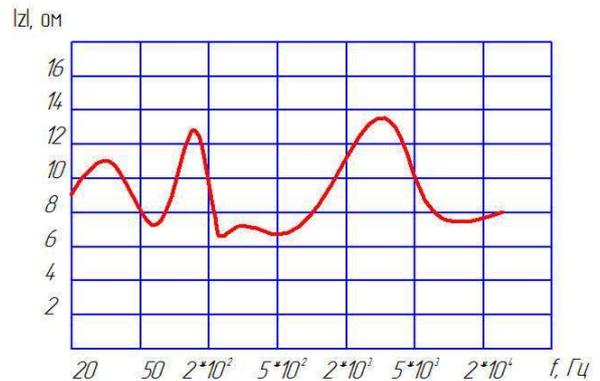


Рис. 3. Частотная зависимость модуля полного сопротивления АС

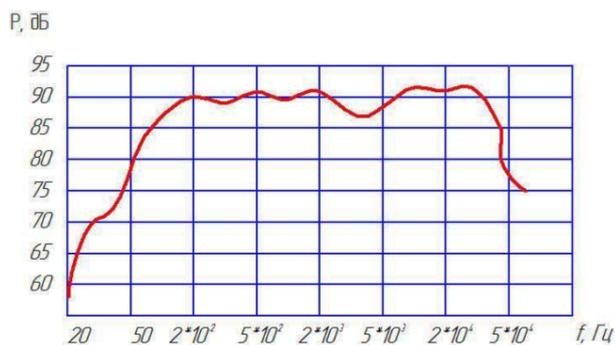


Рис. 4. АЧХ АС по звуковому давлению

Нижний блок (сабвуфер): номинальная мощность – 30 Вт; паспортная мощность – 50 Вт; номинальное сопротивление - 8 Ом; диапазон воспроизводимых частот 25-200 Гц; уровень характеристической чувствительности – 91 дБ; габариты – 80\*21,5\*28,5 см. Частотные зависимости модуля полного сопротивления и звукового давления (АЧХ) приведены на рис. 5 и 6.

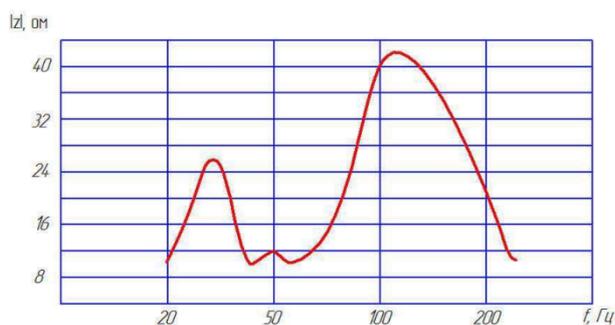


Рис. 5. Частотная зависимость модуля полного сопротивления сабвуфера

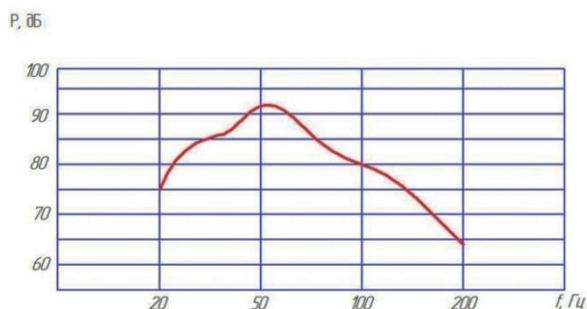


Рис. 6. АЧХ сабвуфера по звуковому давлению

При использовании в сабвуфере встроенного усилителя с регулируемым фильтром частота среза на АЧХ может меняться в пределах 80-300 Гц. Габариты АС в сборе – 140\*21,4\*28,5 см; масса – 20 кг. Корпус АС выполнен из MDF-плиты толщиной 18 мм (материала с высоким декрементом затухания) усилен изнутри ребрами жесткости. Лабиринт и

объемы сабвуфера частично заполнены звукопоглощающим материалом. В нижней части сабвуфера предусмотрен отсек для установки усилителя, фильтров и разъемов. АС установлена на «шипы», позволяющие изолировать вибрации корпуса от пола помещения и обеспечить эффективное НЧ излучение трубы фазоинвертора. Корпус АС отделан шпоном ценных пород дерева. Фронтальная поверхность верхнего блока закрыта съемной декоративной рамкой, обтянутой специальным материалом, обладающим высокой акустической прозрачностью.

## Выводы

Анализ частотных зависимостей  $|Z|$  и  $P$  показывает правильность расчета и настройки лабиринта и полосового резонатора. Отмечен высокий уровень звукового давления, сравнимого с аналогичным параметром отечественных АС с диаметром НЧ ГГ 31,5 см и объемом 65-100 дм<sup>3</sup>. Это позволяет с успехом использовать разработанные АС не только в системах ДК, но и в Hi-Fi – трактах, в том числе с ламповыми усилителями, работающими в классе А и обладающими невысокой мощностью. Наблюдается неравномерность АЧХ  $\pm 3$  дБ на средних частотах и провал – 4 дБ в области частоты раздела фильтров  $\sim 4$  КГц. Для устранения неравномерности АЧХ следует продолжить доработку ГГ 25ГДШ-9Д или использовать более качественные (и дорогие) излучатели. Дальнейшая работа по подбору ВЧ ГГ с более низкой резонансной частотой (например, «Vifa» D19SD-05-08 с резонансной частотой – 1600Гц) позволит значительно снизить частоту раздела, что наряду с правильным выбором порядков фильтров улучшит АЧХ в этой частотной области.

## Литература

1. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. 872 с.
2. Бадаев А.С. Акустическая трансмиссионная линия // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. С. 139-145.
3. Beranek L.L., Mellow T.J. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Oxford GB: Academic Press, 2012. 678 p.
4. Бадаев А.С. Разделительные фильтры для высококачественной двухполосной акустической системы // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: «Во-

ронежский государственный технический университет», 2006. С. 268–273.

5. Бадаев А.С. Полосовой громкоговоритель четвертого порядка // Проектирование радиоэлектронных и ла-

зерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. С. 273–276.

Поступила 05.04.2018; принята к публикации 20.07.2018

#### Информация об авторах

**Бадаев Андрей Станиславович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru

## FRONT ACOUSTIC SYSTEMS FOR HOME CINEMA

**A.S. Badaev**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** in this paper, the methods for calculating the acoustic design of the type "acoustic transmission line (acoustic labyrinth)" and "bandpass resonator" are presented. It is shown that the optimal length of the labyrinth in terms of sound pressure level, efficiency, radiated acoustic power and minimal distortion is a quarter of the sound wave emitted by the loudspeaker head (LH) at the frequency of its main resonance, and its cross-sectional area is equal to the effective area of the diffuser LH. At the same time, the input resistance of the labyrinth is maximal and has a purely active character, its behavior is similar to a parallel electric circuit tuned to resonance. At the frequency of this resonance, the labyrinth tube intensively emits sound energy into the surrounding space, and the amplitude of the oscillations of the diffuser LH is minimal, as a result, distortions sharply decrease. The proposed method for calculating the fourth-order bandpass resonator (BR) used as the acoustic design of the speaker subwoofer is based on the representation of the BR as a LH, installed in a closed case (rear camera) and loaded on a case with a bass reflex (front camera). Taking into account the effect of air spring elasticity in the back chamber on the parameters of the LH and their choice, it was possible to calculate the BR with high sound pressure and efficiency, without compromising the transient characteristics. On the basis of the proposed methodologies, speakers were developed for a home theater, the feature of which is the use of two units that are structurally connected in one block, the speaker itself and an active subwoofer, implemented on the basis of different design of the labyrinth and band resonator. The technical parameters and characteristics of the developed systems are presented. Analysis of the measurement results shows the correct calculation of the speakers, marked by a high level of sound pressure and good sound quality developed by the acoustic systems

**Key words:** home theater systems, acoustic systems, acoustic transmission line, acoustic labyrinth, bandpass filter, loudspeaker heads

#### References

1. Aldoshina I.A., Vologdin E.I., Efimov A.P. et. al., ed. Kovalgin Yu.A. "Electroacoustics and sound broadcasting: Manual" ("Elektroakustika i zvukovoe veshchanie: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, goryachaya liniya - Telecom, Radio i svyaz', 2007, 872 p.
2. Badaev A.S. "Acoustic transmission line", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: intercollegiate collection of scientific works (Proektirovanie radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2007, pp. 139-145.
3. Beranek L.L., Mellow T.J. "Acoustics: sound fields and transducers", Oxford GB, Academic Press, 2012, 678 p.
4. Badaev A.S. "Separating filters for high-quality two-way speaker system", *Problems of ensuring the reliability and quality of devices of devices and systems: interuniversity collection of scientific works (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2006, pp. 268-273.
5. Badaev A.S. "Fourth order band loudspeaker", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: intercollegiate collection of scientific works (Proektirovanie radioelektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2007, pp. 273-276.

Submitted 05.04.2018; revised 20.07.2018

#### Information about the author

**Andrey S. Badaev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: andrbad56@yandex.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ПО КРИТЕРИЯМ ВНУТРИАППАРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В.В. Глотов, М.А. Ромашенко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в различных электронных средствах относится к одной из наиболее актуальных тем на сегодняшний день по причинам увеличения общего количества электронных средств и их миниатюризации. В радиотехнике широко распространен тип оптимизационных задач для рационального перераспределения. Для таких задач необходимо наличие трех элементов: цель, ограничения и переменные параметры. Задачи оптимизации, как правило, решаются на двух иерархических уровнях. По мере того, как задачи оптимизации распространялись в различных научных направлениях, разрабатывались соответствующие математические методы. Простейшим и самым ранним является метод дифференцирования целевой функции, полученной с учетом ограничений, и приравнивание производной к нулю. Этот метод оптимизации наиболее распространен в радиотехнике и, в частности, в задачах оптимизации с использованием критериев ЭМС. В более сложных задачах используются методы множителей Лагранжа, методы динамического, линейного, квадратичного, выпуклого, геометрического программирования, максимального метода. Однако выбор чаще всего осуществляется субъективно и не всегда наилучшим образом. Анализ обеспечения электромагнитной совместимости в различных электронных устройствах показал, что при разработке любого электронного инструмента наибольшее внимание следует уделять проектированию печатных плат. Поэтому разработчик может заранее определить проблемные области печатной платы на ранних стадиях. Это позволит инженеру сократить время производства электронного оборудования и снизить затраты на создание этого продукта

**Ключевые слова:** проектирование радиоэлектронных средств, помехозащищенность, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, методы проектирования, оптимизация

### Введение

Под оптимизацией будем понимать изыскание наилучших технических решений, наивысшей эффективности РЭС путем математического расчета оптимальных параметров при принятых ограничениях. В результате оптимизации вырабатываются обоснованные рекомендации для разработки и проектирования. Более того, оптимизация – один из важнейших этапов проектирования. Актуальность оптимизации в радиотехнике на первом этапе можно доказывать на примере двух крайних случаев [1].

При массовом производстве радиоаппаратуры может происходить «самооптимизация» за счет конкуренции и быстрой сменяемости типов продукции. Однако из-за отсутствия точных математически обоснованных рекомендаций параметры изделий, как правило, отличаются от оптимальных значений. С учетом массовости изделий за счет оптимизации может быть получен значительный экономический эффект.

Уникальные РЭС создаются малыми сериями, отличаются дороговизной, эксплуатиру-

ются сравнительно долго (к примеру, наземные средства космического назначения могут работать двадцать и более лет) [2]. За время их эксплуатации происходит почти полная смена элементной базы, разрабатываются новые принципы действия и использования. Поэтому растет значение теоретических исследований и оптимизации в том числе. Число таких случаев сравнительно невелико, однако выигрыш за счет оптимизации значителен на каждом экземпляре.

Постановка и решение задач на оптимизацию не являются тривиальными. Это еще одна из причин неширокого распространения оптимизации в радиотехнике, тем более в ЭМС. Для постановки и решения оптимизационных задач требуется глубокое знание объектов исследования, умение их анализировать целенаправленно так, чтобы вскрыть необходимые связи и зависимости и подобрать адекватный математический аппарат.

В радиотехнике распространен тип оптимизационных задач на рациональное перераспределение [3]. Для таких задач обязательно существование трех элементов: цели, ограничения и варьируемых параметров. Отсутствие хотя бы одного элемента лишает постановку задачи смысла.

Задачи на оптимизацию, как правило, решаются на двух иерархических уровнях. Например, найти такие оптимальные параметры радиотехнических устройств, чтобы получить наибольшую ее дальность действия при ограниченной стоимости (или другого ресурса).

По мере распространения оптимизационных задач в различных научных направлениях развивались соответствующие математические методы [4]. Простейший и наиболее ранний из них – метод дифференцирования целевой функции, полученной с учетом ограничений, и приравнивания производной нулю. Этот метод оптимизации наиболее распространен в радиотехнике и, в частности, в задачах оптимизации с применением критериев ЭМС [5].

В более сложных задачах используются методы множителей Лагранжа, методы динамического, линейного, квадратичного, выпуклого, геометрического программирования, метод максимума [6]. Разнообразие большое, однако выбор чаще всего осуществляется субъективно, не всегда лучшим образом, оправдывается тогда, когда приводит к постановке и решению задачи.

Так, для решения многомерных задач на перераспределение ресурсов можно остановиться, например, на методах множителей Лагранжа, динамическом или геометрическом программировании.

Выбор математического метода и целенаправленный анализ изучаемого объекта в большинстве случаев образуют итерационный процесс, в котором не всегда видны приоритеты: так, целенаправленный анализ априорно ведется под использование какого-то математического метода, пригодность метода определяется результатами анализа объекта [7]. Эти операции могут повторяться.

### Оптимизация радиоприемного устройства как многомерного фильтра

Радиоприемное устройство представим как совокупность идеальных фильтров. Идеальным будем считать фильтр с П-образной характеристикой избирательности. В этом случае каждому из параметров  $X_i$  обеспечивается П-образная одномерная характеристика:

$$k(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_{0i} - \Delta X_i/2 \leq x_i \leq x_{0i} + \Delta X_i/2) \\ 0 & (x_i < x_{0i} - \Delta X_i/2, x_i > x_{0i} + \Delta X_i/2) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $\Delta X_i$  – полоса пропускания фильтра;  $x_{0i}$  – параметр настройки фильтра.

Идеальный многомерный фильтр, каким мы представляем радиоприемное устройство, является совокупностью из  $n$  последовательно соединенных одномерных фильтров, осуществляющих взаимно независимо фильтрацию сигнала по  $n$  параметрам.

Фильтр  $n$ -мерный «вырезает» в  $n$ -мерном пространстве некоторый объем, содержащий точку, координаты которой обозначают параметры полезного сигнала [8]. Этот объем  $\Delta V = \Delta X_1 \Delta X_2 \dots \Delta X_i \dots \Delta X_n$  можно назвать объемом прозрачности  $n$ -мерного фильтра.

Можно рассчитать вероятность ЭМС, представленную соотношением, например (1). Если ЭМС обеспечена ( $v_0 \rightarrow 1$ ), то для  $n$ -мерного фильтра можно с достаточной точностью записать соотношение:

$$\mathcal{G}_0 = 1 - N \prod_{i=1}^n \beta(\Delta X_i) \quad (2)$$

Если распределения параметров внутри своих диапазонов равномерны по всем  $X_i$ , то приведенную выше формулу можно переписать в виде:

$$\frac{Dx_1}{\Delta X_1} \cdot \frac{Dx_2}{\Delta X_2} \dots \frac{Dx_i}{\Delta X_i} \dots \frac{Dx_n}{\Delta X_n} = \frac{N}{1 - \mathcal{G}_0} \quad (3)$$

Для постановки задачи оптимизации необходимо иметь еще одну связь, которую можно получить, применив стоимостный критерий. Для значений  $x_i$ , близких к оптимальным, составим линейную комбинацию:

$$\alpha_1 \frac{Dx_1}{\Delta X_1} + \alpha_2 \frac{Dx_2}{\Delta X_2} + \dots + \alpha_i \frac{Dx_i}{\Delta X_i} + \dots + \alpha_n \frac{Dx_n}{\Delta X_n} = C', \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  – удельные стоимости фильтров;  $C'$  – стоимость  $n$ -мерного фильтра, зависящая от варьируемых параметров, в данном случае от  $Dx_i / \Delta X_i$ .

Соотношения (3) и (4) можно использовать для постановки задач оптимизации:

1) Найти:

$$\frac{N}{1 - \mathcal{G}_0} = \prod_{i=1}^n \frac{Dx_i}{\Delta X_i} \quad (5)$$

если стоимость задана:

$$\sum \alpha_i \frac{Dx_i}{\Delta X_i} = C'_3 \quad (6)$$

2) минимизировать стоимость

$$\min C'_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{Dx_i}{\Delta X_i}, \quad (7)$$

если отношение  $N/(1 - \mathcal{G}_{03})$  задано.

Это отношение однозначно связано с  $\mathcal{G}_0$  в данной электромагнитной обстановке, поэтому можно считать вероятность ЭМС заданной  $\mathcal{G}_{03}$ . Таким образом:

$$\frac{N}{1 - \mathcal{G}_{03}} = \prod_{i=1}^n \frac{Dx_i}{\Delta X_i} \quad (8)$$

Получены функции целей и ограничения в двух постановках задачи, в которые составной частью входят варьируемые параметры  $Dx_i / \Delta X_i$ .

### Решение задачи в первой постановке

Выберем именно этот метод, считая его наиболее экономным в вычислительном отношении. Ориентируясь на применение этого метода, произведем формализацию задачи [9].

Умножим (8) на число  $\prod_{i=1}^n \alpha_i$  и введем обозначения:

$$y_i = \alpha_i \frac{Dx_i}{\Delta X_i}; \quad e^\beta = N \prod_{i=1}^n \alpha_i / (1 - \mathcal{G}_0). \quad (9)$$

Получим из (8) и (9)

$$\prod_{i=1}^n y_i = e^\beta; \quad \sum_{i=1}^n y_i = C'_3. \quad (10)$$

Первое из этих соотношений прологарифмируем и еще раз запишем формулировку задачи оптимизации в первой постановке.

Требуется найти  $\max \sum_{i=1}^n \ln y_i = \beta$ , если

$\sum_{i=1}^n y_i = C'_3$ , путем расчета оптимального  $y_i > 0$  при  $\beta > 0$ .

Принцип оптимальности динамического программирования гласит: оптимальная программа имеет то свойство, что каково бы ни было первоначальное соотношение и начальный выбор, остающиеся выборы должны составить оптимальную программу по отношению к состоянию, полученному в результате первого выбора.

Алгоритм решения записывается обычно в виде рекуррентного соотношения и решается последовательно (шагами), при этом каждый шаг уменьшает мерность задачи на единицу. Так n-мерная задача превращается в n сравнительно простых одномерных задач. В этом состоит преимущество данного метода в сравнении с известным методом применения множителей Лагранжа, при котором вычисления сводят к решению системы из n уравнений [10].

Для нашего случая порядок решения можно записать в виде рекуррентного уравнения:

$$f_n(C'_3) = \max (f_n(y) + f_{n-1}(C'_3 - y)) \quad (n = 2, 3, \dots, n),$$

$$f_1(C'_3) = \ln C'_3 \quad (n = 1) \quad (11)$$

Первый шаг выполним с помощью второго соотношения для  $n=1$ . На первом шаге предполагается, что как бы существует только один фильтр, и вся стоимость  $C'_3$  приходится на него. При  $n=1$  получим  $y_{1opt} = C'_3$ ,  $\max \beta = \ln C'_3$ .

На втором шаге ( $n=2$ ) рассчитывается  $y_{2opt}$  и  $\max \beta$  в предположении, что существуют только два фильтра, при этом второй как бы подсоединяется к первому. Пользуясь первым рекуррентным соотношением, находим при  $n=2$

$$y_{2opt} = C'_3 / 2, \quad \max \beta = 2 \ln(C'_3 / 2). \quad (12)$$

После третьего шага аналогично получим при  $n=3$ :

$$y_{3opt} = C'_3 / 3, \quad \max \beta = 3 \ln(C'_3 / 3). \quad (13)$$

Вычисления на первых трех шагах дают основание сделать обобщение для любого числа n фильтров, т.е. при  $n=n$  запишем

$$y_{nopt} = C'_3 / n, \quad \max \beta = n \ln(C'_3 / n). \quad (14)$$

В первоначальных обозначениях получим

$$\left(\frac{Dx_i}{\Delta X_i}\right)_{opt} = \frac{C_3}{nx_i}; \quad \max \frac{N}{1-\vartheta_0} = \left(\frac{C_3}{n}\right)^n / \prod_{i=1}^n \alpha_i. \quad (15)$$

### Решение задачи во второй постановке

Во второй постановке задачи требуется минимизировать стоимость  $C'$ , если задано значение  $\vartheta_0$ . С целью формализации введем обозначения:

$$y_i = \alpha_i \frac{Dx_i}{\Delta X_i}; \quad x_i = \ln y_i \text{ или } y_i = e^{x_i}, \quad \alpha = N \prod_{i=1}^n \alpha_i / (1-\vartheta_0); \quad A = \ln \alpha$$

Подставим эти значения в (14) и (15). Получим:

$$C' = \sum_{i=1}^n e^{x_i}; \quad A = \sum_{i=1}^n x_i \quad (16)$$

Сформулируем задачу оптимизации в формализованном виде: требуется найти

$$\min C' = \sum_{i=1}^n e^{x_i}, \quad \text{если существует ограничение}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = A, \quad \text{где } i = 1..n, \quad A > 0 - \text{постоянное}$$

число,  $x_i > 0$ .

Следуя методике динамического программирования, запишем рекуррентное соотношение:

$$f_n(A) = \min(f_n(x) + f_{n-1}(A-x)) \quad (n=2,3,\dots,n) \quad (17)$$

$$f_1(A) = e^A \quad (n=1).$$

Для составления (16) и (17) требуется определенная внимательность. Действуя так же, как в первой постановке задачи, получим:

$$y_{nopt} = N \prod_{i=1}^n \alpha_i / (1-\vartheta_0)^{1/n}; \quad \min C' = ny_{nopt} \quad (18)$$

Или в первоначальных обозначениях:

$$(Dx_i / \Delta X_i)_{opt} = (N \prod_{i=1}^n \alpha_i / (1-\vartheta_0))^{1/n} / \alpha_i;$$

$$\min C' = n(N \prod_{i=1}^n \alpha_i / (1-\vartheta_0))^{1/n}. \quad (19)$$

### Выводы

Получены, таким образом, удобные для расчета оптимальных параметров формулы. Так, более простым методом является дифференцирование целевой функции в задачах оптимизации с использованием критериев ЭМС. В более сложных задачах используются методы множителей Лагранжа, методы динамического, линейного, квадратичного, выпуклого, геометрического программирования, максимального метода. Данные результаты позволяют инженеру-конструктору сокращать время проектирования электронного средства.

### Литература

1. Ромашенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. 36 с.
2. Макаров О.Ю., Муратов А.В., Ромашенко М.А. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.
3. Ромашенко М. А. Основные подходы к решению задач внутрикомпонентной электромагнитной совместимости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 67-70.
4. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «ГруппаИДТ», 2007. 616 с.
5. Электронный каталог Лаборатория ЭМС. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.emc-problem.net>.
6. Ромашенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 106-109.
7. Суриков В.В. Электромагнитная совместимость приемно-передающих устройств, расположенных на элементах конструкций сложной формы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.03. СПб, 2010. 36 с.
8. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.
9. Ромашенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-р техн. наук: 05.12.04. Воронеж, 2014. 36 с.
10. Ромашенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92-95.

Поступила 20.04.2018; принята к публикации 20.07.2018

### Информация об авторах

**Глозов Вадим Валерьевич** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [vadik-livny@mail.ru](mailto:vadik-livny@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

Ромашенко Михаил Александрович - д-р техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

## OPTIMIZATION OF RADIOELECTRONIC COMPONENTS ACCORDING TO CRITERIA FOR INTRA-APPARATUS-ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

V.V. Glotov, M.A. Romashchenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the provision of electromagnetic compatibility in various electronic media is one of the most topical issues for today due to the increase in the total number of electronic media and their miniaturization. In radio engineering, the type of optimization problems for rational redistribution is widespread. For such tasks, three elements are necessary: a goal, constraints and variable parameters. Tasks of optimization, as a rule, are solved at two hierarchical levels. As the optimization tasks spread in various scientific directions, appropriate mathematical methods were developed. The simplest and the earliest is the method of differentiating the objective function obtained with allowance for constraints, and equating the derivative to zero. This method of optimization is most common in radio engineering and, in particular, in optimization problems using EMC criteria. In more complex problems, the methods of Lagrange multipliers, the methods of dynamic, linear, quadratic, convex, geometric programming, the maximum method are used. However, the choice is most often made subjectively and not always in the best way. The analysis of the provision of electromagnetic compatibility in various electronic devices has shown that the development of any electronic instrument should pay the greatest attention to the design of printed circuit boards. Therefore, the developer can determine in advance the problem areas of the printed circuit board in the early stages. This will allow the engineer to reduce the time of production of electronic equipment and reduce the cost of creating this product

**Key words:** design of radioelectronic facilities, noise immunity, noise stability, electromagnetic compatibility, design methods, optimization

### References

1. Romashchenko M.A. "Methods for the optimal design of radioelectronic facilities with electromagnetic compatibility and noise immunity: Author's abstract. of Dr. techn. Sciences dis." ("Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruktsey radioelektronnykh sredstv s uchedom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk"), Voronezh, 2014, 36 p.
2. Makarov O.Yu., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods for providing intra-equipment electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic devices: monograph" ("Metody obespecheniya vnutriapparturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktseyakh elektronnykh sredstv: monografiya"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2013, 234 p.
3. Romashchenko M.A. "The main approaches to the solution of problems of intracomponent electromagnetic compatibility", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 67-70.
4. Kechiev L.N. "Designing printed circuit boards for digital high-speed equipment", Moscow, "GruppaIDT", 2007, 616 p.
5. "Electronic Catalog of EMC Laboratory", available at: <http://www.emc-problem.net>.
6. Romashchenko M.A. "The main tasks of the analysis of the provision of EMC in the designs of RES and the principles of its implementation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.
7. Surikov V.V. "Electromagnetic compatibility of receiving and transmitting devices located on the elements of structures of complex shape: the author's abstract of cand. tech. Sciences dis." ("Elektromagnitnaya sovmestimost' priyemno-peredayushchikh ustroystv, raspolozhennykh na elementakh konstruktsey slozhnoy formy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk"), St. Petersburg, 2010, 36 p.
8. Knyazev A.D., Kechiev L.N., Petrov B.V. "Designing radio and electronic computers with allowance for electromagnetic compatibility" ("Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno- vychislitel'noy apparatury s uchedom elektromagnitnoy sovmestimosti"), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 224 p.
9. Romashchenko M.A. "Methods of optimal design of radio electronic devices with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity: the author's abstract of Dr. Tech. Sciences dis." ("Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruktsey radioelektronnykh sredstv s uchedom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti: avtoref. dis. d-r tekhn. nauk"), Voronezh, 2014, 36 p.
10. Romashchenko M.A. "A technique for analyzing the noise immunity of printed circuit boards in the design of a computer with EMC taken into account", *Radio techniques (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 92-95.

Submitted 20.04.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Vadim V. Glotov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

## БЫСТРЫЙ ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ С КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

В.П. Литвиненко, Е.А. Бокова, А.О. Апалихин, С.В. Шкильная

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается аппаратная реализация и применение быстрого цифрового алгоритма демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией (КАМ) на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Он требует формирования аналого-цифровым преобразователем по четыре отсчета на период центральной частоты с последующим их накоплением в квадратурных каналах на интервале длительности информационного символа. Приведено описание алгоритма обработки отсчетов сигнала, рассмотрена его структурная схема. На основе быстрого цифрового алгоритма когерентной обработки узкополосных сигналов предложен простой цифровой демодулятор сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией, допускающий эффективную реализацию на современных программируемых логических интегральных схемах. На исследуемый демодулятор получен патент РФ. Для его реализации на ПЛИС на языке VHDL разработано описание алгоритма демодуляции, проведен синтез HDL-кода и моделирование в пакете прикладных программ при фиксированных параметрах сигнала. Проводится сравнение разнообразных серий современных ПЛИС фирмы ALTERA для различных параметров обрабатываемого сигнала. Приводится выражение для расчета вероятности ошибки демодуляции, показано, что предлагаемый демодулятор обеспечивает потенциальную помехоустойчивость. Методами статистического имитационного моделирования в системе MATLAB/Simulink проверяется работоспособность реализации демодулятора на базе ПЛИС, исследуется его помехоустойчивость при различных параметрах сигнала. Результаты исследований свидетельствуют о возможности аппаратной реализации предлагаемого демодулятора

**Ключевые слова:** квадратурно-амплитудная манипуляция, цифровая демодуляция, ПЛИС, VHDL, Verilog, MATLAB

### Введение

Квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ, Quadrature Amplitude Modulation - QAM) широко применяется в системах передачи дискретных многопозиционных сигналов по проводным и радиоканалам [1-3], обеспечивая высокую скорость передачи информации и спектральную эффективность [1]. К недостаткам известных устройств их демодуляции следует отнести аналоговую обработку сигнала с необходимостью компенсации амплитудной неидентичности квадратурных каналов и других погрешностей, а также сложность цифровой реализации процедуры обработки сигнала с большим числом арифметических операций на каждый поступивший отсчет и необходимостью использования для этого высокоскоростных вычислителей.

На основе быстрого цифрового алгоритма когерентной обработки узкополосных сигналов [4] в [5] предложен простой цифровой демодулятор сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией, допускающий эффективную реализацию на современных программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС).

### Алгоритм демодуляции сигналов с КАМ

Сигнал с квадратурной амплитудной модуляцией имеет вид:

$$x(t) = A(t)\cos(\omega_0 t) + B(t)\sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

где  $A(t)$  и  $B(t)$  - амплитуды его синфазной и квадратурной составляющих, которые принимают дискретные значения в соответствии с модулирующим цифровым сигналом  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  - несущая частота.

Например, при формировании шестнадцатипозиционного сигнала с КАМ (КАМ16) передаваемый четырехбитовый двоичный код делится на две двухбитовые комбинации 00, 01, 10 и 11, в соответствии с которыми амплитуды  $A(t)$  или  $B(t)$  независимо друг от друга принимают значения, например,  $-3U$ ,  $-U$ ,  $U$  и  $3U$  соответственно ( $U$  - заданная величина).

Значения амплитуд синфазной и квадратурной составляющих отображаются точками на плоскости (А, В) в виде сигнальной диаграммы, которую называют «созвездием», для их временного описания используют «глазковую диаграмму».

Длительность информационного символа  $\tau = NT$ ,  $T = 1/f_0$  - период несущей,  $N = 2^n$  - число периодов,  $n$  - целое число.

### Демодулятор

Структурная схема цифрового демодулятора сигнала с КАМ показана на рис. 1.

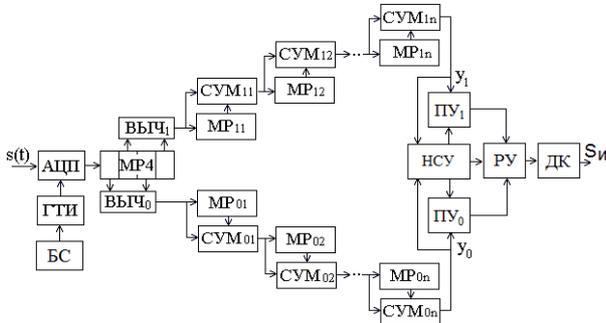


Рис. 1

Входной сигнал  $s(t)$  вида (1) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), управляемого генератором тактовых импульсов (ГТИ) с частотой  $f_{KB} = 4f_0$  и формируется по четыре отсчета  $s_{i0}, s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}$  на каждый  $i$ -й период сигнала. Синхронность ГТИ с принимаемым сигналом обеспечивается блоком синхронизации БС. Полученные отсчеты записываются в многоразрядный регистр сдвига на четыре отсчета (MP4), после чего запускается быстрая вычислительная процедура [4] накопления разностей отсчетов квадратурных каналов  $(s_{i,2} - s_{i,0})$  и  $(s_{i,3} - s_{i,1})$  за последние  $N$  периодов вида

$$y_{i0} = \sum_{j=0}^{N-1} (s_{(i-j),2} - s_{(i-j),0}), \quad (2)$$

$$y_{i1} = \sum_{j=0}^{N-1} (s_{(i-j),3} - s_{(i-j),1}). \quad (3)$$

В вычитателях ВЫЧ<sub>0</sub> и ВЫЧ<sub>1</sub> определяются разности четных и нечетных отсчетов, которые суммируются с содержимым многоразрядных регистров MP<sub>01</sub> и MP<sub>11</sub>, каждый из которых содержит одно полученное при обработке предыдущего периода значение разностей, и формируются суммы разностей отсчетов двух соседних периодов. После этого новые значения разностей отсчетов записываются в MP<sub>01</sub> и MP<sub>11</sub>, заменяя их предыдущее содержимое. Затем в сумматорах СУМ<sub>01</sub> и СУМ<sub>11</sub> и многоразрядных регистрах сдвига MP<sub>02</sub> и MP<sub>12</sub> рассчитываются суммы четырех соседних разностей отсчетов. Далее работа устройства повторяется, в результате на выходах каналов квадратурной обработки формируются отклики  $y_{i,0}$  (2) и  $y_{i,1}$  (3).

Решение о принятом информационном

коде в каждом канале принимается в пороговых блоках ПУ<sub>0</sub> и ПУ<sub>1</sub> в момент окончания символа по значениям откликов квадратурных каналов  $y_{i,0}$  и  $y_{i,1}$  сравнением их с пороговыми уровнями, для КАМ16 равными 0 и  $\pm 2U$ . Решение о принятом символе формируется в решающем блоке РУ и декодере ДК. Нормирующее и синхронизирующее устройство (НСУ) обеспечивает тактовую синхронизацию демодулятора.

Благодаря операциям суммирования (2), (3) в демодуляторе наблюдается нормализация негауссовских помех.

Рассматриваемое устройство может быть реализовано на базе современных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), тем самым обеспечивается обработка сигнала с КАМ с центральной частотой  $f_0$  до нескольких десятков мегагерц.

### Реализация на ПЛИС

На данный момент актуальной задачей является реализация алгоритма КАМ на базе ПЛИС. Была выбрана ПЛИС четвертого поколения фирмы ALTERA CYCLONE IV с отладочной платой DE0-nano.

Описание демодулятора реализовано в MATLAB/Simulink с помощью языка Verilog, полученная модель показана на рис. 2.

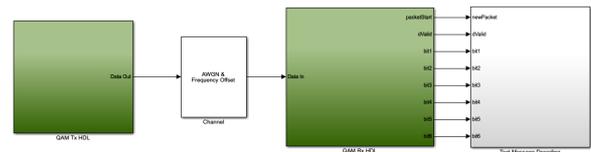


Рис. 2

### Моделирование демодулятора сигналов с КАМ в программе MATLAB

Для проверки реализации алгоритма демодуляции было проведено моделирование в пакете MATLAB с использованием аналоговых блоков. Модель демодулятора в программе MATLAB/Simulink показана на рис. 3.

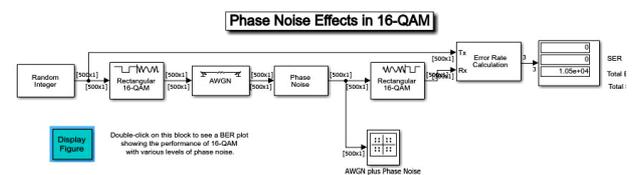


Рис. 3

В блоке диаграммы сигнального созвездия наблюдаем сигнал КАМ16, результат при отсутствии помех представлен на рис. 4.

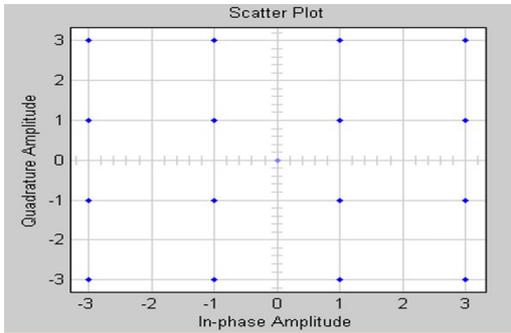


Рис. 4

На рис. 5 показана полученная в результате моделирования глазковая диаграмма сигнала КАМ16, а на рис. 6 – соответствующая диаграмма траекторий.

В рассматриваемом алгоритме амплитудная неидентичность квадратурных каналов отсутствует, так как соответствующие им сигналы формируются АЦП от общего входного сигнала.

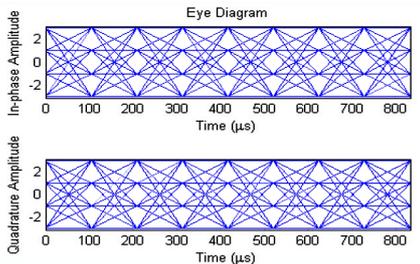


Рис. 5

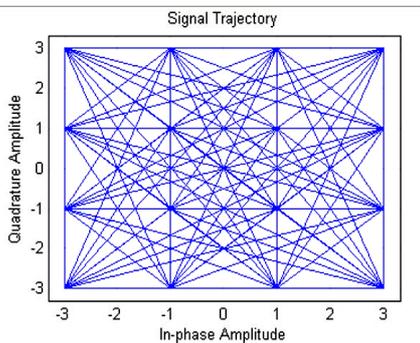


Рис. 6

**Оценка аппаратных затрат**

В таблице приведены результаты (используется/всего) количественной оценки требуемых аппаратных ресурсов (Slice Registers – D-

триггеры, Slice LUTs – коммутационные элементы, DSP – аппаратные умножители) для заданных параметров.

Как видно, выбранные ПЛИС используют незначительное количество внутренних ресурсов для реализации работы демодулятора, что позволяет увеличить число позиций сигнала с КАМ.

ПЛИС / ЭЛ-ты	Cyclone IV E EP4CE22F 17C6	Cyclone V 5CSEBA 6 U2317D К	Cyclone 10 LP 10CL120Y F780C8G
Slice Registers	867/22320 (3,88%)	763/4191 0 (1,82%)	763/86800 (1,06%)
Slice LUTs	5274/ 12064 (43,26%)	2891/220 00 (13,14%)	2891/42400 (6,81%)
DSP	4/16 (25%)	8/120 (6,66%)	8/260 (30,07%)

**Статистическое имитационное моделирование**

На рис. 7а и рис. 7б представлены полученные в результате статистического имитационного моделирования демодулятора при  $N = 64$  и отсутствии помех нормированные временные диаграммы откликов квадратурных каналов  $y_{i,0}/2NU$  и  $y_{i,1}/2NU$  соответственно, пунктиром показаны передаваемые сигналы  $A(t)/U$  и  $B(t)/U$ . Прямолинейная форма откликов характерна для устройств оптимальной обработки сигналов. Решения о принятых символах выносятся в моменты их окончания при целочисленных значениях  $i/N$ .

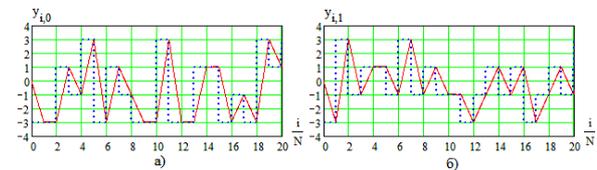


Рис. 7

На рис. 8 приведены «созвездия» нормированных результатов обработки сигналов с КАМ16 при отсутствии помех (рис. 8а) и при наличии гауссовской шумовой помехи (рис. 8б).

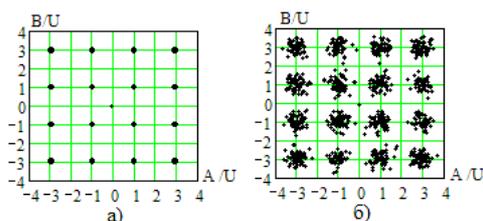


Рис. 8

### Помехоустойчивость демодулятора с КАМ

Для приближенной оценки помехоустойчивости сигнала с КАМ определим вероятность перехода передаваемого элемента «созвездия» за счет помех в соседние значения. В результате для вероятности ошибки получим

$$P_{ош} = 1 - [1 - 2Q(\sqrt{2}h_0)]^2, \quad (4)$$

где

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (5)$$

$h_0$  - выходное отношение сигнал/шум

$$h_0 = \sqrt{N} \frac{U}{\sigma_{ш}} \quad (6)$$

при минимальной амплитуде  $U$  входного сигнала в каждом квадратурном канале.

Для четырехпозиционной КАМ (10) совпадает с известным выражением для четырехпозиционной фазовой манипуляции (QPSK) [2, 3].

При многопозиционной КАМ амплитуды сигналов в квадратурных каналах случайны. В [2] предлагается использовать усредненные значения мощности сигнала по всем равновероятным вариантам амплитуд сигнала и вводится мощность  $P_0$  «базового сигнального импульса» с минимальной амплитудой  $U$  на входах квадратурных каналов, которая соответствует отношению сигнал/шум на выходе  $h_0$  (6).

Среднее значение мощности равновероятных сигналов для  $M$  - позиционной КАМ с созвездием вида рис. 4 равно

$$P_{CP} = \frac{M-1}{3} P_0. \quad (7)$$

Тогда для среднего значения отношения сигнал/шум получим

$$h = \frac{M-1}{3} h_0 \quad (8)$$

при этом вероятность ошибки из (4) равна

$$P_{ош} = 1 - \left[1 - 2Q\left(\sqrt{\frac{6}{M-1}}h\right)\right]^2. \quad (9)$$

Такие же результаты получены в [2] при оценке потенциальной помехоустойчивости аналогового демодулятора сигналов с КАМ, следовательно, рассматриваемый цифровой алго-

ритм демодуляции является оптимальным.

Зависимости  $P_{ош}$  от усредненного отношения сигнал/шум  $h$  для различных  $M$  показаны на рис. 9.

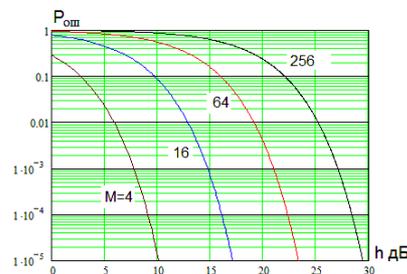


Рис. 9

Как видно, помехоустойчивость демодуляции сигналов с КАМ ухудшается с ростом числа позиций  $M$  (аналогичные результаты приведены в [1, 2] для аналоговых демодуляторов). При  $M=4$  сигнал с КАМ соответствует сигналу с четырехпозиционной фазовой манипуляцией (QPSK), при этом из (8)  $h = h_0$  и соответствующая кривая на рис. 10 отображает выражение (4).

### Выводы

Рассматриваемый быстрый цифровой алгоритм и соответствующее ему устройство цифровой демодуляции высокочастотных сигналов с КАМ требуют выполнения минимального числа вычислительных операций на период обрабатываемого сигнала и характеризуются простотой аппаратной реализации.

Рассмотрено влияние на вероятность ошибки сдвига фаз между принимаемым и тактовым сигналами, показано, что для многопозиционных сигналов с КАМ требования к точности фазовой синхронизации выше, чем при демодуляции двоичных сигналов.

Демодулятор обладает собственной частотной избирательностью, его частотные свойства согласованы с принимаемым сигналом. Демодулятор обеспечивает потенциальную помехоустойчивость в гауссовских шумах, а при негауссовских помехах наблюдается их нормализация.

### Литература

1. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра; под ред. В.И. Журавлева. М.: Радио и связь, 2000.
2. Прокис Д. Цифровая связь; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь. 2000. 800 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

4. Basic Algorithm for the Coherent Digital Processing of the Radio Signals/ A.N. Glushkov, V.P. Litvinenko, B.V. Matveev, O.V. Chernoyarov, A.V. Salnikova // Proceeding of the 2015 International Conference on Space Science & Communication. Malaysia, Langkawi, 2015. 5 p.

5. Пат. 2628427 Российская Федерация, Цифровой демодулятор сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией / Глушков А.Н., Литвиненко В.П.; заявитель

и патентообладатель Воронежский государственный технический университет № 2015126514; заявл. 02.07.2015; опубл. 13.01.2017. Бюл. № 2.

6. Системы автоматизированного проектирования фирмы Altera MAX+plus II и Quartus II. Краткое описание и самоучитель [Электронный ресурс] / Комолов Д.А и др. 2002. 13455 Кб.

Поступила 18.05.2018, принята к публикации 20.07.2018

#### Информация об авторах

**Литвиненко Владимир Петрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14) e-mail: litvinvp@gmail.com

**Бокова Екатерина Алексеевна** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bokova\_katya@list.ru

**Апалихин Андрей Олегович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: apalikhin@mail.ru

**Шкильная Светлана Владимировна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: shkilnuya@yandex.ru

### FAST DIGITAL SIGNAL DEMODULATION ALGORITHM WITH QUADRATURE AMPLITUDE MANIPULATION

V.P. Litvinenko, E.A. Bokova, A.O. Apalikhin, S.V. Shkil'naya

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the hardware implementation and application of the fast digital signal demodulation algorithm with quadrature amplitude manipulation (QAM) based on programmable logic integrated circuits (FPGAs) is considered. Based on the fast digital algorithm for coherent processing of narrowband signals, a simple digital signal demodulator with quadrature amplitude manipulation is proposed, which allows efficient implementation on modern programmable logic integrated circuits. The RF patent was obtained for the demodulator under study. For its implementation, a description of the demodulation algorithm is developed on the VHDL FPGA, the synthesis of HDL-code and modeling in the application package with fixed signal parameters is carried out. A comparison is made between different series of modern FPGAs by ALTERA for various parameters of the processed signal. An expression is given for calculating the probability of a demodulation error. Using the methods of statistical simulation in the MATLAB / Simulink system, the operability of the FPGA demodulator is checked, its noise immunity at various signal parameters is investigated. The results of the studies indicate the possibility of hardware implementation of the proposed demodulator

**Key words:** quadrature-amplitude manipulation, digital demodulation, FPGA, VHDL, Verilog, MATLAB

#### References

1. Feer K. "Wireless digital communication. Methods of modulation and spreading the spectrum" ("Besprovodnaya tsifrovaya svyaz'. Metody modulyatsii i rasshireniya spektra"), Moscow, Radio i svyaz', 2000.
2. Prokis D. "Digital communication" ("Tsifrovaya svyaz"), Moscow, Radio i svyaz', 2000, 800 p.
3. Sklyar B. "Digital communication. Theoretical bases and practical application" ("Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye"), Moscow, Vil'yams, 2003, 1104 p.
4. Glushkov A.N., Litvinenko V.P., Matveev B.V., Chernoyarov O.V., Salnikova A.V. "Basic algorithm for the coherent digital processing of the radio signals", *Proc. of the 2015 International Conference on Space Science & Communication*, Malaysia, Langkawi, 2015, 5 p.
5. Glushkov A.N., Litvinenko V.P., "Digital signal demodulator with quadrature amplitude manipulation" ("Tsifrovoy demodulyator signalov s kvadraturnoy amplitudnoy manipulyatsiyey"), patent RF #2628427, 2017
6. Komolov D.A. et. al. "Computer aided design Altera MAX+plus II and Quartus II. Brief description and tutorial", 2002

Submitted 18.05.2018, revised 20.07.2018

#### Information about the authors

**Vladimir P. Litvinenko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

**Ekaterina A. Bokova**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bokova\_katya@list.ru

**Andrey O. Apalikhin**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: apalikhin@mail.ru

**Svetlana V. Shkilnaya**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: shkilnuya@yandex.ru

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛИ, ИМИТИРУЮЩЕЙ ПОМЕХИ ПРИЕМА ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

А.Л. Неклюдов, А.А. Пирогов, Н.В. Ципина, И.С. Бобылкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в современном мире при приеме сигналов, несущих полезную информацию, в совокупности с главным сигналом одновременно фиксируются помехи самого разнообразного происхождения. К таким относят искажения полезных сигналов при влиянии различных возмущающих воздействий. Выделение полезной информационной составляющей из общего спектра детектированных сигналов, а также максимально эффективное подавление шумов и помех в рассматриваемом сигнале при сохранении его целостности являются одними из основных задач первичной обработки принимаемых сигналов. Представлены разработка и анализ модели, имитирующей помехи приема фазоманипулированных (ФМС) сигналов, необходимых для расчета электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств (ЭМС РЭС) и позволяющих оценить вероятность сбоя в тракте приема передачи информации при влиянии на него простых и сложных помех, двух- и четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов с различными формами элементарной посылки, а также других сигналов с учетом искажающего воздействия. Рассмотрена структурная схема модели системы связи с имитацией помех приема ФМС, представлены графики сигналов с бинарной частотной и линейно-частотной манипуляцией. В разработанной модели манипулятора помех предусматривается возможность формирования импульсов с заданной скважностью и внутримпульсной манипуляцией любым из доступных видов сигналов, а также может задаваться различный фронт импульса или быть сглаженным синусоидальным сигналом

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость РЭС, моделирование помех, фазоманипулированные сигналы, вероятность сбоя РЭА

### Введение

История использования фазоманипулированных сигналов насчитывает не одно десятилетие. Высокая эффективность, особенно для систем приема и передачи информации, которые составляют сейчас абсолютное большинство разрабатываемых и вводимых в эксплуатацию РЭС, способствует широкому распространению таких сигналов, а также развитию технологической базы их использования. Для демонстрации распространенности сигналов с фазовой манипуляцией достаточно упомянуть о том, что они применяются в системах радиорелейной, космической и сотовой связи, а также в сетях беспроводного доступа. В частности, бинарная и четырехпозиционная фазовые манипуляции (BPSK и QPSK), а также прямое расширение спектра (DSS) и применение сверточных кодов (т.е. согласованная фильтрация) предусматриваются спецификациями стандартов IEEE 802.11, которые реализуются в том числе и в РЭС военного назначения.

Существует множество подходов к исследованию проблематики ЭМС РЭС, наряду с ними широкое применение нашли методиче-

ские подходы, основанные на разработке имитационных моделей процессов формирования и обработки сигналов в радиоэлектронных устройствах [1].

### Обобщенная модель имитации воздействия помех

Для решения проблемы электромагнитной совместимости РЭА была разработана обобщенная модель, имитирующая воздействие помех на прием фазоманипулированного сигнала с отдельным рассмотрением прохождения по приемному тракту полезного и мешающего сигналов, а также с построением гистограмм уровней откликов и последующей их сверткой для определения вероятности сбоя за счет принимаемых помех. На рис. 1 представлена структурная схема моделируемой системы связи с учетом воздействия помех приема сигналов.

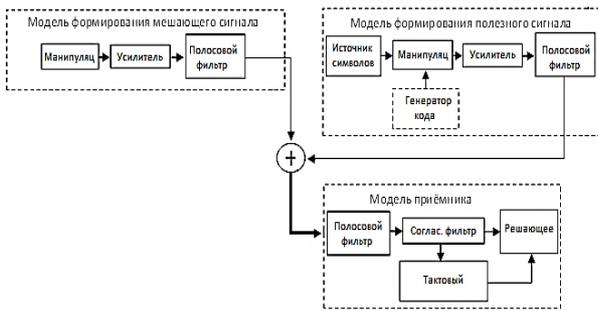


Рис. 1. Структурная схема модели системы связи с имитацией помех приема ФМС

В данной модели реализованы процедуры, программно имитирующие следующие виды манипуляции помех: четырехпозиционную фазовую манипуляцию (ФМн-2, ФМн-4, СФМн-4), манипуляцию с минимальным сдвигом, бинарную манипуляцию, линейно-частотную манипуляцию, двухпозиционную частотную манипуляцию (ЧМн-2), частотную манипуляцию гармоническим колебанием и пилообразным напряжением, манипуляцию, имитирующую генератор шума, а также импульсную манипуляцию.

Разработанная модель манипулятора помех предусматривает возможность формировать импульсы сигналов с заданной скважностью и с внутриимпульсной манипуляцией любым из доступных видов сигналов. Фронт импульса может задаваться различным или быть сглажен синусоидой, из этого следуют следующие соотношения (1-2):

для переднего фронта импульса:

$$F(t) = 0.5 \cdot U \left( 1 - \cos \left( \pi \frac{t}{T_{фр}^u} \right) \right) \quad (1)$$

для заднего фронта импульса:

$$F(t) = 0.5 \cdot U \left( 1 - \cos \left( \pi \frac{T^u - t}{T_{фр}^u} \right) \right), \quad (2)$$

при  $T^u$  – длительность импульса;

$T_{фр}^u$  – заданная длительность фронта импульса.

На рис. 2 представлен вид импульса линейно-частотной манипуляции (ЛЧМ-сигнала) с заданной длительностью фронта  $T_{фр}^u$ , равной 0,1 от общей длительности импульса  $T^u$ .



Рис. 2. Импульс линейно-частотной манипуляции сигнала

При сигналах двухпозиционной частотной манипуляции (ЧМн-2) генерируется частотно-манипулированный сигнал с постоянной фазой и переключением частот между:  $\omega_0 - D$  и  $\omega_0 + D$ , где  $\omega_0$  – несущая (центральная) частота сигнала;  $D$  – девиация частоты. На рис. 3 представлен спектр такого сигнала по оси времени.

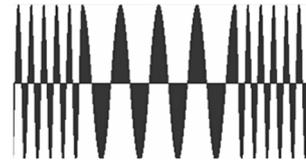


Рис. 3. Сигнал с бинарной частотной манипуляцией

При манипуляции линейно-частотных сигналов величина выходного напряжения, в пределах длительности импульса  $T$ , изменяется по соотношениям (3-4) для вещественного представления сигнала и для комплексного соответственно.

$$U(t) = U \cos \left( 2\pi t \left( f_0 + \frac{2D(t-T/2)}{T} \right) + \phi_0 \right) \quad (3)$$

$$s(t) = U e^{-i \left( 2\pi t \left( f_0 + \frac{2D(t-T/2)}{T} \right) + \phi_0 \right)} \quad (4)$$

где  $f_0$  – несущая частота сигнала;  
 $D$  – значение девиации частоты сигнала;  
 $\phi_0$  – начальная фаза сигнала.

Кроме импульсных линейно-частотно манипулированных сигналов, заданных соотношениями (3-4), также производится модуляция непрерывных сигналов, манипулированных по частоте пилообразным напряжением со свободным периодом, изменяющимся в пределах, как показано на рис. 4.

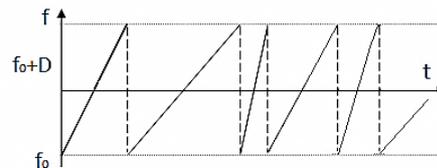


Рис. 4. Графическое изменение частоты сигнала  $f$ , манипулируемого по частоте пилообразным напряжением со случайным периодом

Также модель манипулятора способна

обрабатывать и формировать сигналы, манипулированные по частоте гармоническим колебанием, которые имеют вид, представленный соотношениями (5-6) [2].

Вещественная форма:

$$U(t) = U \cos(2\pi(f_0 + D \cos(2\pi f_m t + \varphi_{0m})) + \varphi_0) \quad (5)$$

Комплексная форма:

$$s(t) = U e^{-i(2\pi(f_0 + D \cos(2\pi f_m t + \varphi_{0m})) + \varphi_0)} \quad (6)$$

при  $f_m$  – частота манипулирующего колебания;

$\varphi_{0m}$  – начальная фаза манипулирующего колебания.

Моделирование генератора «белого шума» производится следующим образом: для постоянного неманипулированного сигнала в каждый дискрет времени задается вероятностное значение фазы в генераторе случайных чисел, и этот сигнал пропускается через выходной фильтр передатчика помехи [3].

В модели формирования помеховых воздействий осуществляется формирование гистограмм откликов на полезный сигнал и на сигнал непреднамеренных радиопомех, на основе которых осуществляется проведение необходимых исследований. Гистограмма откликов на полезный сигнал системы формируется на основе результатов снятия значения результирующего сигнала на выходе согласованного фильтра в моменты времени, определяемые процедурой тактовой синхронизации. Гистограмма откликов на непреднамеренные радиопомехи формируется с учетом несогласованности полезного и мешающего сигналов по времени и фазе [4]. Таким образом, снятие значения отклика на входе решающего устройства осуществляется для каждого дискретного отсчета времени и для 100 равномерно распределенных значений начальной фазы мешающего сигнала. Если предположить, что превышение уровня помехи над уровнем сигнала в большинстве случаев ведет к неправильному приему символа, то свертка полученных ги-

стограмм позволяет с большой долей вероятности оценить возможность возникновения сбоя из-за воздействия непреднамеренных радиопомех.

При моделировании предполагалось, что по мере дальнейших исследований новых типов НРП их модели будут дополняться соответствующими элементами и процедурами формирования сигналов.

## Заключение

В результате разработанная модель, имитирующая помеховые воздействия на системы связи фазоманипулированными сигналами, позволяет оценить влияние параметров НРП на вероятность сбоя РЭА и решать задачи организации обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и систем; моделировать процесс формирования простых и сложным помех, двух- и четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов с различными формами элементарной посылки, а также других сигналов с учетом искажающего воздействия.

Модель позволяет оценивать изменение сигнала за счет искажающих воздействий полосовых фильтров передатчика и приемника в системе связи, в основе которой лежат фазоманипулированные сигналы.

## Литература

1. Кремер И.Я., Владимиров В. И., Карпукhin В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов. М.: Сов. Радио, 1972. С. 72-76.
2. Ромашенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 106-109.
3. Макаров О.Ю. Основные принципы применения программных средств при решении задач обеспечения ЭМС и помехоустойчивости: учеб.-метод. пособие. Воронеж: ВГТУ, 2015. С. 39, 50-48.
4. Марков Ю.В. Проектирование устройств приема и обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал, 2015. С. 39-40.

Поступила 03.04.2018; принята к публикации 20.07.2018

## Информация об авторах

**Неклюдов Андрей Львович** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: an.necludow@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6007-793X>

**Пирогов Александр Александрович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Pirogov.alx@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Ципина Наталья Викторовна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Бобылкин Игорь Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru

## DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE MODEL IMITATING INTERFERENCE OF RECEPTION OF PHASE-ANIMATED SIGNALS TO PROVIDE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF RADIO ELECTRONIC DEVICES

**A.L. Neklyudov, A.A. Pirogov, N.V. Tshipina, I.S. Bobylkin**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** in the modern world, when receiving signals that carry useful information, in conjunction with the main signal simultaneously, interference of the most diverse origin is recorded. These include distortions of useful signals under the influence of various disturbing influences. The allocation of a useful information component from the general spectrum of detected signals, as well as the most effective suppression of noise and interference in the signal under consideration while maintaining its integrity, is one of the primary tasks of primary processing of received signals. The article presents the development and analysis of the simulation of the imitation interference of receiving phase-manipulated signals (PMS) necessary for calculating the EMC of REM and allowing one to estimate the probability of a failure in the transmission path of the information transfer, when simple and complex interference affects it, two and four-position phase-manipulated signals with various elementary forms sending, as well as other signals, taking into account the distorting effect. The structural scheme of the communication system model with imitation of interference of the PMS reception is considered, in addition, the graphs of the signals with binary frequency and linear frequency manipulation are presented. In the developed model of the manipulator of interferences it is possible to generate pulses with a predetermined duty cycle and intrapulse manipulation by any of the available kinds of signals, and also a different pulse front or a smoothed sinusoidal signal can be set

**Key words:** electromagnetic compatibility of REM, interference simulation, phase-manipulated signals, probability of failure of RED

### References

1. Kremer I.Ya., Vladimirov V.I., Karpukhin V.I. "Modulating (multiplicative) interference and reception of radio signals" ("Moduliruyushchie (multiplikativnye) pomekhi i priyem radiosignalov"), Moscow, Sov. Radio, 1972, pp. 72-76
2. Romashchenko M.A. "The main tasks of the analysis of the provision of EMC in the designs of REM and the principles of its implementation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.
3. Makarov O.Yu. "Basic principles of the application of software for solving problems of EMC and interference immunity: manual" ("Osnovnye printsipy primeneniya programmykh sredstv pri reshenii zadach obespecheniya EMS i pomekhustoychivosti: ucheb.-metod. posobie"), Voronezh, VSTU, 2013, no. 3, pp. 98-102.
4. Markov Yu.V. "Designing of devices for receiving and processing signals: manual" ("Proektirovanie ustroystv priyema i obrabotki signalov: ucheb.-metod. posobie"), Ekaterinburg, Ural, 2015, pp. 39-40.

Submitted 03.04.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Andrey L. Neklyudov**, Bachelor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: an.necludow@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6007-793X>

**Aleksandr A. Pirogov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Pirogov.alx@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Natalia V. Tshipina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

**Igor' S. Bobylkin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

**СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ 2G-4G СЕТЕЙ****О.В. Бойко<sup>1</sup>, Д.В. Журавлев<sup>1</sup>, И.А. Сафонов<sup>2</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** в современном мире системы подвижной сотовой радиосвязи развиваются бурными темпами и за свой 20-летний прогресс плотно вошли в жизнь человечества, охватив все сферы его деятельности. Система связи общего пользования стандарта GSM позволяет решать широчайший спектр задач, давно покинув пределы обычного голосового общения. Примером того может послужить дистанционное управление различными устройствами или же, например, мобильная система видеонаблюдения за объектом, GSM-«жучки» для определения его местонахождения. Вследствие постоянного расширения возможностей системы сотовой связи GSM возникает проблема рационального использования радиочастотного спектра. Особенности используемых при передаче данных стандартов 2G–4G в данной системе сотовой подвижной радиосвязи вызывают необходимость постоянной оценки качества связи в сотах. Для решения этих проблем необходима специально разработанная под требуемые задачи система мониторинга. Такие системы являются достаточно сложными техническими устройствами, в то же время отличающимися своей дороговизной. Сравнительно молодая технология SDR позволяет успешно решить требуемые задачи и организовать доступную систему мониторинга 2G–4G сетей. Кратко рассмотрено применение предложенного решения на примере анализа диапазона систем сотовой подвижной радиосвязи GSM-900, показан наиболее точный с технической стороны метод оценки важных параметров

**Ключевые слова:** программно-определяемое радио, система мониторинга, 2G-4G сети

**Введение**

Цифровые системы подвижной наземной радиосвязи постоянно развиваются во всем мире. Сотовая связь стандарта GSM имеет среди них наибольшие темпы [1-3]. Причина того заключается в уникальной особенности стандарта — внедрение новых функций и идей возможно без остановки эксплуатации уже используемого оборудования [2]. Кроме того, бурную эволюцию стандартов 2G-4G вызвал рост потребностей пользователей в качестве и объемах передаваемой информации по радиоканалам. Сегодня подвижная радиосвязь поднялась на качественно новый уровень, а скорость доступа выросла от 9,6 Кбит/с до 100 Мбит/с. Скорое внедрение стандарта 5G к 2020 году увеличит реальную скорость передачи данных до 1 Гбит/с. Согласно оценкам Международного союза электросвязи (2014 год), к 2020 году будет необходим ресурс от 1340 до 1960 МГц. Заметим, что всего несколько лет назад для этого хватало около 500 МГц [4], а это ведет к очередному агрегированию радиочастотного спектра [5]. Широкое использование абонентами стандартов прошлых поколений (2,5G, 3G, 3,5G), а также лавинообразное увеличение количества новых пользователей и терминалов (устройств интернета вещей) порождают

проблему рационального и эффективного использования частотного диапазона, которая оценивается максимально допустимым числом каналов в выделенной полосе частот.

Решение простое — необходимо систематически проводить технический мониторинг выделенного радиочастотного диапазона для 2G-4G сетей сотовой связи общего пользования. К сожалению, есть одна немаловажная проблема в реализации необходимой задачи — профессиональное оборудование для таких целей является достаточно дорогостоящим, а в ряде случаев практически недоступным на отечественном рынке.

Однако современные достижения в области радиоэлектроники позволили появиться на свет новой технологии программно-определяемых платформ, которая является лучшим решением для реализации необходимой нам системы мониторинга.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения коммерческих SDR платформ в качестве систем мониторинга 2G-4G сетей сотовой связи общего пользования.

**Реализация системы мониторинга**

Основой прототипа комплекса предложена коммерческая платформа программно-определяемого радио RTL-SDR на базе двух чипов - контроллера Realtek RTL2832U и тюне-

ра R820T2. Чипсет RTL2832U является микросхемой, содержащей в себе два 8-битных АЦП с частотой дискретизации до 3,2 МГц, принимающей на входе I- и Q-потоки, получаемые другой микросхемой R820T2, которая реализует радиочастотную часть SDR: усилитель антенны, перестраиваемый фильтр и квадратурный демодулятор с синтезатором частоты [6].

Разработанный комплекс системы мониторинга работает в диапазоне частот 24- 1750 МГц, обрабатывает широкий спектр различных видов модуляции (AM, FM, NFM, LSB, USB, CW (ADS-B, D-STAR, AIS и др.), панорамный обзор сигналов возможен в полосе от 250 кГц до 3 МГц. Чувствительность приемника достигает значения 3 мкВ (на 438 МГц в режиме NFM), задержка принимаемого сигнала 340 мс, динамический диапазон 50 дБ (в режиме CW), входное сопротивление 50 Ом. Первичной обработкой сигнала в устройстве занимается 8-битный АЦП, после обработки сигнала цифровым сигнальным процессором (DSP) данные поступают в специальное программное обеспечение по интерфейсу USB 2.0 для визуального представления результатов [2].

Проведем мониторинг базовых станций «большой тройки» российских операторов системы сотовой связи GSM, а также оценим эффективность использования радиочастотного диапазона с помощью разработанного программного обеспечения «GSMScan». В результате сканирования формируются данные для анализа, на основе которых удалось идентифицировать принадлежность базовых станций к сетям «Билайн», «МТС», «Мегафон». Полученная информация представлена на рис. 1.

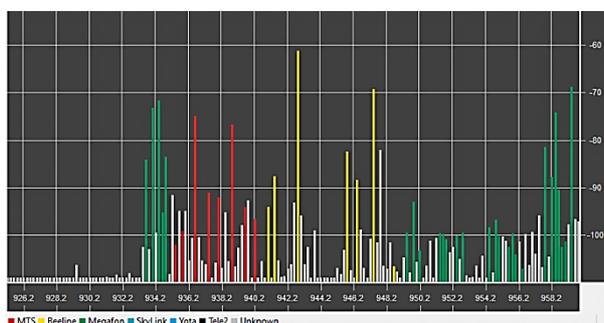


Рис. 1. Идентификация БС и определение их рабочих частот

Накопленные результаты сохраняются в отчетный текстовый файл, где выводятся технические характеристики по каждому

обнаруженному и идентифицированному источнику. Отчетность представлена на рис. 2.

ARFCN	Mhz	dBm	MCC	MNC	LAC	CI	Type	BCCH
14	937.8	-96.1	250	1	435	15042	TCH only	20
15	938.0	-99.0	---	---	---	---	---	---
16	938.2	-106.9	250	1	435	15042	TCH only	20
17	938.4	-97.6	---	---	---	---	---	---
18	938.6	-109.0	250	1	435	1432	TCH only	1
19	938.8	-107.0	---	---	---	---	---	---
20	939.0	-82.4	250	1	435	15042	BCCH+TCH	---
21	939.2	-105.6	250	1	435	16062	TCH only	86

Рис. 2. Отчетная информация об идентификации радиосигналов ССПР GSM 900 в нисходящем канале

Более подробный технический анализ возможно произвести с помощью программного обеспечения для построения программно-определяемых радиосистем «GNU Radio 3.7» совместно с утилитой перехвата пакетов «Wireshark», синхронизировав их работу между собой. Покажем это на примере анализа базовой станции оператора сотовой связи «МТС», работающей на частоте 936.612 МГц. Разработанный алгоритм и результаты его работы представлены на рис. 3 и рис. 4.

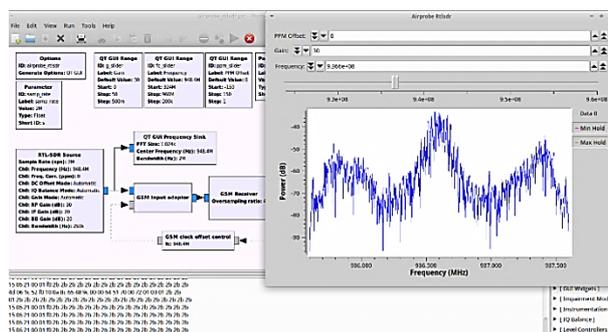


Рис. 3. Декодирование принимаемого радиосигнала от базовой станции «МТС» на частоте 936.612 МГц разработанным алгоритмом в «GNU Radio 3.7»

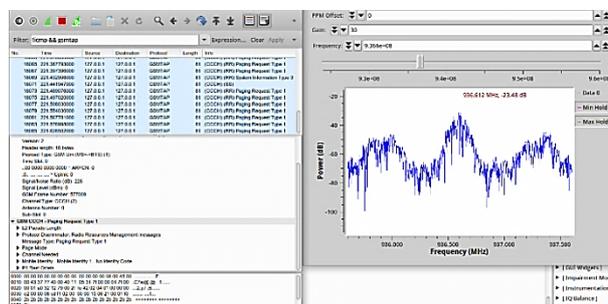


Рис. 4. Захват пакетов из декодированной информации в программе «Wireshark» при совместной работе с «GNU Radio 3.7»

В результате имеем возможность получать достаточно подробные сведения о каждой базовой станции ССПР GSM-900. Кроме того, в

дальнейшем можно определять, например, нагрузку на каждую из них, общую загруженность радиочастотного диапазона, оценивать качество покрытия соты исходя из определенных условий местности и т.д. Пример выявленных технических параметров базовой станции «МТС» представлен на следующем рис. 5.

```
Header length: 16 bytes
Payload Type: GSM Um (MS<->BTS) (1)
Time Slot: 0
..00 0000 0000 0000 = ARFCN: 0
..0.. .... = Uplink: 0
Signal/Noise Ratio (dB): 226
Signal Level (dBm): 0
GSM Frame Number: 577009
Channel Type: CCCH (2)
Antenna Number: 0
Sub-Slot: 0
▼ GSM CCCH - Paging Request Type 1
```

Рис. 5. Пример некоторых параметров базовой станции «МТС» на частоте 936.612 МГц

### Недостатки коммерческой платформы и возможные методы их устранения

В процессе выполнения мониторинга базовых станций «большой тройки» российских операторов сотовой связи GSM с помощью программного обеспечения «GSMScan» и «SDRSharp» наблюдается смещение влево реального сигнала. Покажем это на рис. 6.

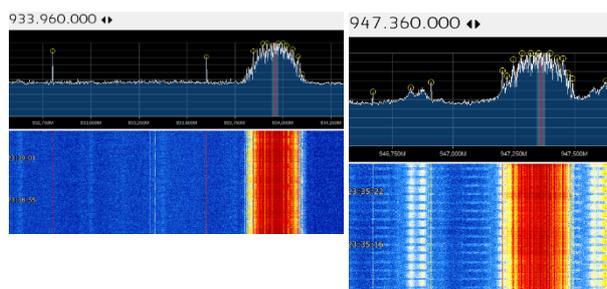


Рис. 6. Смещение реального сигнала от базовой станции

Причиной наблюдаемого отклонения является проблема нестабильности кварцевого опорного генератора, которая впоследствии вызывает обнаруженную погрешность. Замена компонента на генератор с температурной компенсацией TCXO является наилучшим решением, но этот тип генератора, работающий на частоте 28,8 МГц, является относительно дорогим. Альтернативой предложенного решения проблемы можно рассматривать генератор типа VCXO, например, Si550. Эта модель хоть и не обеспечивает такую точную температурную

компенсацию, как TCXO, но относительно стабильна.

Отметим, что на точность частоты приема оказывает влияние также и кремниевая технология изготовления чипа R820T2, являющаяся низкочастотной для данной области применения. Это порождает аналогичную проблему смещения частоты сигнала от реального значения. Устранение недостатка возможно с помощью калибровки коммерческой платформы. Для этого необходим источник сигнала со стабильной и заранее известной частотой. Разрешается использовать два типа источников – радиовещательную станцию FM-диапазона либо же GSM-сигнал [1].

При калибровке необходимо учитывать нелинейность случайного смещения частоты сигнала во всей полосе приемника. Это значит, что калибровка в более низком диапазоне радиостанции может быть не эффективна. Следовательно, лучшим решением, хоть и более продолжительным по времени, рекомендуется калибровка по GSM-сигналу. Для этого проводим сначала грубую, а затем точную калибровку с помощью программного обеспечения под операционной системой на базе ядра Linux 3.16.

При выполнении грубой настройки с помощью команды «rtl\_test -p» переводим платформу в режим калибровки приема сигнала по GSM, во время которой осуществляются грубая оценка ошибки при поиске каналов базовых станций и набор необходимой в будущем статистики для точной калибровки. В результате получаем отчетную информацию: «real sample rate: 2048 003 current PPM: 2 cumulative PPM: -7» и «real sample rate: 2047986 current PPM: -6 cumulative PPM: -7». Эти данные и потребуются нам для точной калибровки комплекса системы мониторинга. Для этого используем программное обеспечение «Kalibrate-SDR».

С помощью команды «kal -s GSM900 -e <значение\_грубой\_оценки\_ошибки>» переводим платформу в режим точной калибровки приема сигнала по GSM. Выбираем несколько каналов для проведения ряда замеров командой «kal -c <номер\_канала> -e <значение\_грубой\_оценки\_ошибки> -v». Получаем итоговый отчет калибровки системы по трем самым мощным из доступных каналов: «average absolute error: 6.559 ppm», «average absolute error: 6.621 ppm», «average absolute error: 6.518 ppm». Окончательной цифрой будет среднее значение в ppm, которое всегда должно фигу-

рировать при задании настроек платформы RTL-SDR.

Анализируя радиочастотную часть комплекса, важно заметить, что используемая в платформе микросхема влияет на чувствительность приема. Это определяется тем, что усилитель внутри нее шумит сильнее, чем более дорогие типы отдельных высокочастотных GaAs-усилителей. Для снижения уровня шумов на 1,5-3 дБ и улучшения приема рекомендуется дополнительно к схеме использовать малошумящий усилитель, включаемый между антенной и устройством, например, LNA for all [4]. Покажем его на рис. 7.



Рис. 7. Малошумящий усилитель «LNA for all»

Повышение чувствительности предложенной системы мониторинга возможно, в дополнение к первому способу, благодаря применению антенных фидеров со сравнительно малыми потерями. Для небольших расстояний до 10 метров хорошим вариантом является радиочастотный коаксиальный кабель «Radiolab 5D-FB» с затуханием на частоте 900 МГц - 21 дБ на 100 метрах, на частоте 1800 МГц - 30 дБ на 100 м; для длин до 20 метров — радиочастотный коаксиальный кабель «Radiolab 8D-FB» с затуханием на частоте 900 МГц - 13 дБ на 100 м, на частоте 1800 МГц - 20 дБ на 100 м). Не менее важным является использование антенного разъема BNC, обеспечивающего достаточно малую потерю сигнала не более 0,3 дБ [8].

Далее отметим, что для качественного выполнения задачи радиомониторинга 2G-4G сетей целесообразно применять специально рассчитанную под исследуемый частотный диапазон направленную антенну. Наиболее удачным решением, на наш взгляд, является антенна Харченко [1], ориентированная в сторону передатчика. Покажем ее модель на рис. 8.

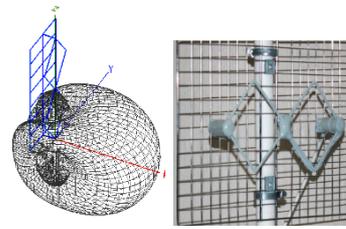


Рис. 8. «Антенна Харченко» и ее диаграмма направленности

Таким образом, предложенная модель антенны, совместно с рекомендованным используемым типом антенных фидеров, позволит увеличить значение усиления радиочастотной части платформы RTL-SDR на 5-8 dBi.

### Заключение

Технология SDR, несмотря на ее сравнительную молодость, уже является весьма перспективной и отличается широким спектром уникальных особенностей при проектировании и разработке достаточно мощных и в то же время относительно недорогих программно-определяемых систем различного назначения, вплоть до специальных. Разработанная система мониторинга подвижной сотовой радиосвязи GSM, а также 2G-4G сетей на базе коммерческой платформы RTL-SDR является одним из многочисленных примеров использования новейшей технологии в радиоэлектронике. Для гарантированной и стабильной работы комплекса были предложены пути повышения чувствительности и компенсации стабильности частоты.

### Литература

1. Lauefr C. The hobbyist's guide to the RTL-SDR: really cheap software defined radio. 2016. 501 с.
2. Stewart R.W., Barlee K.W. Software defined radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR. Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde Glasgow, Scotland, UK, 2015. 645 с.
3. Brannon B. Software defined radio. Analog devices, Inc., 2014. 36 с.
4. Об использовании полос радиочастот 890–915 и 935–960 МГц радиоэлектронными средствами стандарта GSM и стандарта LTE и последующих его модификаций. Решение ГКРЧ № 14-26-07, июль 2014.
5. Скрынников В.Г. Агрегированное использование РЧС в системах MTS/HSPA+ и LTE-Advanced //Электросвязь. 2014. № 7. С. 24-32
6. Nayak A.K. Spectrum sensing & signal identification using RTL-SDR. Department of Electronics & Communication Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India. 2016. 37с.
7. Виды ВЧ-разъемов. URL: <https://gsm-repiteri.ru/vidyi-vch-razyomov>.

Поступила 25.05.2018; принята к публикации 20.07.2018

### Информация об авторах

**Бойко Олег Валерьевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kazsevrus@mail.ru

**Журавлев Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ddom@bk.ru

**Сафонов Иван Александрович** – канд. техн. наук, доцент, руководитель проекта, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, 14), e-mail: saff@inbox.ru

## MONITORING SYSTEM OF MOBILE RADIO COMMUNICATION OF 2G-4G NETWORKS

O.V. Boyko<sup>1</sup>, D.V. Zhuravlev<sup>1</sup>, I.A. Safonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> JSC “Concern Sozvezdie”, VSTU, Voronezh, Russia

**Abstract:** in the modern world, mobile cellular radiocommunication systems are developing fast and for their 20 years of progress have densely entered the life of mankind, covering all areas of our activities. The GSM public communication system allows solving the widest range of tasks, having long ago left the limits of normal voice communication. An example of this can be remote control of various devices, or, for example, a mobile surveillance system behind the object, GSM "bugs" to determine its location. Due to the constant expansion of the GSM cellular communication system, the problem of rational use of the radio-frequency spectrum arises. The peculiarities of the 2G-4G standards used in the transmission of data in this system of cellular mobile radio make it necessary to continuously assess the quality of communication in cells. To solve these problems, a monitoring system specially designed for the required tasks is needed. Such systems are quite complex technical devices, while at the same time differing in their high cost. However, the relatively young SDR technology can successfully solve the required tasks and organize an affordable monitoring system for 2G - 4G networks. In this article, the application of the proposed solution is briefly considered using the GSM-900 mobile cellular radio range analysis as an example, the most technically accurate method for estimating important parameters is shown

**Key words:** software-defined radio; monitoring systems; 2G - 4G networks

### References

1. Lauefr, C. “The hobbyist’s guide to the RTL-SDR: really cheap software defined radio”, 2016, 501 p.
2. Stewart R.W., Barlee K.W. “Software defined radio using Matlab & Simulink and the RTL-SDR”, Department of Electronic and Electrical Engineering University of Strathclyde Glasgow, Scotland, UK, 2015, 645 p.
3. Brannon B. “Software defined radio”, Analog devices, Inc., 2014, 36p.
4. “Use of radio frequency bands 890–915 and 935–960 MHz GSM and LTE standard and its future modifications”, The decision of the GKRCh no. 14-26-07, Moscow, July 2014.
5. Skrynnikov V.G. “Aggregated use of PSD in MTS/HSPA + and LTE-Advanced systems”, *Telecommunications (Elektrosbyaz’)*, St. Petersburg, 2014, no. 7, pp. 24-32
6. Nayak A.K. “Spectrum sensing & signal identification using RTL-SDR”, Department of Electronics & Communication Engineering National Institute of Technology Rourkela, Odisha, India, 2016, 37 p.
7. “Types of RF connectors”, available at: <https://gsm-repiteri.ru/vidyi-vch-razyomov>.

Submitted 25.05.2018; revised 20.07.2018

### Information about the authors

**Oleg V. Boyko**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kazsevrus@mail.ru

**Dmitriy V. Zhuravlev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ddom@bk.ru

**Ivan A. Safonov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Project Manager, JSC “Concern Sozvezdie” (14 Plekhanovskaya st., Voronezh 394018, Russia), e-mail: saff@inbox.ru

## Машиностроение и машиноведение

УДК 621.7

### УПРАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ УЗЛОВ РОБОТА В ПРОЦЕССЕ АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

А.Н. Гречухин, В.В. Куц, М.С. Разумов

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** статья посвящена изучению вопросов точности формирования поверхностного слоя изделий машиностроения аддитивными методами. Проведен анализ преимуществ и недостатков технологий послойного синтеза изделий. Выявлено, что при аддитивном формообразовании, точностные характеристики поверхностного слоя существенно отличаются от точностных характеристик поверхностного слоя изделий, полученных традиционными методами. Формообразование поверхностей деталей сложного профиля аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины статической составляющей погрешности обработки - погрешности формообразования (аппроксимации). Проведен анализ отечественных и зарубежных трудов по теме исследований. Предложено для повышения точностных характеристик сложных поверхностей изделий, получаемых аддитивными методами, осуществлять динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования. Для управления пространственной ориентацией конечного элемента формообразующей системы предложено применение мехатронных 6-координатных устройств. Разработана методика расчета управляемых параметров 6-координатного робота, при которых будет обеспечена пространственная ориентация конечного элемента формообразующей системы по нормали в точке номинальной поверхности формообразуемой детали. Рассмотрена многовариантность значений управляемых параметров 6-координатного робота при переходе конечного элемента формообразующей системы из предыдущей точки в последующую. Предложено условие для выбора рационального варианта перехода. Произведен расчет управляемых параметров 6-координатного робота при формообразовании сферической поверхности аддитивными методами. Предлагаемая методика позволит осуществить динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования, что позволит снизить шероховатость сложнопрофильных поверхностей деталей при их формообразовании аддитивными методами

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, послойный синтез, формообразование, погрешность

**Благодарности:** исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых МК-6406.2018.8

#### Введение

Аддитивные технологии в настоящее время заменили традиционные подходы к проектированию и изготовлению сложнопрофильных деталей различного назначения. Однако точностные характеристики деталей, получаемых аддитивными методами, не являются идентичными характеристикам деталей, получаемых субтрактивными методами [1].

Формообразование деталей аддитивными методами характеризуется высокими значениями величины статической составляющей погрешности обработки, в частности величиной погрешности формообразования (аппроксимации). Это связано с тем, что формирование поверхностного слоя детали сложной формы происходит построчно, а ориентация конечного элемента формообразующей системы аддитивной установки при этом неизменна и независи-

ма от величины кривизны формируемой поверхности.

Повышение точности аддитивных методов формообразования является актуальной задачей, одним из вариантов решения которой является обеспечение пространственной ориентации конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования по нормали в точке номинальной поверхности формообразуемой детали, для чего необходимо создание нового либо расширение технологических возможностей существующего аддитивного оборудования.

#### Анализ исследований в предметной области

Вопросам повышения точности аддитивных методов формообразования посвящено большое количество работ [2, 4, 6, 7, 8, 9, 10], так, например, в работе [6] для снижения погрешности формообразования (аппроксимации)

предлагается применять статическую ориентацию формообразуемой поверхности. Недостаточно изученными остаются вопросы динамической ориентации конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования в процессе формообразования аддитивными методами. Применение динамической ориентации позволит снизить величину погрешности формообразования (аппроксимации) аддитивных методов за счет снижения кривизны поверхности наносимого элементарного слоя в точке контакта с номинальной поверхностью детали.

В работе [4] был предложен способ аддитивного формообразования с использованием платформы Стюарта, при котором будет обеспечена ориентация конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования таким образом, что при его приближении к поверхности формообразуемой детали платформа будет менять ориентацию детали, обеспечивая совпадение оси конечного звена формообразующей системы и нормали к поверхности детали в формируемой точке.

Высокая точность функционального управления перемещением и ориентацией конечного элемента формообразующей системы в трехмерном рабочем пространстве, а также жесткость при действии динамических нагрузок и компактность устройств обоснованы применением мехатронных систем с параллельной кинематикой. Однако недостатками таких механизмов является меньшее рабочее пространство, по сравнению с последовательными структурами, небольшая манипулятивность и сложная конструкция механизма. Также в процессе работы таких механизмов возникают внутренние связи, ограничивающие их рабочие пространства, которые могут приводить к потере управляемости механизмом. Так, наличие сил трения в кинематических парах платформы Стюарта приводит к тому, что вблизи особых положений может происходить заклинивание механизма, а его работоспособность будет теряться в некоторой окрестности этого положения [15].

Таким образом, для решения задач повышения точности методов аддитивного формообразования, альтернативным вариантом механизмам с параллельной структурой могут стать механизмы с последовательной структурой - многопозиционные роботы, применение которых позволит расширить рабочее пространство технологического оборудования, а также диа-

пазоны управления технологическими параметрами, что является необходимым условием для формообразования поверхностей сложной формы.

### Построение модели формообразующей системы 6-координатного робота

Для реализации динамической пространственной ориентации конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования рассмотрим применение 6-координатного промышленного робота. Для этого необходимо решить задачу расчета управляемых параметров робота, при которых будет получена необходимая пространственная ориентация его конечного звена (рис. 1).

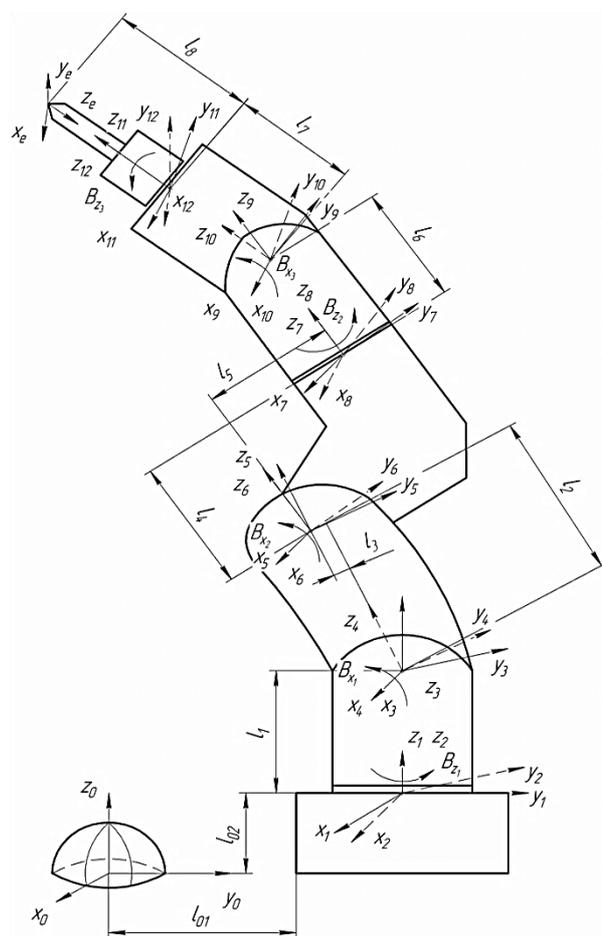


Рис. 1. Схема расчета управляемых параметров для обеспечения пространственной ориентации формообразующего элемента аддитивной установки с применением 6-координатного робота

Опишем основное уравнение процесса аддитивного формообразования с применением данного робота, обеспечивающего простран-

ственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивной установки. Уравнение имеет вид:

$$\bar{r}_0(u, v) = A_{0\Sigma} \cdot A_\Sigma(B_{Z_1}, B_{X_1}, B_{X_2}, B_{Z_2}, B_{X_3}, B_{Z_3}) \cdot \bar{e}, \quad (1)$$

где

$A_{0\Sigma}$  - матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве технологического оборудования;

$A_\Sigma(B_{Z_1}, B_{X_1}, B_{X_2}, B_{Z_2}, B_{X_3}, B_{Z_3})$  - матрица формообразующей системы технологического оборудования, соответствующая значениям углов поворота соответствующих звеньев 6-координатного робота;

$B_{Z_1}$  - угол поворота 1-го звена относительно оси  $OZ_1$ ;

$B_{X_1}$  - угол поворота 2-го звена относительно оси  $OX_1$ ;

$B_{X_2}$  - угол поворота 3-го звена относительно оси  $OX_2$ ;

$B_{Z_2}$  - угол поворота 4-го звена относительно оси  $OZ_2$ ;

$B_{X_3}$  - угол поворота 5-го звена относительно оси  $OX_3$ ;

$B_{Z_3}$  - угол поворота 6-го звена относительно оси  $OZ_3$ ;

$\bar{e}$  - радиус-вектор начала координат;

$u, v$  - криволинейные координаты формируемой детали.

Матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 6-осевого робота имеет вид (см. рис. 1)[18]:

$$A_{0\Sigma} = A_{0,1}^{[3]}(l_{02}) \cdot A_{1,1}^{[2]}(l_{01}), \quad (2)$$

где

$A_{0,1}^{[3]}$  - матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 6-координатного робота по оси  $OZ$ ;

$A_{1,1}^{[2]}$  - матрица установки системы координат детали в рабочем пространстве 6-координатного робота по оси  $OY$ .

Матрица формообразующей системы 6-и координатного робота имеет вид [18]:

$$A_\Sigma = A_{1,2}^{[6]}(B_{Z_1}) \cdot A_{2,3}^{[3]}(l_1) \cdot A_{3,4}^{[4]}(B_{X_1}) \cdot A_{4,4'}^{[3]}(l_2) \cdot A_{4',5}^{[2]}(l_3) \cdot A_{5,6}^{[4]}(B_{X_2}) \cdot A_{6,6'}^{[3]}(l_4) \cdot A_{6',7}^{[2]}(l_5) \cdot A_{7,8}^{[6]}(B_{Z_2}) \cdot A_{8,9}^{[3]}(l_6) \cdot A_{9,10}^{[4]}(B_{X_3}) \cdot A_{10,11}^{[3]}(l_7) \cdot A_{11,12}^{[6]}(B_{Z_3}) \cdot A_{12,e}^{[3]}(l_8) \cdot A_{e',e}^{[4]}(\pi) \quad (3)$$

где

$A_{4',5}^{[2]}, A_{6',7}^{[2]}$  - матрицы перемещения систем координат соответствующих звеньев относительно их начального положения по оси  $OY$ ;

$A_{2,3}^{[3]}, A_{4,4'}^{[3]}, A_{6,6'}^{[3]}, A_{8,9}^{[3]}, A_{10,11}^{[3]}, A_{12,e}^{[3]}$  - матрицы перемещения систем координат соответствующих звеньев относительно их начального положения по оси  $OZ$ ;

$A_{1,2}^{[6]}, A_{7,8}^{[6]}, A_{11,12}^{[6]}$  - матрицы поворота систем координат соответствующих звеньев относительно их начального положения вокруг оси  $OZ$ ;

$A_{3,4}^{[4]}, A_{5,6}^{[4]}, A_{9,10}^{[4]}, A_{e',e}^{[4]}$  - матрицы поворота систем координат соответствующих звеньев относительно их начального положения вокруг оси  $OX$ .

Параметры, входящие в матрицу  $A_\Sigma$ , можно разделить на управляемые и неуправляемые (конструктивные) параметры технологического оборудования.

Для обеспечения процесса формообразования на неуправляемые параметры 6-координатного робота, входящие в уравнения формообразования, необходимо наложить связь вида

$$q_i = const \quad (4)$$

К неуправляемым параметрам относятся длины звеньев робота, а именно элементы матрицы формообразующей системы:  $l_1, \dots, l_8$ .

На шесть управляемых параметров робота, для обеспечения процесса формообразования, необходимо наложить связь вида

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1(u, v); \\ q_2 &= q_2(u, v); \\ &\dots \\ q_6 &= q_6(u, v). \end{aligned} \quad (5)$$

К управляемым параметрам относятся углы поворота звеньев вокруг соответствующих осей:  $B_{Z_1}, B_{Z_2}, B_{Z_3}, B_{X_1}, B_{X_2}, B_{X_3}$ .

При формообразовании  $j$ -й точки поверхности детали уравнения (5) можно определить путем решения матричного уравнения

$$A_{0j}(u_j, v_j) \cdot A_{0\Sigma} \cdot A_\Sigma(B_{Z_1}, B_{X_1}, B_{X_2}, B_{Z_2}, B_{X_3}, B_{Z_3}) = E, \quad (6)$$

где

$A_{0j}(u_j, v_j)$  - матрица перехода из системы координат формообразуемой детали в систему координат  $j$ -й точки на поверхности детали  $\bar{r}_{0j}(u_j, v_j)$ ;

$E$  - единичная матрица.

Матрица  $A_{0j}$  перехода из системы координат формообразуемой детали в систему коор-

динат  $j$ -й точки на поверхности детали  $\bar{r}_{0j}(u_j, v_j)$  рассчитывается по методике, изложенной в работах [16-19], по векторам, задающим положительное направление оси  $Z_j$

$$\bar{k}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} \right|, \quad \text{оси } Y_j$$

$$\bar{j}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u} \right| \quad \text{или} \quad \bar{j}_{j0} = \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} / \left| \frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v} \right|,$$

где  $\frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial u}$ ,  $\frac{\partial \bar{r}_{0j}}{\partial v}$  - частные производные вектора  $\bar{r}_{0j}$  по параметрам  $u$ ,  $v$ , а также вектору  $\bar{r}_{0j}$ , задающему положение начала системы координат  $X_j Y_j Z_j$ .

### Результаты расчета управляемых параметров

Рассмотрим пример расчета управляемых параметров 6-координатного робота при формообразовании аддитивными методами полусферической поверхности (рис. 2).

Уравнение полусферы имеет вид:

$$r_0(\theta; z) = \begin{bmatrix} \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \cos(\theta) \\ \sqrt{R^2 - z^2} \cdot \sin(\theta) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\theta, z$  - криволинейные координаты поверхности;  $R$  - радиус сферы.

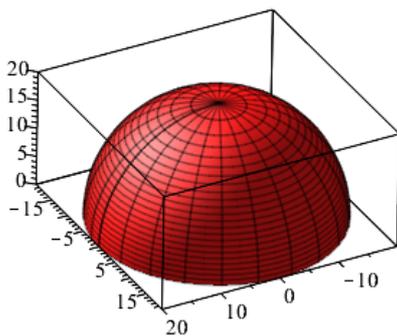


Рис. 2. Графическое представление формообразующей поверхности

Следует отметить, что при решении уравнения (6) может быть получено несколько вариантов решений. Это означает, что переход конечного звена формообразующей системы аддитивной установки из  $j$ -й точки в  $j+1$  точку детали возможно выполнить различными способами, и, соответственно, помимо задачи

расчета управляемых параметров, также необходимо решить задачу выбора рациональных параметров из множества возможных.

На рис. 3 показаны графики изменения управляемых параметров робота, полученные путем решения уравнения (6) в сечении детали при  $z=0$ , в диапазоне значений управляемых параметров [22]:

$$0^\circ \leq B_{Z_1} \leq 360^\circ;$$

$$0^\circ \leq B_{Z_2} \leq 360^\circ;$$

$$0^\circ \leq B_{Z_3} \leq 360^\circ;$$

$$-90^\circ \leq B_{X_1} \leq 90^\circ;$$

$$-180^\circ \leq B_{X_2} \leq 180^\circ;$$

$$-180^\circ \leq B_{X_3} \leq 180^\circ.$$

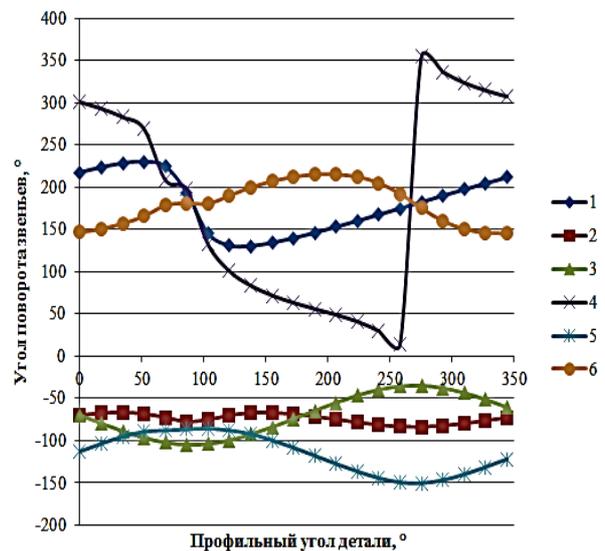


Рис. 3. График зависимости изменения управляемых параметров 6-координатного робота от величины профильного угла формообразующей детали при  $z=0$ ,  $\theta=0 \dots 2\pi$ ; 1 -  $B_{X_1}$ ; 2 -  $B_{X_2}$ ; 3 -  $B_{X_3}$ ; 4 -  $B_{Z_1}$ ; 5 -  $B_{Z_2}$ ;

$$6 - B_{Z_3}$$

Выбор рациональных вариантов перехода конечного звена формообразующей системы аддитивной установки из  $j$ -й точки в  $j+1$  точку детали возможен на основе расчета величины суммарного приращения управляемых параметров робота:

$$\begin{aligned} S_{j+1}^{[n]} &= \Delta S_{Z_1(j+1)}^{[n]} + \Delta S_{Z_2(j+1)}^{[n]} + \Delta S_{Z_3(j+1)}^{[n]} + \\ &+ \Delta S_{X_1(j+1)}^{[n]} + \Delta S_{X_2(j+1)}^{[n]} + \Delta S_{X_3(j+1)}^{[n]} = \left| B_{Z_j} - B_{Z_1(j+1)}^{[n]} \right| + \\ &+ \left| B_{Z_2} - B_{Z_2(j+1)}^{[n]} \right| + \left| B_{Z_3} - B_{Z_3(j+1)}^{[n]} \right| + \left| B_{X_j} - B_{X_1(j+1)}^{[n]} \right| + \\ &+ \left| B_{X_2} - B_{X_2(j+1)}^{[n]} \right| + \left| B_{X_3} - B_{X_3(j+1)}^{[n]} \right| \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\Delta S_{Z_1}^{(n)}, \Delta S_{Z_2}^{(n)}, \Delta S_{Z_3}^{(n)}, \Delta S_{X_1}^{(n)}, \Delta S_{X_2}^{(n)},$$

$\Delta S_{X_3}^{(n)}$  - приращение значений соответствующих управляемых параметров при переходе конечного звена формообразующей системы из  $j$ -й точки в  $j+1$  точку;

$B_{Z_1j}, B_{Z_2j}, B_{Z_3j}, B_{X_1j}, B_{X_2j}, B_{X_3j}$  - значения соответствующих управляемых параметров в  $j$ -й точке;

$$B_{Z_1}^{(n)}, B_{Z_2}^{(n)}, B_{Z_3}^{(n)}, B_{X_1}^{(n)}, B_{X_2}^{(n)}, B_{X_3}^{(n)}$$

$n$ -е значение соответствующих управляемых параметров в  $j+1$  точке;

$n$  – номер варианта решения уравнения.

Рациональным будем считать вариант с минимальной величиной суммарного приращения параметров  $S_{(j+1)}^{(n)}$ .

Для расчета управляемых параметров 6-координатного робота определим дискретность углового перемещения конечного звена формообразующей системы из  $j$ -й точки с координатами (180;10) в  $j+1$  точку с координатами (179,5;10)

На рис. 4 представлены результаты графического моделирования положения звеньев робота при формообразовании сферической поверхности. Рассмотрены два варианта перемещений, полученные при решении уравнения (6).

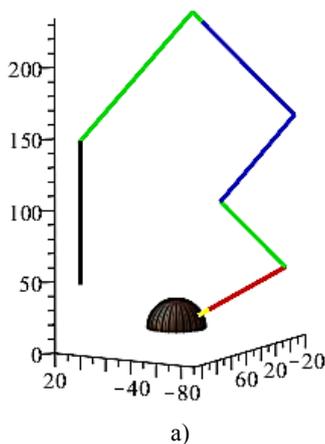
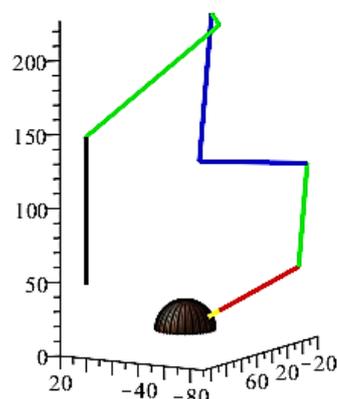
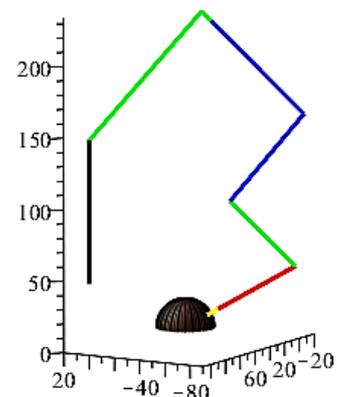


Рис. 4. Моделирование позиций звеньев 6-координатного робота: а) в  $j$ -й точке; б) в  $j+1$  точке (вариант 1); в) в  $j+1$  точке (вариант 2)



б)



в)

Рис. 4. Моделирование позиций звеньев 6-координатного робота: а) в  $j$ -й точке; б) в  $j+1$  точке (вариант 1); в) в  $j+1$  точке (вариант 2) (продолжение)

Согласно представленной выше методике были рассчитаны величины суммарного приращения управляемых параметров робота для двух возможных вариантов.

Результаты расчета управляемых параметров 6-координатного робота

Упр. параметр, °	Точка $j$	Точка $j+1$		$\Delta S_{(j+1)}^{(n)}$	
		Вар.1	Вар.2	Вар.1	Вар.2
$B_{X_1}$	-45,61	55,26	-45,73	100,87	0,12
$B_{X_2}$	-89,49	130,09	-89,19	219,58	0,30
$B_{X_3}$	-89,20	-57,17	-89,52	32,03	0,32
$B_{Z_1}$	146,39	326,64	146,568	180,25	0,176392
$B_{Z_2}$	46,14	238,75	45,86	192,60	0,27
$B_{Z_3}$	216,11	174,87	216,04	41,23	0,06
$\Sigma \Delta S_{(j+1)}^{(n)}$				766,58	1,27

Согласно результатам расчета, а также графического моделирования рациональным вариантом перемещения конечного звена формообразующей системы аддитивного оборудования из  $j$  - й точки в  $j+1$  точку, является вариант с наименьшей величиной приращения управляемых параметров – вариант 2.

### Заключение

Предлагаемая методика позволит осуществить расчет управляемых параметров 6-координатного робота при аддитивном формообразовании изделий, обеспечить динамическую пространственную ориентацию конечного элемента формообразующей системы аддитивного оборудования, выбрать рациональный вариант перемещения конечного элемента формообразующей системы в случае многовариантности решения задачи, что позволит снизить величину погрешности формообразования (аппроксимации), повысить производительность процесса формообразования.

### Литература

1. Burns M. Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing. Englewood Cliffs, N.J., USA: PTR Prentice Hall, 1993. 369 pp.
2. Сапрыкин А.А. Повышение производительности процесса селективного лазерного спекания при изготовлении прототипов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01: защищена 19.11.06; утв. 13.04.07. Юрга, 2006.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник. Т. 1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 444 с.
4. Improving the quality of additive methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms / V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, N.A. Vyckova // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 24. С. 11832-11835.
5. Трансфер аддитивных технологий: промышленность Курской области: монография / Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова, Н.В. Елисеева и др. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. 168 с.
6. Доброскок В.Л., Абдурайимов Л.Н., Чернышов С.И. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3d-модели // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2010. № 24. С. 13-21.
7. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K.

- Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. 2005. Vol. 2. Nos. 1–4. P. 319–328.
8. Hong S. Byun, Lee H. Kwan. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2006. № 28. P. 307–313.
9. Hong S. Byun, Lee H. Kwan. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm // Computers & Industrial Engineering. 2004. P. 426–431.
10. Hur J., Lee K. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 1998. № 14. P. 247–254.
11. Kim J.Y., Lee K., Park J.C. C. Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping // Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering. Seoul : Seoul National University. 1994.
12. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus / P.T. Lan, S.Y. Chou, L.L. Chent, D. Gemmill // Computer- Aided Design. 1997. Vol. 29. № 1. P. 53– 62.
13. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti // J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 139. № 1–3. P. 110–116.
14. Masood S. H., Rattanawong W. A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2002. № 19. P. 209–216.
15. Позиционно-силовое управление робототехническими и мехатронными устройствами: монография / И.Н. Егоров. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 192 с.
16. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1997. 391 с.
17. Емельянов С.Г. Разработка теории, методов и средств формирования поверхностей сборными металлорежущими инструментами на основе системного моделирования процесса их проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Емельянов. М. 2001. 407 с.
18. Куц, В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Куц. Курск. 2012. 366 с.
19. Куц В.В., Пономарев В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК - профилем сборной дисковой фрезой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 2 (322). С. 110-115.
20. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В.А. Гречишников, В.В. Куц, М.С. Разумов и др. // СТИН. 2017. № 4. С. 24-26.
21. Errors in shaping by a planetary mechanism / V.A. Grechishnikov, V.B. Romanov, P.M. Pivkin, V.V. Kuts, M.S. Razumov, A.N. Grechukhin, S.Y. Yurasov // Russian Engineering Research. 2017. Т. 37. № 9. С. 824-826.
22. Высокоточный промышленный 6-координатный робот [Электронный ресурс]: режим доступа://video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html (дата обращения: 20.05.2018).

Поступила 21.05.2018; принята к публикации 19.07.2018

Информация об авторах

**Гречухин Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: Agrechuhin@mail.ru

**Куц Вадим Васильевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

**Разумов Михаил Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел. 8(4712)222669, e-mail: mika\_1984@mail.ru

**CONTROL OF SPATIAL ORIENTATION OF ROBOT'S NODES IN THE PROCESS OF ADDITIVE PRODUCT FORMING**

**A.N. Grechukhin, V.V. Kuts, M.S. Razumov**

**Southwest State University, Kursk, Russia**

**Abstract:** the article is devoted to the study of the accuracy of the formation of the surface layer of engineering products by additive methods. The analysis of advantages and disadvantages of layered products synthesis technologies is carried out. It is revealed that, in additive shaping, the exact characteristics of the surface layer differ significantly from the accuracy characteristics of the surface layer of products obtained by traditional methods. Shaping the surfaces of details of a complex profile by additive methods is characterized by high values of the static component of the processing error-the error in shaping (approximations). The analysis of domestic and foreign works on the topic of research is carried out. It is proposed to carry out the dynamic spatial orientation of the final element of the forming system of additive equipment to improve the accuracy characteristics of complex product surfaces obtained by additive methods. To control the spatial orientation of the final element of the forming system, the use of mechatronic 6-coordinate devices is proposed. A technique for calculating the controlled parameters of a 6-coordinate robot is developed, under which the spatial orientation of the final element of the forming system will be provided along the normal at the point of the nominal surface of the part to be formed. The multivariance of the values of the controlled parameters of the 6-coordinate robot under the transition of the final element of the forming system from the previous point to the next one is considered. A condition is proposed for choosing a rational variant of the transition. The controllable parameters of the 6-coordinate robot are calculated for the shaping of a spherical surface by additive methods. The proposed technique will allow the dynamic spatial orientation of the final element of the forming system of additive equipment, which will reduce the roughness of the complex profile surfaces of parts when they are formed by additive methods

**Key words:** additive manufacturing, layer-by-layer synthesis, forming, error

**Acknowledgements:** the study was supported by the grant of the President of the Russian Federation for young scientists МК-6406.2018.8

**References**

1. Burns M. "Automated fabrication: improving productivity in manufacturing", Englewood Cliffs, N. J., USA, PTR Prentice Hall, 1993, 369 pp.
2. Saprykin A.A. "Increase in productivity of the process of selective laser sintering in the preparation of prototypes: Cand. Techn. Sci. diss." ("Povyshenie proizvoditel'nosti protsessa selektivnogo lazernogo spekaniya pri izgotovlenii prototipov: dis. kand. tekhn. nauk"), Tomsk Polytechnic University, Yurga, 2006.
3. Pronikov A.S., Aver'yanov O.I., Apollonov Yu. S. "Design of metal-cutting machines and machine systems: Manual-textbook" ("Proyektirovanie metallovezhushchikh stankov i stanochnykh sistem: spravochnik-uchebnik. T. 1. Proektirovanie stankov"), Moscow, Mashinostroenie, 1994, 444 p.
4. Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Bychkova N.A. "Improving the quality of additional methods for forming the surfaces of odd-shaped parts with the application of parallel kinematics mechanisms", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 24, pp. 11832-11835.
5. Chervyakov L.M., Bychkova N.A., Eliseeva N.V. "Transfer of additive technologies: the industry of the Kursk region: monograph" ("Transfer additivnykh tekhnologii: promyshlennost' Kurskoy oblasti: monografiya"), Kursk, CJSC "University book", 2016, 168 p.
6. Dobroskok V.L., Abdurayimov L.N., Chernyshov S.I. "Rational orientation of products in their layer-by-layer shaping on the basis of the original triangulated 3d models", *Scientific notes of the Crimean Engineering and Pedagogical University (Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta)*, 2010, no. 24, pp. 13-21.
7. Singhal S.K., Pandey A.P., Pandey P.M., Nagpal A.K. "Optimum part Deposit orientation in stereolithography", *Computer-Aided Design & Applications*, 2005, vol. 2, no. 1-4, pp. 319-328.

8. Hong S. Byun, Kwan H. Lee “Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, no. 28, pp. 307-313.
9. Hong S. Byun, Kwan H. Lee “Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm”, *Computers & Industrial Engineering*, 2004, pp. 426-431.
10. Hur J., Lee K. “The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1998, no. 14, pp. 247-254.
11. Kim J.Y., Lee K., Park J.C.C. “Determination of optimal part orientation in stereolithographic rapid prototyping”, Technical Report, Department of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul, Seoul National University, 1994.
12. Lan P.T., Chou S.Y., Chent L.L., Gemmil D. “Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus”, *Computer - Aided Design*, 1997, vol. 29, no. 1, pp. 53–62.
13. Massod S.H., Rattanawong W., Iovenitti P. “A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping”, *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, vol. 139, no. 1-3, pp. 110-116
14. Masood S.H., Rattanawong W. “A generic part orientation system based on volumetric error in rapid prototyping”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2002, no. 19, pp. 209-216.
15. Egorov I.N. “Position-force control of robotic and mechatronic devices: monograph” (“Pozitsionno-silovoe upravlenie robototekhnicheskimi i mekhatronnymi ustroystvami: monografiya”), Vladimir, Vladimir State University, 2010, 192 p.
16. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emelyanov S.G. “Geometric theory of surface formation by cutting tools: monograph” (“Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami: monografiya”), Kursk, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.
17. Emel'yanov S.G. “Development of the theory, methods and means of surface formation by assembled metal-cutting tools on the basis of system modeling of the process of their design: Dr. techn. Sci. diss.” (“Razrabotka teorii, metodov i sredstv formirovaniya poverkhnostey sbornymi metallo-rezhushchimi instrumentami na osnove sistemnogo modelirovaniya protsessa ikh proyektirovaniya: dis. d-ra tekhn. nauk”), Moscow, 2001, 407 p.
18. Kuts V.V. “Methodology of pre-project studies of specialized metal-cutting systems: Dr. Tech. Sci. diss.” (“Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallo-rezhushchikh sistem: dis. d-ra tekhn. nauk”), Kursk, 2012, 366 p.
19. Kuts V.V., Ponomarev V.V. “Construction of the model of forming of long shafts with RK-profile of the combined disk cutter”, *Fundamental and applied problems of engineering and technology (Fundamental'nye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2017, no. 2 (322), pp. 110-115
20. Grechishnikov V.A., Kuts V.V., Razumov M.S. “Determination of the error of the shape of a part when shaping by a planetary mechanism using the methods of geometric theory of cutting”, *STIN*, 2017, no. 4, pp. 24-26.
21. Grechishnikov V.A., Romanov V.B., Pivkin P.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Yurasov S.Yu. “Errors in shaping by a planetary mechanics”, *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 9, pp. 824-826.
22. “Precision industrial 6-coordinate robot”, available at://video.phim22.com/n535u234a405i3w5m5b3x5.html

Submitted 21.05.2018; revised 19.07.2018

#### Information about the authors

**Aleksandr N. Grechukhin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Southwest State University (94 50-years of October st., Kursk 305000, Russia), tel.: 8(4712)222669, e-mail: Agrechuhin@mail.ru  
**Vadim V. Kuts**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Southwest State University (94 50-years of October st., Kursk 305000, Russia), tel.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru  
**Mikhail S. Razumov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Southwest State University (94 50-years of October st., Kursk 305000, Russia), tel.: 8(4712)222669, e-mail: mika\_1984\_@mail.ru

## ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТАВРОВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин, С.М. Ларсов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** эффективным способом снижения массы изделий авиационной техники является применение тонкостенных слоистых конструкций с сотовым наполнителем. Целью данной работы является установление влияния соотношения толщин в тавровом соединении элементов заполнителя и обшивок на развитие процесса диффузионной сварки. Экспериментальные исследования проводили на трубчатых образцах с толщиной стенки 0,5 мм из сплава ОТ4 с крупнозернистой структурой, имитирующих одну ячейку сотового заполнителя, к торцу которых приваривали диффузионной сваркой пластины толщиной от 0,5 до 2 мм из листового сплава ОТ4-1, имевшего в исходном состоянии глобулярную микроструктуру. После сварки проводили механические испытания диффузионного соединения на прочность и снимали с поверхности обшивки профилограммы, по которым определяли глубину вдавливания трубчатого образца. Установлено, что образование диффузионного соединения и его прочность обусловлены развитием процесса деформации свариваемых заготовок в зоне контакта. При толщине обшивок менее 1,5 мм процесс ее деформации затруднен вследствие контактного упрочнения, возникающего из-за трения о стальной технологический лист. Величина упрочнения зависит от соотношения толщин и численно характеризуется коэффициентом упрочнения

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, тавровое соединение, деформация, контактное упрочнение

### Введение

Снижение массы изделий авиационной техники может быть достигнуто применением тонкостенных слоистых конструкций (ТСК), представляющих собой сочетание несущих слоев с наполнителем, например сотовым, и образующих между собой тавровое соединение [1].

Перспективным процессом получения таких ТСК является диффузионная сварка с низкоинтенсивным силовым воздействием, осуществляемая в условиях высокотемпературной ползучести свариваемых заготовок [2].

Кинетика процесса взаимодействия контактных поверхностей зависит от деформации, развивающейся в зоне сварки, которая определяется не только технологическими параметрами процесса сварки (температурой, давлением, временем, степенью вакуумирования), но и соотношением толщин свариваемых заготовок [2].

Целью данной работы является установление влияния толщины свариваемых титановых заготовок, образующих тавровое соединение, на развитие процесса диффузионной сварки.

### Результаты исследований

Экспериментальные исследования проводили на трубчатых образцах, имитирующих одну ячейку сотового заполнителя (рис. 1, поз.

1), к торцу которых приваривали диффузионной сваркой пластины, имитирующие несущий слой ТСК (рис. 1, поз. 2). Трубчатые образцы изготавливали из прутков сплава ОТ4, имевшего в исходном состоянии крупнозернистую пластинчатую микроструктуру, а пластины толщиной  $\delta_0$  от 0,5 до 2 мм изготавливали из листового сплава ОТ4-1, имевшего в исходном состоянии глобулярную микроструктуру.

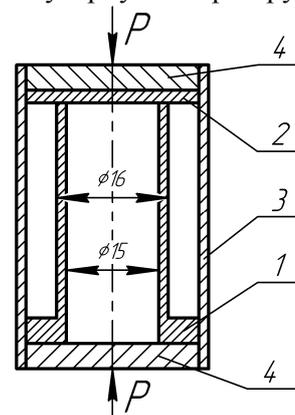


Рис. 1. Образец, имитирующий ячейку сотового заполнителя: 1 – трубчатая заготовка образца, 2 – пластина, 3 – экран из титановой фольги, 4 – технологические стальные шайбы

Диффузионную сварку проводили в вакууме 2,6 Па с дополнительной изоляцией зоны сварки титановой фольгой, выполняющей роль геттера (рис. 1, поз. 3). Сварку осуществляли при 900 °С и давлении 2,8 МПа. Сжимающее давление к свариваемым заготовкам прикладывалось через технологические элементы, толщиной 3,0 мм из стали 20 (рис. 1, поз. 4). Перед

сваркой контактные поверхности образцов шлифовали, полировали и обезжировали, что обеспечивало развитие физического контакта при минимальной деформации свариваемых заготовок.

После сварки проводили механические испытания диффузионного соединения на прочность путем «выдавливания» пуансоном приваренной пластины (рис. 1, поз. 2) на разрывной машине. Прочность соединения определяли по формуле:

$$\sigma_s = P/F,$$

где  $P$  – усилие разрушения образца;  $F$  – площадь поперечного сечения цилиндрической части трубчатого образца.

С поверхности пластин (рис. 1, поз. 2) после механических испытаний снимали профилограммы на профилографе-профилометре, по которым определяли величину деформации в зоне контакта  $\varepsilon$  (глубину вдавливания трубчатого образца в пластину), обусловленную термомодеформационным циклом сварки (рис. 2).

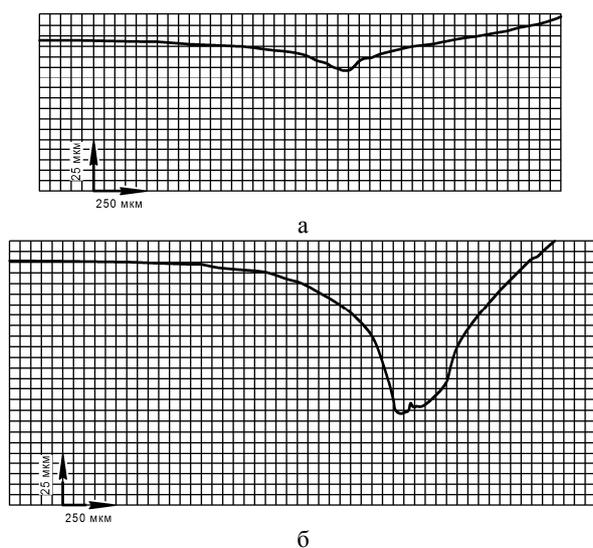


Рис. 2. Типичный вид профилограмм поверхности пластин (рис. 1, поз. 2) в зоне сварки с трубчатым образцом после испытаний на отрыв при толщине пластин  $\delta_o$ , мм: а – 0,5; б – 2,0

Из результатов механических испытаний, приведенных на рис. 3, а, следует, что зависимость  $\sigma_s = \varphi(\tau)$  носит ярко выраженный затухающий характер и прочность диффузионного соединения, полученного при одинаковых технологических параметрах режима сварки ( $t = 900$  °С;  $p = 2,8$  МПа;  $\tau = 5 \dots 60$  мин., разрежение воздуха в сварочной камере 2,6 Па), зависит от толщины свариваемых заготовок. При толщине стенки трубчатого образца  $\delta_s = 0,5$  мм уменьшение толщины привариваемой пластины  $\delta_o$  от 1,5

до 0,8 мм (примерно в 2 раза) сопровождается снижением максимально достигаемой прочности соединения от 600 МПа до 150 МПа (в 4 раза), а при использовании пластин  $\delta_o = 0,5$  мм прочность соединения была практически равна нулю. Увеличение толщины привариваемой пластины от 1,5 мм до 2 мм не оказывало заметного влияния на прочность соединения.

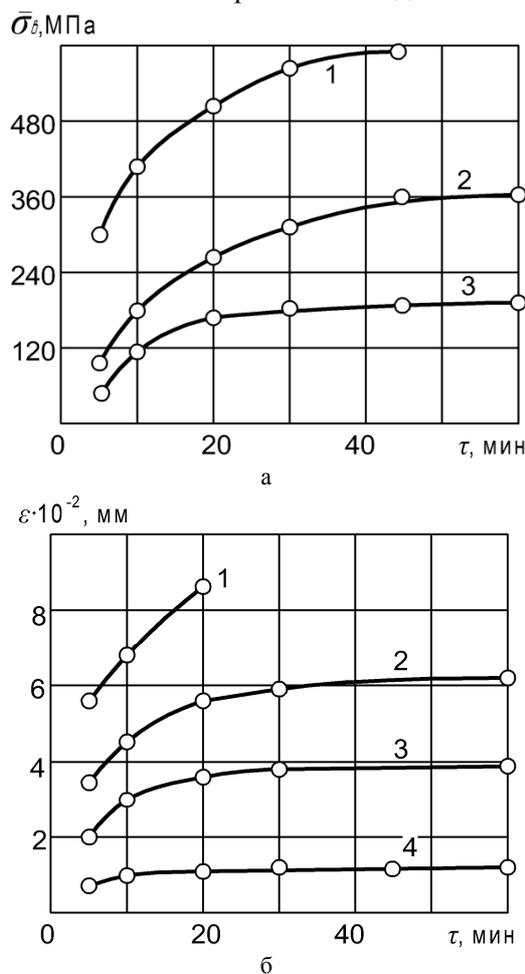


Рис. 3. Влияние времени сварки на прочность диффузионного соединения  $\sigma_s$  (а) и деформацию  $\Delta\varepsilon$  (б) при толщине пластин  $\delta_o$ , мм: 1 – 1,5; 2 – 1,0; 3 – 0,8; 4 – 0,5

О влиянии толщины привариваемой пластины на развитии ее деформации в зоне сварки можно судить по зависимостям  $\varepsilon = \varphi(\tau)$ , приведенным на рис. 3, б. Из этих данных видно, что с уменьшением толщины привариваемых пластин  $\delta_o$  величина  $\varepsilon$  уменьшается, при этом зависимости  $\varepsilon = \varphi(\tau)$  носят явно затухающий характер и наибольшее развитие деформации наблюдается при  $\tau \leq 10$  мин.

Сопоставление кинетических зависимостей  $\sigma_s = \varphi(\tau)$  с  $\varepsilon = \varphi(\tau)$  (рис. 3) дают основание считать, что образование диффузионного соединения и его прочность обусловлены разви-

тием процесса деформации свариваемых заготовок в зоне контакта, т.е.  $\sigma_s = \varphi(\varepsilon)$  (рис. 4).

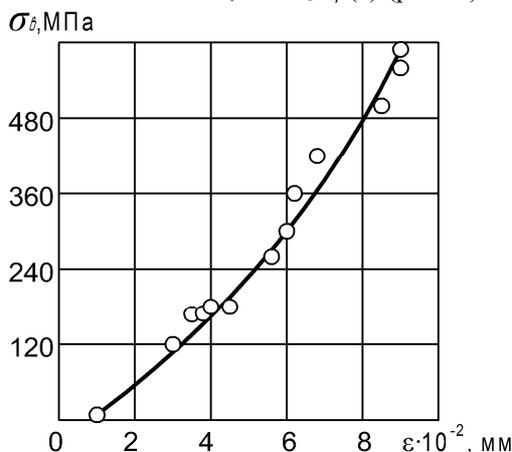


Рис. 4. Зависимость прочности диффузионного соединения  $\sigma_s$  от величины деформации в зоне контакта  $\varepsilon$

Наблюдаемая зависимость величины деформации в зоне контакта  $\varepsilon$  от толщины  $\delta_o$  используемых в экспериментах титановых пластин объясняется тем, что сжимающее давление к свариваемым заготовкам прикладывается через стальные технологические шайбы (рис. 1, поз. 4), обладающие большим сопротивлением высокотемпературной деформации по сравнению с титаном. В результате трения, возникающего в контакте между титаном и сталью, при деформации в процессе сварки может развиваться контактное упрочнение титана, выражающееся в повышении его сопротивления высокотемпературной деформации. Проявление контактного упрочнения зависит от соотношения толщин свариваемых заготовок таврового соединения  $\gamma = \delta_o / \delta_s$  [2].

Наблюдаемое в экспериментах повышенное сопротивление высокотемпературной деформации титановых пластин (рис. 1, поз. 2) по мере уменьшения их толщины (при  $\delta_o \leq 1,5$  мм) можно количественно охарактеризовать коэффициентом упрочнения  $k_\gamma$ , представляющим собой отношение средней скорости деформации металла в “свободном” состоянии –  $\dot{\varepsilon}$  (когда трение, возникающее в контакте титана со стальной оснасткой, не оказывает влияния на его деформационную способность) и “упрочненном” состоянии –  $\dot{\varepsilon}_y$ :

$$k_\gamma = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_y.$$

Скорости деформации сплава ОТ4-1  $\dot{\varepsilon} = \varphi(\gamma)$ , полученные с использованием зависимостей  $\Delta \varepsilon = \varphi(\tau)$  на начальных участках ( $\tau = 10$  мин.) (см. рис. 3, б), приведены на рис. 5. Видно, что при изменении  $\gamma$  от 3 до 1 (уменьшении  $\delta_o$  в три раза от 1,5 до 0,5 мм) средняя скорость

высокотемпературной деформации уменьшается в 6 раз.

Зависимость  $k_\gamma = \varphi(\gamma)$ , приведенная на рис. 6, может быть аппроксимирована выражением:

$$k_\gamma = 1 + 6,5 / (0,02 + \gamma)^{3,5}.$$

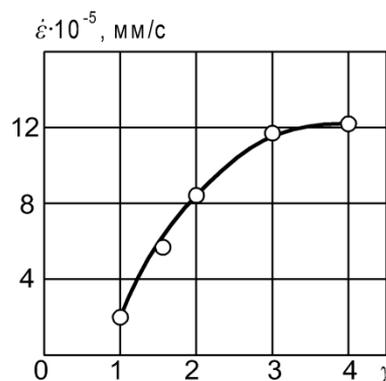


Рис. 5. Зависимость  $\dot{\varepsilon} = \varphi(\gamma)$  при температуре 900 °С и давлении 2,8 МПа

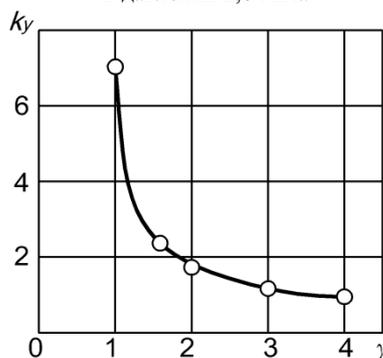


Рис. 6. Зависимость  $k_\gamma = \varphi(\gamma)$  при температуре 900 °С и давлении 2,8 МПа

При расчетах значений  $k_\gamma$  скорость деформации в “свободном” состоянии принимали равной  $1,2 \cdot 10^{-4}$  мм/с, что соответствовало скорости деформации пластин  $\delta_o = 2,0$  мм ( $\gamma = 4$ ).

## Выводы

1. Фактором, определяющим развитие процесса диффузионной сварки и качество диффузионно-сварных титановых ТСК с тавровым соединением, является соотношение толщин свариваемых заготовок  $\gamma = \delta_o / \delta_s$ . При  $\gamma < 3,0$  в результате развития контактного упрочнения несущих слоев конструкции уменьшается деформация в зоне сварки и снижается прочность диффузионного соединения.

2. В условиях проведенных экспериментов значение коэффициента контактного упрочнения  $k_\gamma$  в зависимости от соотношения толщин свариваемых заготовок  $\gamma$  может быть оценено по выражению

$$k_\gamma = 1 + 6,5 / (0,02 + \gamma)^{3,5}.$$

**Литература**

1. Технология производства титановых самолетных конструкций / А.Г. Братухин, Б.А. Колачев, В.В. Садков и др. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

2. Пешков В.В., Булков А.Б. Диффузионная сварка титановых тонкостенных слоистых конструкций. М.: Изд-во «РИТМ», 2016. 242 с.

Поступила 23.05.2018; принята к публикации 19.07.2018

**Информация об авторах**

**Пешков Владимир Владимирович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: otsp@vorstu.ru

**Булков Алексей Борисович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bulkov\_ab@mail.ru

**Корчагин Илья Борисович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ibkor4agin@yandex.ru

**Ларсов Сергей Михайлович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Московский проспект, 14), e-mail: otsp@vorstu.ru

**DIFFUSION WELDING OF TITANIUM THIN-WALLED STRUCTURES WITH T-JOINTS**

**V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.B. Korchagin, S.M. Larsov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the use of thin-walled layered structures with a honeycomb core is an effective way to reduce the weight of aircraft products. The purpose of this work is to determine the influence of the ratio of the thicknesses in the T-joint of the filler elements and the shells on the development of the diffusion welding process. Experimental studies were carried out on tubular samples with the wall thickness of 0.5 mm from an OT4 alloy with a coarse-grained structure simulating one cell of a honeycomb core, to the end of which plates with the thickness of 0.5 to 2 mm of sheet alloy OT4-1 were welded by diffusion welding, having globular microstructure in the initial state. After welding, the diffusion bond was mechanically tested for strength, and the profilograms were taken from the surface to determine the depth of indentation of the tubular sample. It was established that the formation of the diffusion bond and its strength are specified by the development of the process of deformation of welded blanks in the contact zone. When the thickness of the shells is less than 1.5 mm, the process of its deformation is difficult because of the contact hardening that occurs as a result of friction against the steel sheet. The value of hardening depends on the thickness ratio and is numerically characterized by the hardening coefficient

**Key words:** diffusion welding, T-joint, deformation, contact hardening

**References**

1. Bratukhin A.G., Kolachev B.A., Sadkov V.V. “Technology of production of titanium aircraft structures” (“Tekhnologiya proizvodstva titanovykh samoletnykh konstruktsiy”), Moscow, Mashinostroenie, 1995, 448 p.

2. Peshkov V.V., Bulkov A.B. “Diffusion welding of titanium thin-walled layered structures” (“Diffuzionnaya svarka titanovykh tonkostennykh sloistykh konstruktsiy”), RITM, Moscow, 2016, 242 p.

Submitted 23.05.2018; revised 19.07.2018

**Information about the authors**

**Vladimir V. Peshkov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: otsp@vorstu.ru

**Aleksey B. Bulkov**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bulkov\_ab@mail.ru

**Il'ya B. Korchagin**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ibkor4agin@yandex.ru

**Sergey M. Larsov**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: otsp@vorstu.ru

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ

О.И. Попова, М.И. Попова, Л.С. Печенкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены пути повышения стойкости червячных фрез. Основными путями повышения износостойкости зуборезного инструмента являются создание новых конструкций высокопроизводительных червячных фрез, а также применение в конструкциях инструмента улучшенных самозакаливающихся комплексно-легированных сплавов. Предложено два пути повышения стойкости червячных фрез. Первый путь - это создание новых конструкций высокопроизводительных червячных фрез, второй – оптимальный выбор марки сплава для инструмента. В предлагаемой конструкции червячной фрезы благодаря уменьшению рабочей высоты зуба для первого, второго и третьего проходов сокращается длина основания каждого зуба, что дает возможность, не уменьшая прочности зуба, уменьшить угловой шаг зубьев в торцевом сечении и образовать на том же внешнем диаметре червячной фрезы большее количество реек. Увеличение количества реек дает большее количество профилирующих резцов, что позволяет уменьшить неравномерность нарезания и динамические нагрузки. Новая конструкция фрезы позволяет значительно снизить интенсивность износа зубьев инструмента, что приводит к увеличению стойкости инструмента. Требованиям ко второму пути могут удовлетворять самозакаливающиеся комплексно-легированные сплавы на основе железа, сочетающие высокую прокаливаемость с принципом композиционного упрочнения

**Ключевые слова:** червячная фреза новой конструкции, стойкость, комплексно-легированные сплавы

### Введение

Область применения износостойких инструментов и деталей охватывает практически все добывающие отрасли, энергетику, металлургию, строительно-дорожную технику, оборудование, где срок службы деталей определяется износом. Критериями выбора марки инструментального материала являются условия работы и интенсивность изнашивания. Следует учитывать необходимость механической обработки, условия термообработки, экономичность [1].

При анализе источников информации встал вопрос о выборе инструментального материала для фрез, с высокой продолжительностью работы и повышенной точностью обработки, в частности для червячной фрезы при нарезании червячного колеса из бронзы. При этом нужно было учесть продолжительность работы инструмента и параметры качества обработанной детали.

Износостойкость инструмента характеризуется сопротивляемостью инструмента истиранию под действием сил трения, возникающих в процессах резания, и определяется как скорость потери металла в  $г/(м^2 \cdot ч)$  или  $мм/ч$ ,  $мм/год$ , отдельным выходом инструмента из строя и увеличением сил резания.

Различают износ инструмента: механический, абразивный, адгезионный, химический, диффузионный, электроэрозионный и др. В

процессе резания все эти виды изнашивания могут иметь место, но в зависимости от конкретных условий один из них является доминирующим, определяющим интенсивность изнашивания и стойкость режущего инструмента.

Существующие виды износа инструмента и деталей, характерные некоторым сплавам, представлены на рис. 1.

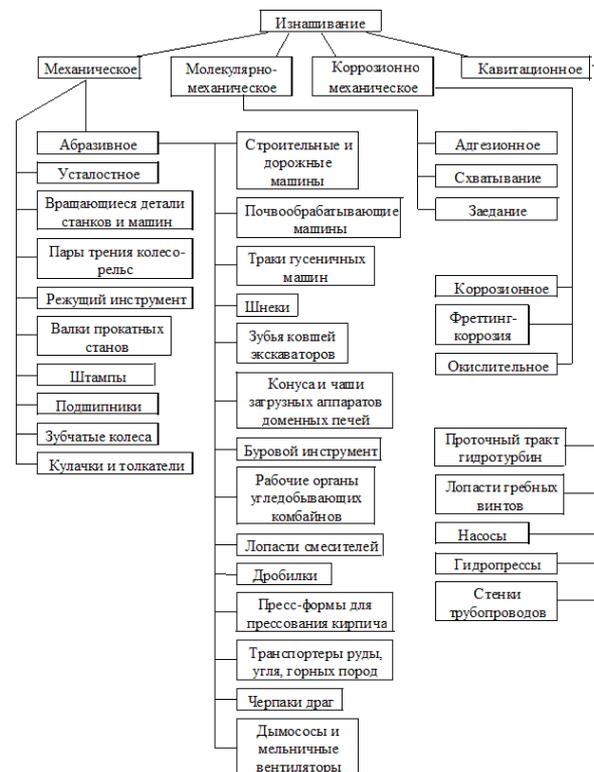


Рис. 1. Виды износа

Надежность работы инструмента определяется износостойкостью и является одним из важнейших параметров инструмента.

Изнашивание представляет собой процесс постепенного изменения размеров деталей вследствие работы трения, которая проявляется в отделении от поверхностей трения материала и (или) его остаточной деформации.

### Постановка задачи

В результате периодических динамических и тепловых нагрузок происходит износ зубьев фрез. Износостойкость определяется механическими свойствами материала, условиями резания и геометрическими параметрами инструмента.

В условиях производства улучшают механические свойства материала, тем самым улучшая его эксплуатационные характеристики.

Этого можно достичь, управляя процессами формирования структуры и свойств металла, соотношением в них основных химических элементов, комплексным легированием, модифицированием, режимами термической обработки.

Основными путями повышения износостойкости зуборезного инструмента являются:

- создание новых конструкций высокопроизводительных червячных фрез;
- применение в конструкциях инструмента улучшенных быстрорежущих сталей и твердых сплавов.

Целью данной работы является повышение стойкости червячной фрезы за счет оптимизации конструкции и использование в качестве инструментального материала комплексно-легированных сплавов нового состава.

### Результаты работы

Для увеличения периода стойкости исследованы изменения формы поверхности зубьев червячной фрезы (рис. 2):

- 1 – червячная фреза новой конструкции;
- 2 - зубья для первого прохода;
- 3 - зубья для второго прохода;
- 4 - головка зубьев второго прохода;
- 5 - ножка зубьев второго прохода;
- 6 – зубья для третьего прохода,
- 7 - головка зубьев третьего прохода;
- 8 - ножка зубьев третьего прохода;
- 9 - проточки;

- 10 - заборный конус;
- 11 - заготовка червячного колеса;
- 12 - профиль исходного контура;
- $D_f$  - диаметр впадин;
- $D_{a1}$  - диаметр вершин зубьев 2,
- $D_{a2}$  - диаметр вершин зубьев 3;
- $D_{a3}$  - диаметр вершин зубьев 6.

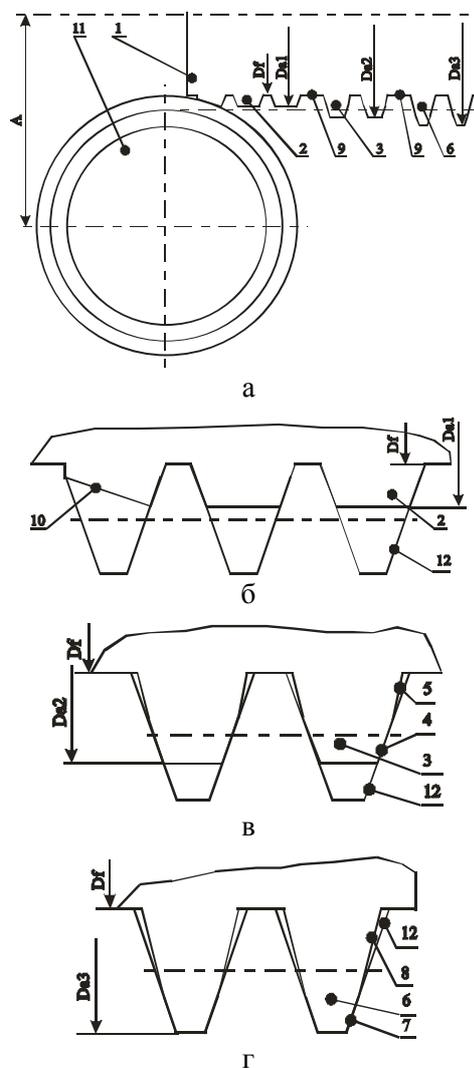


Рис. 2. Червячная фреза новой конструкции: а - осевое сечение червячной фрезы во время обработки червячного колеса; б - зубья для первого прохода; в - зубья для второго прохода; г - зубья для третьего прохода

Благодаря уменьшению рабочей высоты зуба для первого, второго и третьего проходов сокращается длина основания каждого зуба, что дает возможность, не уменьшая прочности зуба, уменьшить угловой шаг зубьев в торцевом сечении и образовать на том же внешнем диаметре червячной фрезы большее количество реек. Увеличение количества реек дает большее количество профилирующих резцов,

что позволяет уменьшить неравномерность нарезания и динамические нагрузки [2, 3].

В процессе обработки фреза новой конструкции совершает главное вращательное движение и одновременно осевое перемещение, при этом заготовка червячного колеса совершает только вращательное движение.

На рис. 3 представлено 3D-моделирование процесса формообразования червячного колеса червячной фрезой новой конструкции.

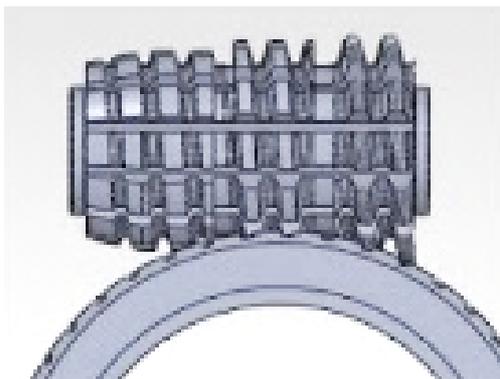


Рис. 3. 3D-моделирование процесса механической обработки червячных колес червячной фрезой новой конструкции

Обработка зубьями первого прохода осуществляется с момента прикосновения к обрабатываемой заготовке заборного конуса и выхода этих зубьев из контакта с заготовкой червячного колеса. При этом зубья первого прохода обрабатывают верхнюю треть от высоты зуба червячного колеса.

Обработка зубьями второго прохода осуществляется с момента прикосновения к обрабатываемой заготовке этих зубьев и выходу их из контакта с заготовкой червячного колеса. При этом головки зубьев второго прохода обрабатывают среднюю треть от высоты зуба червячного колеса, а ножки с профилем в форме трапеции участия в обработке не принимают.

Обработка зубьями третьего прохода осуществляется с момента прикосновения к обрабатываемой заготовке этих зубьев и выходу их из контакта с заготовкой червячного колеса. При этом головки зубьев третьего прохода обрабатывают нижнюю треть от высоты зуба червячного колеса, а ножки с профилем в форме трапеции участия в обработке не принимают.

Обработка прекращается после выхода зубьев для третьего прохода из станочного зацепления червячная фреза – заготовка.

Зубья фрезы новой конструкции, расположенные на ее конической части, срезают большую часть металла, оставляя небольшой припуск для обработки калибровочными зубьями. Калибровочные зубья, срезая небольшой слой металла, изнашиваются меньше, чем зубья обычной фрезы.

На стойкость фрез существенно влияет принятая схема резания, определяющая нагрузку на зубья. У стандартных фрез активно используется 15...20 % длины режущих кромок по периметру. При этом наибольший объем срезаемого металла приходится на вершинные режущие кромки, особенно тех зубьев, которые первыми вступают в резание. Эти зубья быстрее изнашиваются и оказывают определяющее влияние на период стойкости инструмента. Этот недостаток устраняется путем использования червячной фрезы новой конструкции [2, 3]. Равномерное распределение припуска для трех инструментальных реек и увеличение количества зубьев на диаметре позволяет снизить на 2/3 нагрузку на зуб и увеличить период стойкости.

Так, для этих фрез относительная доля вершинного лезвия в периметре резания на 30% больше, чем у стандартных червячных фрез и на 12% больше, чем при делении профиля по высоте на две части, что показывает существенное уменьшение удельной нагрузки, которое приходится на вершинные лезвия, и повышение стойкости.

Червячная фреза новой конструкции	Периметр резания	Ширина вершинного лезвия	Относительная доля, %
Первый проход	$(2 \cdot 1,0 / \cos \alpha_w + 0,66 + 2 \cdot 1,25 \cdot \operatorname{tg} \alpha_w) m$	$(0,66 + 2 \cdot 1,25 \cdot \operatorname{tg} \alpha_w) m$	42,45
Второй проход	$(2 \cdot 1,0 / \cos \alpha_w + 0,66 + 2 \cdot 0,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha_w) m$	$(0,66 + 2 \cdot 0,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha_w) m$	32,48
Третий проход	$(2 \cdot 0,75 / \cos \alpha_w + 0,66) m$	0,66 m	29,25

Где  $m$  - модуль,  $\alpha_w$  - угол профиля исходного контура.

На рис. 4 представлено нарезание червячного колеса фрезой новой конструкции из быстрорежущей стали Р6М5.

Для проверки стойкости инструмента были нарезаны червячные колеса с одинаковыми условиями резания фрезой новой конструкции, червячной фрезой с заборным конусом, червячной фрезой ГОСТ 9324-80Е.



Рис. 4. Нарезание червячного колеса фрезой новой конструкции

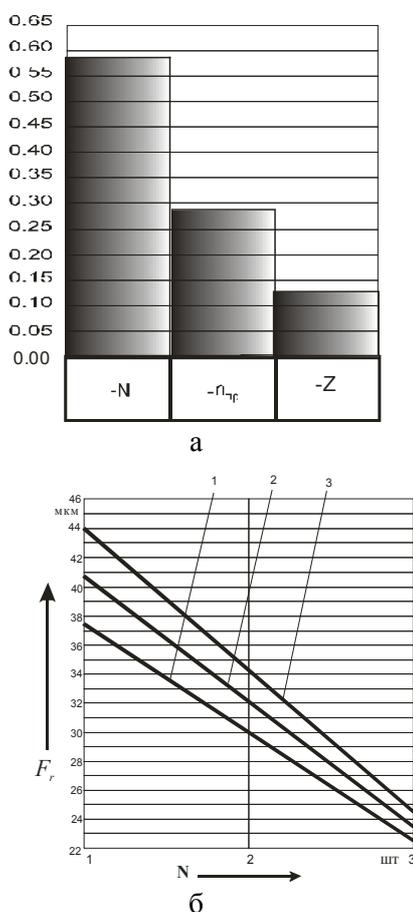


Рис. 5. Радиальное биение  $F_r$ , мкм:  
 а – степень влияния переменных факторов;  
 б – зависимость  $F_r$  от  $N$  и  $n_{пр}$  ( $Z=12$ ):  
 1 -  $n_{пр}=3$ ; 2 -  $n_{пр}=2$ ; 3 -  $n_{пр}=1$  прохода

В результате обработки экспериментальных данных [4] получена следующая математическая модель радиального биения колеса  $F_r(y_5)$ :

$$y_5 = 38,75 - 6,5x_1 - 1,5x_2 - 3,25x_3,$$

где  $x_1 = 1(X_1 - 2)$ ;  $x_2 = 0,333333(X_2 - 9)$ ;  $x_3 = 1(X_3 - 2)$ .

Из модели (1) следует, что наибольшее влияние на радиальное биение  $F_r$  имеет количество частей разделения профиля по высоте инструментальной рейки червячной фрезы  $N$  (степень влияния - 58%). С повышением количества частей разделения профиля по высоте инструментальной рейки червячной фрезы уменьшается радиальное биение  $F_r$  (рис. 5). Следовательно, количество частей разделения профиля по высоте инструментальной рейки червячной фрезы надо рассматривать как главный управляющий фактор. Влияние количества зубьев червячной фрезы – незначительное (не превышает 13%).

Установлено, что с увеличением количества проходов фрезы  $n_{пр}$  и увеличением количества частей разделения по высоте профиля инструментальной рейки  $N$  уменьшается радиальное биение  $F_r$ .

Также выявлено влияние количества зубьев червячной фрезы на радиальное биение  $F_r$  обработанного червячного колеса. Установлено, что при увеличении количества зубьев червячной фрезы уменьшается  $F_r$ . Что подтверждает повышение стойкости червячной фрезы за счет создания новой конструкции.

Другая возможность повышения износостойкости – оптимальный выбор марки сплава для инструмента. В процессе резания инструментом происходит процесс стружкообразования. Поверхность инструмента в каждой точке контакта находится под действием срезающих напряжений, что приводит к разрушению металла и образованию стружки. Сам процесс стружкообразования создает механическое и абразивное воздействие на лезвие режущего инструмента. Поэтому для инструментальных материалов необходимы высокий предел выносливости, максимальная твердость, теплоустойчивость и стойкость к износу. Этим требованиям могут удовлетворять самозакаливающиеся комплексно-легированные сплавы, сочетающие высокую прокаливаемость с принципом композиционного упрочнения и упрочняющимся по механизмам, характерным для быстрорежущих сталей. Возможно также обеспечение экономного легирования этих сплавов дорогими и дефицитными компонентами. Основой для разработки литых твердых сплавов с необходимыми свойствами могут служить комплексно-легированные белые чугуны, обладающие высокой твердостью, износостойко-

стью и повышенными прочностными свойствами, по существу являющиеся литыми твердыми сплавами. При дополнительном повышении их специальных свойств (термостойкости, теплостойкости, абразивной износостойкости) и технологичности могут быть существенно расширены возможности их использования.

В работе затрагивалась тема получения литого инструмента. Так как быстрорежущая сталь является в этом случае малоэффективной из-за неоднородности литой структуры стали и обусловленного этим недостаточно высокого уровня свойств, а также из-за высокой стоимости, были проведены экспериментальные работы по применению других сплавов для металлорежущего инструмента. Особенности этих сплавов являются отсутствие в их составе дорогого и дефицитного вольфрама, хорошие литейные свойства и возможность обеспечения необходимой структуры и достаточно высоких эксплуатационных характеристик при использовании литых заготовок (без применения обработки давлением).

### Заключение

Установлено, что применение червячных фрез новой конструкции позволяет увеличить число стружечных канавок в 1,5 - 1,7 раз, что позволяет увеличить число профилирующих резцов, уменьшить неравномерность нарезания и динамические нагрузки, позволяет снизить интенсивность износа зубьев инструмента в 1,3-1,5 раза, что увеличивает износостойкость инструмента.

Установлен рациональный химический состав самозакаливающихся комплексно-легированных сплавов (основа – железо), включающий до 2% углерода, ванадий и хром при соотношении их содержаний 0,90-0,95% до 2% кремния при небольшом содержании молибдена (до 3%) и ограниченном содержании марганца (до 0,8%).

Оптимизация конструкции и использование в качестве инструментального материала новых комплексно-легированных сплавов приводит к уменьшению стоимости инструмента, улучшая при этом его эксплуатационные характеристики.

### Литература

1. Печенкина Л.С. Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 134-138.
2. Попова М.И., Попова О.И. Вплив конструкції черв'ячної фрези із поділенням за висотою профілем інструментальної рейки на геометрію черв'ячного колеса [Влияние конструкции червячной фрезы с разделенным по высоте профилем инструментальной рейки на геометрию червячного колеса] // Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції «Машинобудування – очима молодих». Кременчук, 2013. С. 31–32.
3. Попова О.И., Кривошея А.В., Попова М.И. Усовершенствование математических моделей формообразования червячных колес с учетом равномерного припуска при обработке // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 114-122.
4. Радченко С.Г. Математичне моделювання технологічних процесів в машинобудуванні. К.: ЗАТ «Укр-спецмонтажпроект», 1998. 274 с.

Поступила 19.03.2018; принята к публикации 19.07.2018

### Информация об авторах

**Попова Ольга Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: olga\_10\_porova@mail.ru

**Попова Маргарита Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

**Печенкина Лариса Степановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pls-7@mail.ru

## WAYS OF INCREASING THE RESISTANCE OF HOB CUTTER

O.I. Popova, M.I. Popova, L.S. Pechenkina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the ways of increasing the durability of hob cutters are considered in the article. The main ways to improve the wear resistance of gear cutting tools are the creation of new designs of high-performance hob cutters, as well as using the tool design of improved self-hardening complex alloys. Two ways of increasing the durability of hob cutters are proposed. The first

way is the creation of new designs of high-performance hob cutters; the second is the optimal choice of the alloy brand for the tool. In the proposed hob cutter design, by reducing the working height of the tooth for the first, second and third passes, the length of the base of each tooth is shortened, which makes it possible, without decreasing the strength of the tooth, to reduce the angular pitch of the teeth in the end section and form on the same outer diameter a hob cutter racks. An increase in the number of racks gives a greater number of profiling cuts, which reduces the irregularity of cutting and dynamic loads. The new design of the hob cutter significantly reduces the wear rate of the tool teeth, which leads to an increase in tool life. The requirements to the second path can be satisfied by self-hardening complex iron-based alloys that combine high hardenability with the principle of composite hardening

**Key words:** new hob cutter, durability, complex alloys

#### References

1. Pechenkina L.S. "Influence of the content of structure-forming components on the hardness of low-carbon white cast irons", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 3, pp.134-138.
2. Popova M.I., Popova O.I. "Influence of the design of a worm cutter with a tool-rail cut-off in height on the geometry of a worm wheel", *Compilation of materials of the international scientific and technical conference "Mechanical engineering - the eyes of the young"*, Kremenchuk, 2013, pp. 31-32.
3. Popova O.I., Krivosheya A.V., Popova M.I. "Improvement of mathematical models of shaping of worm wheels with allowance for uniform assumption in processing", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 114-122.
4. Radchenko S.G. "Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering", *Ukrspetsmontazhproekt*, 1998, 274 p.

Submitted 19.03.2018; revised 19.07.2018

#### Information about the authors

**Ol'ga I. Popova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: olga\_10\_popova@mail.ru

**Margarita I. Popova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

**Larisa S. Pechenkina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pls-7@mail.ru

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ****О.В. Скрыгин, А.В. Мандрыкин, В.П. Смоленцев****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** обоснована технико-экономическая целесообразность выбора технологических вариантов изготовления продукции и внедрения результатов научно-исследовательских работ, требующих минимальных затрат для получения качественных изделий. Для объективной оценки правомерности выбора процесса предложены критерии, учитывающие затраты на этапах жизненного цикла изделий с учетом индивидуальных возможностей предприятий - изготовителей, запросов заказчиков и разработчиков перспективной продукции. Первая группа критериев направлена на проектирование технологического процесса, обеспечивающего получение эксплуатационных требований к детали, вторая группа характеризует экономическую эффективность применения, например, электрических методов обработки, где должны учитываться такие показатели, как износ инструмента при электроэрозионной обработке и массовый при электрохимическом процессе, которые должны рассматриваться с учетом возможностей применяемого оборудования. При разработке управляющей программы и технологических режимов электрических методов обработки эти критерии составляют общую структуру и отвечают экономическим критериям. Целью реализации проектируемых технологий и управляющих программ для электрических методов обработки является изготовление изделий, удовлетворяющих заданным эксплуатационным показателям качества при минимизации приведенных затрат. Приведены примеры разработки эффективных управляющих программ для электрических методов обработки, технико-экономические результаты, полученные за счет замены механической обработки на комбинированную электроэрозионно-химическую при изготовлении центрального отверстия в деталях

**Ключевые слова:** обоснование, методы обработки, эффективность, ограничения, примеры использования

**Введение**

Технические показатели технологического процесса зависят от режимных параметров, уровня оснащения производства оборудованием и другими средствами, качества подготовки кадров производственной дисциплины и других факторов. Здесь определяющее место занимает экономическая целесообразность выбора технологических вариантов изготовления продукции, требующей минимальных затрат для получения качественных изделий. Для объективной оценки правомерности выбора процесса требуются критерии, учитывающие затраты на всех этапах жизненного цикла изделий с учетом индивидуальных возможностей предприятий - изготовителей, запросов заказчиков и разработчиков перспективной продукции. Последнее может осуществляться с использованием принципа полезности, разработанного в [1, 2].

**Технико-экономическое обоснование выбора технологического процесса**

В настоящее время в станкостроении принято два [3, 4] принципиальных подходов к

выбору критериев оптимизации для оценки эффективности процессов обработки. Первая группа критериев направлена на проектирование технологического процесса, обеспечивающего получение эксплуатационных требований к детали, вторая характеризует экономическую эффективность применения, например, электрических методов обработки, где должны учитываться такие показатели, как износ инструмента при электроэрозионной обработке и массовый при электрохимическом процессе, которые должны рассматриваться с учетом возможностей применяемого оборудования. При разработке управляющей программы и технологических режимов электрических методов обработки эти критерии должны составлять общую структуру и отвечать экономическим критериям.

Целью реализации проектируемых технологий и управляющих программ для электрических методов обработки является изготовление изделий, удовлетворяющих заданным эксплуатационным показателям качества при минимизации приведенных затрат. По аналогии с [3, 4] под приведенными затратами при изготовлении партии изделий проволочным электродом понимается усредненная стоимость  $C_{0y}$  получения единицы площади боковой поверхности разделяемого материала

$$C_{oy} = \frac{C_n}{F_B} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau_n} C_{no}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $C_n$  - приведённые затраты на получение единицы площади разделяемого материала;  $C_{no}$  - затраты на изготовление партии изделий, при этом площадь боковой поверхности разделяемого материала равна  $F_n$ ;  $\tau_n$  - время обработки партии изделий.

Для обоснования выбора нового технологического процесса требуется проведение научно-исследовательских работ (НИР), эффективность которых оценивается по результатам расчета экономического эффекта. Здесь может применяться методика, приведенная в [10].

Исходные данные:

1. Расчетная величина затрат на НИР ( $\bar{Z}_1$ ). Из опыта прошлых работ намечают период выполнения работы, штат работников с заработной платой и дополнительными оплатами, накладные расходы, затраты на оснащение, командировки. Суммируют затраты, устанавливают сроки выполнения НИР, условия сдачи результатов заказчику.

2. Затраты заказчика на подготовку производства для использования результатов НИР. Сюда входит приобретение или изготовление оборудования, средств технологического оснащения, их установка и запуск, обучение персонала, доводка новой технологии или кон-

струкции, испытания (если это требуется), сопровождение при эксплуатации, сбор информации. Это требует затрат  $\bar{Z}_2$ .

3. Срок ( $t_0$ ) использования технологами изделий, которые созданы в результате выполнения НИР.

4. Программа (N) выпуска (по годам) изделий, где применяются НИР и себестоимость единицы продукции до использования результатов НИР ( $C_{co}$ ) и после выполнения работы ( $C_{ск}$ ).

При выборе программы (N) выпуска изделий следует руководствоваться следующим: брать реальную потребность в изделиях и выбирать количество наименований таким, чтобы обеспечить серийное производство.

$$N = N_1 \cdot n,$$

где  $N_1$  - программа выпуска рассматриваемого изделия;

$n$  - количество наименований аналогичных изделий.

5. Сведения о текущих издержках на изделие после использования результатов НИР ( $T_i$ ).

6. Для оценки затрат на средства и орудия труда долговременного применения вводится коэффициент реновации  $K_p$  (табл. 1)

$$K_p = \frac{E_n}{(1 + E_n)^{t_0} - 1}. \quad (2)$$

Таблица 1

Коэффициент реноваций [11]

$t_{сл}$	$k_p$	$t_{сл}$	$k_p$	$t_{сл}$	$k_p$	$t_{сл}$	$k_p$
1	1,0000	6	0,1296	11	0,0540	20	0,01750
2	0,4762	7	0,1054	12	0,0468	25	0,01020
3	0,3021	8	0,0874	13	0,0408	30	0,00610
4	0,2155	9	0,0736	14	0,0357	40	0,00226
5	0,1638	10	0,0627	15	0,0315	50	0,00086

Результаты НИР дают доход в течение нескольких лет (в течение времени выпуска созданного изделия, а иногда и за счет дохода в процессе эксплуатации (повышение ресурса, сроков хранения и др.), поэтому при расчете эффекта результаты приводятся к единому расчетному году ( $t_p$ ). Для этого в [11] даны коэффициенты приведения (табл. 2), на которые умножают расчетные величины доходов и затрат в зависимости от года использования ре-

зультатов. Коэффициент приведения ( $\alpha_t$ ) может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_t = (1 + E_n)^{t_p - t}, \quad (3)$$

где  $E_n$  – норматив приведения затрат и результатов ( $E_n=0,1$ );  $t$  – год, затраты и результаты которого приводятся к расчетному году;  $t_0$  – срок службы средств и орудий труда долговременного применения.

Коэффициент приведения затрат и результатов к расчетному году [11]

Число лет, предшествующих расчетному году	$\alpha_1$	Число лет, следующих за расчетным годом	$\alpha_1$	Число лет, следующих за расчетным годом	$\alpha_t$
10	2,5937	1	0,9091	11	0,3505
9	2,3579	2	0,8264	12	0,3186
8	2,1436	3	0,7513	13	0,2897
7	1,9487	4	0,6830	14	0,2633
6	1,7716	5	0,6209	15	0,2394
5	1,6105	6	0,5645	20	0,1486
4	1,4641	7	0,5132	25	0,0923
3	1,3310	8	0,4665	30	0,0573
2	1,2100	9	0,4241	40	0,0221
1	1,1000	10	0,3855	50	0,0085
0	1,000				

Эффект от использования НИР будет рассчитываться по формуле

$$\Theta = \frac{P - \bar{Z}}{K_p + E_n}, \quad (4)$$

здесь  $\bar{Z}$  - затраты на внедрение результатов НИР;

$$P = \sum_{t_r}^{t_n} P_t \alpha_t, \quad (5)$$

где  $P_t$  – доход от использования результатов НИР в  $t$  году;  $t_n$  – начальный год расчетного периода;  $t_k$  – конечный год расчетного периода.

Начальный год – период начала финансирования проекта (в т.ч. по НИР).

Конечный год – время завершения использования результатов проекта (НИР), что составляет часть жизненного цикла, включающая разработку, освоение, серийное производство, использование объекта. Конечный год может быть ограничен нормативным ресурсом изделия, сроком службы (оборудование, средства технологического оснащения и др.), обновления номенклатуры изделий (запуск новых типов, поколений летательных аппаратов, смена типов запорной аппаратуры, переход на новые товары народного потребления и др.). Для каждого изделия имеются свои нормативы использования результатов НИР. Обычно для наукоемких изделий этот срок принимают 5-6 лет, для оборудования - 8-10 лет, товаров народного потребления - 10-15 лет.

При оценке дохода  $P_t$  учитываются основные результаты  $P_{t0}$  и сопутствующие  $P_{tc}$

$$P_t = P_{t0} + P_{tc}. \quad (6)$$

Для новых предметов труда (оборудования, средств технологического оснащения производства), созданных с применением результатов НИР,

$$P_{t0} = \frac{B_t}{U_t} C_t, \quad (7)$$

где  $B_t$  – оценка результатов использования новых предметов труда (в денежной оценке, времени использования в течение  $t$ -го года);

$U_t$  – оценка созданных предметов труда (объектов, выпускаемых с использованием результатов НИР) на единицу продукции;

$C_t$  – цена единицы продукции после использования результатов НИР в расчетном году.

Если результаты НИР используются для совершенствования новых технологий, оборудования, других объектов длительного пользования (например, нефтегазовой, бытовой техники), то

$$P_{t0} = C_t \cdot V_t \cdot P_t, \quad (8)$$

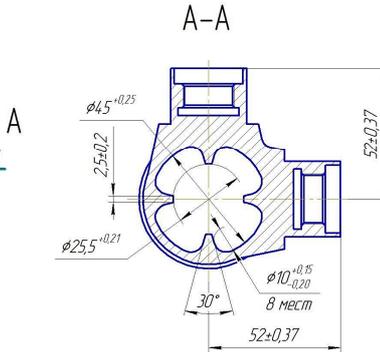
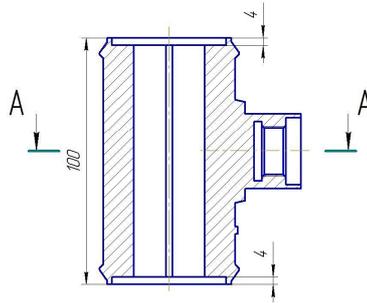
где  $P_t$  – охват созданных средств труда в расчетном году (выработка в единицу времени и др.).

#### Технико-экономическое обоснование использования проволочного инструмента-электрода

Например, созданы технология и станок для разделения металлов проволочным электродом. Станок используется в одну смену и позволяет ускорить процесс изготовления детали (типа приведенной на рис. 1, а) на 30% в течение 1 года.



а)



б)

Рис. 1. Корпус из материала 07X16H6: а) общий вид; б) чертеж детали

Ниже приведена управляющая программа с пояснениями для пользователя (станок AP-TA-450). Операция выполнялась при следующих технологических режимах:  $I = 0,8 \dots 1,8A$ ;  $H = 0,2$ . Скорость перемотки  $F = 1,8$ . Частота генерации импульсов  $F\ 43$ . Длительность импульсов  $D\ 0,4$ . Подача проволоки  $0,3\text{ мм/мин}$ .

В программе показано: Начало программы, определенное символом %; текст в «» - комментарий (Номер программы)

% N5G20 Задание координат в микронах (координаты выводятся без точки)

N10G92X0Y0 Установка нулевой точки программы

N20G41 Включение коррекции инструмента по радиусу слева

N25G01X2910Y12414G50 Подход к контуру без коррекции (G50) по линейной интерполяции (G01)

N30G03X-921Y12717I-2910J-12414 Перемещение с коррекцией по дуге окружности против часовой стрелки (G03)

N35G01X-2146Y17289 Перемещение по прямой

N40G03X-8975Y20578I-4830J-1294

N45G03X-20578Y8975I8975J-20578

N50G03X-17289Y2146I4583J-1999

N55G01X-12717Y921

N60G03X-12717Y-921I12717J-921

N65G01X-17289Y-2146

N70G03X-20578Y-8975I1294J-4830

N75G03X-8975Y-20578I20578J8975

N80G03X-2146Y-17289I1999J4583

N85G01X-921Y-12717

N90G03X921Y-12717I921J12717

N95G01X2146Y-17289

N100G03X8975Y-20578I4830J1294

N105G03X20578Y-8975I-8975J20578

N110G03X17289Y-2146I-4583J1999

N115G01X12717Y-921

N120G03X12717Y921I-12717J921

N125G01X17289Y2146

N130G03X20578Y8975I-1294J4830

N135G03X8975Y20578I-20578J-8975

N140G03X2146Y17289I-1999J-4583

N145G01X1447Y14679

N150M00 Перевод системы ЧПУ в «ждущий режим» (Технологический останов)

N155G01X662Y1175I Дорезка профиля после технологического останова

N160G40 Отмена коррекции на радиус инструмента

N170G01X0Y0G50 Отход в нулевую точку программы без коррекции

N180M02 Функция конца программы

% Символ конца программы

В табл. 3 приведены технико-экономические результаты, полученные за счет замены механической обработки на комбинированную электроэрозионно-химическую при изготовлении центрального отверстия в детали на рис. 1.

Таблица 3

Технико-экономические результаты от использования проволочного инструмента-электрода

Технологический процесс	Технологические показатели		Количество наименований		Трудоемкость, Н/ч	
	погрешность, мм	шероховатость, Ra	оборудования	инструмента	подготовка производства	изготовление
Механическая обработка	0,2	5,0	2	3	5	12
Обработка проволочным электродом	0,05	1,25	1	1	6	2

Тогда

$$P_{t0} = \bar{C}_t \cdot \Delta t \cdot N, \quad (9)$$

где  $\bar{C}_t$  - стоимость оплаты единицы времени выполнения операции на станке;  $\Delta t$  - снижение длительности операции, выполняемой на станке по приведенной программе для обработки детали, показанной на рис. 1, ( $\Delta t = 0,3t_n$ , где  $t_n$  - длительность операции до использования результатов НИР);  $N$  - годовая программа выпуска изделия.

Аналогично рассчитывают результаты использования НИР при разработке новых технологий.

Если эффект возникает на стадии эксплуатации изделия, созданного с использованием результатов НИР (например, увеличение ресурса изделий), то расчет  $P_{tc}$  выполняется по формуле

$$P_{tc} = \sum_1^n \mathcal{E}_{i1} \cdot N, \quad (10)$$

где  $n$  - количество сопутствующих результатов;

$\mathcal{E}_{i1}$  - эффект от использования результата НИР на изделие;

$N$  - количество изделий, выпущенных после внедрения НИР в расчетном году.

В качестве примера рассмотрено повышение дохода от повышения ресурса ( $\Delta R$  в часах) относительно ранее заявленного ресурса ( $R$ ) ракетного двигателя типа, приведенного на рис. 2.

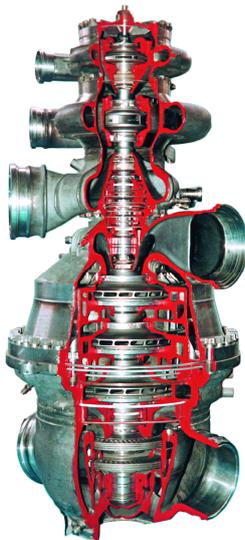


Рис. 2. Разрез ракетного двигателя, выпускаемого серийно

Многолетний опыт выпуска изделий, типа приведенного на рис. 2, показывает, что себестоимость изделия может быть принята постоянной и составляет  $C_{co}$ .

Общая величина расходов  $P_{tc}$  за период  $t$  составит

$$P_{tc} = \frac{C_{co}}{R} \cdot \Delta R \cdot N. \quad (11)$$

В показатель  $P_{tc}$  могут входить положительные результаты по улучшению условий труда (снижение затрат на повышенную оплату, специальное питание, оплата больничных листов, инвалидности по профессиональным заболеваниям, выплата пенсий при льготном трудовом стаже и др.), экологии и охране окружающей среды (может быть учтена, как результат снижения выплат и штрафов). Рассчитывается по формуле

$$P_{tc} = \sum_1^n \mathcal{E}_i \cdot N, \quad (12)$$

где  $\mathcal{E}_i$  - экономический эффект от использования НИР в  $i$  - мероприятии на изделие (например замена токсичного электролита на безвредный);  $N$  - количество производимой продукции в расчетном году.

Затраты на разработку и освоение нового процесса, изделия (в том числе на выполнение НИР, защиту интеллектуальной собственности)

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{np} + \bar{Z}_{ти}, \quad (13)$$

где  $\bar{Z}_{np}$  - затраты на производство продукции за расчетный период;  $\bar{Z}_{ти}$  - эксплуатационные затраты за расчетный период.

Сюда не включаются затраты на реализацию готовой продукции (внешние накладные расходы)

$$Z_{np} = \sum_{ти}^{tk} (T_t + K_t + O_{ct}) \alpha_t, \quad (14)$$

где  $T_t$  - текущие издержки в производстве за расчетный год (не учитываются амортизационные отчисления на реновацию);  $K_t$  - единовременные затраты (в т.ч. капитальные вложения) в расчетном году;  $O_{ct}$  - остаточная стоимость (ликвидационное сальдо) основных фондов, выбывающих в расчетном году.

### Заключение

Представлены технико-экономические показатели и методики расчета экономического эффекта от применения результатов НИР

преимущественно электрических и комбинированных методов обработки при изготовлении деталей с учетом ограничений экономического, технического, организационного характера. Показана целесообразность применения высокоавтоматизированного оборудования. Приведен пример разработки управляющей программы для разделения материалов проволочным электродом при изготовлении высокоресурсной детали сложного профиля.

#### Литература

1. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. 224 с.
2. Сафонов С.В. Критериальная система проектирования и использования технологических процессов для повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2015. Т. 11, № 3. С. 4-10.
3. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Определение инвариантного многообразия траекторий формообразующих

ших движений // Проектирование технологических машин: сб. науч. тр. М.: МГТУ «Станкин», 1997. Вып. 4.

4. Флек М.Б. Технологичность и технология механической обработки деталей вертолетов. Ростов н/Д: «Тerra», 1998. 224 с.

5. Мельников В.П., Смоленцев В.П. Основы управления качеством. М.: ООО «Буки-Веди», 2016. 540 с.

6. Смоленцев В.П., Мельников В.П., Схиртладзе А.Г. Управление системами и процессами: учебник. М.: «Академия», 2010. 336 с.

7. Мельников В.П., Смоленцев В.П., Схиртладзе А.Г. Управление качеством для технических специальностей: учебник. М.: КНОРУС, 2015. 336 с.

8. Информационное обеспечение управления качеством: учебник / В.П. Мельников, В.П. Смоленцев, А.Г. Схиртладзе, В.Б. Моисеев. Пенза: ПензГТУ, 2015. 398 с.

9. Мельников В.П., Смоленцев В.П., Схиртладзе А.Г. Управление качеством: учебник. М.: «Академия», 2011. 336 с.

10. Организационные и экономические исследования в машиностроении / под науч. ред. В.П. Смоленцева. М.: Машиностроение, 2006. 72 с.

11. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова и др. М.: Машиностроение, 2001. Т. 2. 944 с.

Поступила 30.04.2018; принята к публикации 19.07.2018

#### Информация об авторах

**Скрыгин Олег Викторович** - соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fgurvmz@mail.ru

**Мандрыкин Андрей Владимирович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: andrey-man@inbox.ru

**Смоленцев Владислав Павлович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vsmolen@inbox.ru

## TECHNO-ECONOMIC SUBSTANTIATION OF THE USE OF NEW METHODS OF PROCESSING AND RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH IN MACHINE-BUILDING

O.V. Skrygin, A.V. Mandrykin, V.P. Smolentsev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the feasibility of selecting technological options for manufacturing products and introducing research results that require minimum costs for obtaining high-quality products is justified. For an objective assessment of the legality of the choice of the process, criteria are proposed that take into account the costs at the stages of the product life cycle, taking into account the individual capabilities of the manufacturing enterprises, the requests of customers and developers of promising products. The first group of criteria is aimed at the design of the technological process that provides the operational requirements for the part, the second one characterizes the economic efficiency of the application, for example, of electrical processing methods, which should take into account such indicators as tool wear during electroerosion processing and mass outbursts in the electrochemical process, taking into account the capabilities of the equipment used. When developing the control program and technological modes of electrical processing methods, these criteria constitute a general structure and meet economic criteria. The goal of implementing the projected technologies and control programs for electrical processing methods is manufacturing products that meet specified performance characteristics of quality while minimizing the resulted costs. Examples are given of developing effective control programs for electrical processing methods, technical and economic results obtained by replacing machining with a combined electroerosion-chemical process in the manufacture of a central hole in details

**Key words:** project feasibility, processing methods, effectiveness, limitations, examples of use

References

1. Safonov S.V. "Technological support of operational characteristics of products" ("Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy"), Voronezh, VSU, 2015, 224 p.
2. Safonov S.V. "Critical system of designing and using technological processes to improve the operational characteristics of the surface layer", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 4-10.
3. Zakovorotnyy V.L., Flek M.B. "Definition of the invariant manifold of trajectories of form-building motions", *Designing technological machines (Proektirovanie tekhnologicheskikh mashin: sb. nauch. tr.)*, Moscow, MSTU "Stankin", 1997, issue 4.
4. Flek M.B. "Technology of machining of helicopter parts" ("Tekhnologichnost' i tekhnologiya mekhanicheskoy obrabotki detaley vertolotov"), Rostov-na-Dony, Terra, 1998, 224 p.
5. Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P. "Fundamentals of quality management" ("Osnovy upravleniya kachestvom"), Moscow, Buki-Vedi, 2016, 540 p.
6. Smolentsev V.P., Mel'nikov V.P., Skhirtladze A.G. "Management of systems and processes: manual" ("Upravlenie sistemami i protsessami: uchebnik"), Moscow, Academiya, 2010, 336 p.
7. Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P., Skhirtladze A.G. "Quality management for technical specialties: manual" ("Upravlenie kachestvom dlya tekhnicheskikh spetsial'nostey: uchebnik"), Moscow, KNORUS, 2015, 336 p.
8. Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P., Skhirtladze A.G., Moiseev V.B. "Information support for quality management: manual" ("Informatsionnoe obespechenie upravleniya kachestvom: uchebnik"), Penza, Penza State Technical University, 2015, 398 p.
9. Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P., Skhirtladze A.G. "Quality management: manual" ("Upravlenie kachestvom: uchebnik"), Moscow, Academiya, 2011, 336 p.
10. Smolentsev V.P. "Organizational and economic studies in engineering" ("Organizatsionnye i ekonomicheskie issledovaniya v mashinostroyenii"), Moscow, Mashinostroenie, 2006, 72 pp.
11. Dal'skiy A.M., Suslova A.G. et al "Handbook of the technologist-engineer", Moscow, Mashinostroenie, 2001, vol. 2, 944 p.

Submitted 30.04.2018; revised 19.07.2018

Information about the authors

**Oleg V. Skrygin**, Seeker, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: fgupvmz@mail.ru  
**Andrey V. Mandrykin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: andrey-man@inbox.ru  
**Vladislav P. Smolentsev**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vsmolen@inbox.ru

## Физика

УДК 621.357

### ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ НА КАФЕДРЕ ОБЩЕЙ ХИМИИ ВГТУ (ОБЗОР)

Б.А. Спиридонов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведены сведения об образовании кафедры химии в ВГТУ и развитии научно-исследовательской работы за период с 1968 по 2017 гг. Наиболее заметный вклад в становлении кафедры химии внесла профессор А.И. Фаличева. Под ее руководством было выполнено и успешно защищено 14 кандидатских диссертаций. Основными научными направлениями являлись электрохимия, гальваностегия, коррозия и защита металлов. Установление взаимосвязи электрохимических параметров восстановления ионов хрома (III), хрома (VI) и алюминия (III) со спектральными характеристиками растворов стало современным направлением в науке, что позволило сформулировать теоретические основы разработки новых электролитов. Успешно были решены и другие актуальные проблемы, связанные с разработкой электролитов и технологий при получении гальванических покрытий – цинковых, алюминиевых, сплавами хром-кобальт, хром-никель, никель-бор, никель-индий, олово-никель и др. На основании проведенных исследований в статье представлены данные по решению различных практически важных задач, например, рафинированию золота методом электролиза с применением реверсивного импульсного тока, анодированию алюминия для получения нанопористого оксида алюминия. В 2010 г. кафедре химии возглавил д-р техн. наук, профессор В.А. Небольсин. Под его руководством были продолжены и развиты исследования по анодированию алюминия и титана для получения нанопористых оксидных пленок, которые использовали в качестве матриц, в порах которых выращивали углеродные нанотрубки (УНТ) и нитевидные нанокристаллы (ННК) кремния и  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ . Было установлено, что УНТ на матрице пористого оксида алюминия могут быть использованы как сорбенты различных газов (водорода, аммиака и др.). Установлена принципиальная возможность выращивания упорядоченных систем ННК кремния и  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  с использованием маскирующей матрицы из нанопористого диоксида титана и частиц никеля в качестве катализатора процесса роста

**Ключевые слова:** электролит, электролиз, гальванопокрытия, анодирование, алюминий, титан

#### Введение

В соответствии с приказом Министерства высшего образования СССР в 1956 году в г. Воронеже был организован вечерний машиностроительный институт (ВММИ).

В октябре 1956 г. в институт на кафедру химии были приняты преподаватели - канд. хим. наук, доцент Алевтина Прокопьевна Перова и канд. хим. наук Нина Николаевна Пестушко. Это были первые преподаватели химии, принявшие на себя многочисленные обязанности по организации учебного процесса по химии и научной работы. Заведующей кафедрой химии была назначена А.П. Перова. В 1958 г. на кафедре химии работали 6 преподавателей, в том числе доцент Н.Н. Хитрова, ст. преподаватель Н.Г. Мелешко, ст. преподаватель З.Н. Платко, канд. хим. наук Н.П. Пекшева. Необходимо отметить, что Н.Г. Мелешко и З.Н. Платко – участницы ВОВ, которые за ратный подвиг были отмечены Правительственными наградами.

Во исполнение постановления ЦК КПСС и СМ СССР и приказа Росминвуза от 19 июня 1962 г. на базе ВММИ был организован Воронежский политехнический институт. До 1968 г. зав. кафедрой химии был канд. хим. наук, доцент Валентин Емельянович Антипов, который заметно улучшил организационную и учебно-методическую работу.

С 1968 по 1998 гг. кафедрой общей химии руководила д-р хим. наук, профессор Анфиса Ивановна Фаличева. За этот период она существенно повысила уровень научно-исследовательской работы. Большой производственный и научный опыт позволили ей за время работы на кафедре создать школу электрохимиков, специалистов в области гальваностегии. Под ее руководством было защищено 14 кандидатских диссертаций. В январе 2007 г. один из первых аспирантов А.И. Фаличевой Юрий Николаевич Шалимов защитил докторскую диссертацию, которая была выполнена на основании многочисленных исследований в области электрохимических процессов, протекающих в нестационарных режимах. 11 сентября 1992 г. в соответствии с распоряжением

Правительства РФ Воронежский политехнический институт был переименован в Воронежский государственный технический университет. В 1996 г. в связи с реструктуризацией университета кафедра химии была введена в состав кафедры промышленной теплоэнергетики. В 2000 г. на естественно-гуманитарном факультете была организована кафедра технологии и обеспечения гражданской обороны, в состав которой ввели кафедру химии.

В 2010 г. вновь была создана кафедра химии, руководителем которой назначили д-ра техн. наук, профессора Валерия Александровича Небольсина.

В 2017 г. в связи с образованием опорного университета ВГТУ кафедру химии присоединили к кафедре химии и химической технологии материалов, руководителем которой является д-р хим. наук, профессор Олег Борисович Рудаков.

#### Электролитическое хромирование из электролитов на основе соединений хрома (VI)

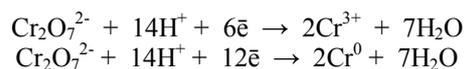
Наиболее заметное развитие научно-исследовательской работы на кафедре химии стало возможным под руководством А.И. Фаличевой. Большая часть исследований была проведена по совершенствованию процесса хромирования. Известно, что электролитическое хромирование является самым распространенным гальваническим процессом, который широко применяется, например, для получения защитно-декоративных покрытий, при изготовлении измерительного и режущего инструмента, валов, осей, цилиндров двигателей, лопаток водяных и паровых турбин и многого другого.

Для получения хромовых покрытий используют в основном электролиты на основе соединений хрома (VI) – хромовые кислоты, в которых хром находится в виде комплексных анионов  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCrO}_4^-$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ . Стандартным считается электролит состава:  $\text{CrO}_3$  - 250 г/л и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  - 2,5 г/л. Получение хромовых покрытий из этих растворов является одним из наиболее сложных процессов и имеет ряд отличительных особенностей: высокий отрицательный потенциал восстановления хромат-ионов, низкий выход по току хрома  $\eta_{\text{Cr}} = 10$ -12 %, высокие плотности тока (50-100 А/дм<sup>2</sup>), обязательное присутствие в электролите некоторых анионов, например,  $\text{SO}_4^{2-}$ , низкая рас-

сеивающая способность. Кроме этого, электролиты на основе хромовой кислоты очень токсичны, что ставит их в ряд наиболее опасных гальванических процессов [1-3].

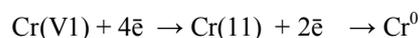
До настоящего времени окончательно не установлен механизм восстановления ионов хрома. Существуют в основном два принципиально различных объяснения. По одному из них предполагается (Е. Либрайх, Н.Д. Бирюков и др.), что процесс протекает в несколько стадий по схеме:  $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+} \rightarrow \text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Cr}^0$ . По другому механизму – ионы шестивалентного хрома восстанавливаются непосредственно до металла (Е. Мюллер, А.Т. Ваграмян, Д.Н. Усачев, Ю.Ю. Матулис, А.И. Фаличева и др.).

Электрохимическими исследованиями и анализом поляризационных кривых было установлено, что восстановление хрома протекает по уравнениям:



Роль анионов заключается в том, что адсорбируясь на поверхности катода, они препятствуют образованию на ней прочной окисной пленки и облегчают адсорбцию и восстановление хромат-ионов до трехвалентных.

На основании полярографических и осциллографических исследований А.И. Фаличевой и Р.И. Бурдыкиной были высказаны новые представления о механизме катодных процессов при электроосаждении хрома. Было показано, что механизм необходимо рассматривать в зависимости от ионного состава электролита, который в большей степени определяется концентрацией  $\text{CrO}_3$  и кислотностью электролита. Была установлена роль специфической избирательной хемосорбции хроматных анионов [4-6]. Электрохимическими и спектрофотометрическими исследованиями было установлено, что в процессе электролиза в разбавленных растворах рН<sub>s</sub> околокатодного слоя может достигнуть значений до 4 и выше, вследствие чего может измениться ионный состав и существенно увеличиться концентрация хромат-анионов. На основании полученных результатов исследований был предложен следующий механизм электровосстановления хрома:



Было установлено, что хром из разбавленных растворов осаждается с меньшим выходом по току, чем из стандартного электролита, что было объяснено преимущественной адсорбцией сульфат-ионов на катоде и соответственно уменьшением поверхностной концентрации хромат-анионов. Стабилизировать процесс электроосаждения хрома из разбавленных электролитов позволяет применение импульсного тока, позволяющего уменьшить диффузионные ограничения для восстановления ионов  $\text{CrO}_4^{2-}$  до металла и интенсифицировать процесс благодаря возможности увеличить катодную плотность тока.

В дальнейшем А.И. Фаличевой с сотрудниками были намечены пути совершенствования процесса хромирования. Например, В.Ф. Малининым была разработана технология хромирования из низкоконцентрированных электролитов (с концентрацией  $\text{CrO}_3$  80-120 г/л) в импульсном режиме электролиза с использованием прямоугольных импульсов тока, что позволило увеличить выход по току хрома в 1,5 – 2 раза, расширить диапазон катодной плотности тока для получения блестящих покрытий [7, 8]. На основании проведенных исследований была разработана установка, позволяющая вести хромирование в импульсном режиме при частоте следования импульсов  $0,1 \text{ с}^{-1}$  с остаточным током в паузе. В этих условиях электролиза за время паузы  $\text{pH}_s$  околокатодного слоя успевает уменьшиться и тормозящее действие адсорбированной катодной пленки на электровосстановление хроматных анионов уменьшается и выход по току хрома возрастает.

Важным достоинством этой технологии является использование менее агрессивного низкоконцентрированного электролита. Особенно эффективным явилось введение в электролит криолита, что позволило почти вдвое снизить его агрессивность. Данная технология была внедрена на 18 предприятиях России и ближнего зарубежья. Среди них Челябинский тракторный завод, Минский моторный завод, Хмельницкое производственное объединение “Адвис” и др.

Другим направлением в совершенствовании процесса хромирования было проведение исследований по созданию экологически безопасных электролитов на основе соединений хрома (111). Впервые в нашей стране проблема хромирования из растворов, содержащих соединения  $\text{Cr}(111)$ , была рассмотрена в рабо-

тах Н.Т. Кудрявцева [9], который справедливо считал, что электролиты на основе трехвалентного хрома перспективны: они безвредны, электрохимический эквивалент в два раза больше, чем в растворах хромовой кислоты, а хром осаждается с более высоким выходом по току (до 30%). С учетом этого была показана возможность создания экологически безопасных, более производительных и менее энергоемких процессов хромирования в сравнении с использованием стандартных растворов на основе хрома (VI). Однако широкого применения эти электролиты не нашли, что прежде всего связано с их малой устойчивостью, обусловленной сильно выраженными комплексообразующими свойствами хрома (111).

#### Электролитическое хромирование из электролитов на основе соединений хрома (111)

А.И. Фаличевой было установлено [4,10], что состав комплексов хрома (111) зависит от ряда факторов: концентрации солей трехвалентного хрома, температуры, природы лигандов, pH электролита и др. Сульфат хрома (111) может существовать в различных модификациях. Каждая из них представляет собой комплекс определенного состава. Например, фиолетовая модификация состоит из комплексов  $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ . В концентрированных растворах сульфата хрома (111) образуются комплексы  $[\text{Cr}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$ , а в разбавленных растворах -  $[\text{Cr}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4]^+$ . При температуре до  $40-45^\circ\text{C}$  раствор сульфата хрома (111) приобретает сине-зеленую окраску, а при  $80-90^\circ\text{C}$  – зеленую (зеленый сульфат хрома (111)) или ЗСХ. Из фиолетовой модификации хром не осаждается, а из растворов ЗСХ – с очень низким выходом по току (5-7%). Наилучшие результаты были достигнуты при хромировании из сернокислых растворов, полученных при старении, т.е. выдержке при  $20-25^\circ\text{C}$  в течение месяца. В дальнейшем это время было сокращено до 2-х суток введением в раствор сульфата хрома (111) определенной концентрации [11].

Полученный в этих условиях сульфат хрома (111) был назван “измененным” ЗСХ, состав которого был изучен различными методами (спектральным, кондуктометрическим, ионообменным). Сравнительными исследованиями было установлено, что большая часть хрома (111) в ЗСХ находится в виде катионных (43%) и электронейтральных комплексов

(45%), а 12% - в виде анионов. В “измененном” ЗСХ содержание катионной формы возрастает до 63%, а количество электронейтральных комплексов снижается до 25%.

Исследованиями катодной поляризации при электроосаждении хрома из растворов сульфата хрома (111) различного ионного состава было установлено, что суммарная поляризационная кривая, полученная в растворе ЗСХ, расположена в области потенциалов положительнее, чем в растворе “измененного” ЗСХ, при этом парциальная скорость разряда ионов  $H^+$  увеличивается. В этих условиях выход по току водорода возрастает до 80%. В растворе с “измененным” ЗСХ выход по току водорода снижается, так как возрастает концентрация потенциалопределяющих ионов за счет комплексов в катодной форме и, соответственно, увеличивается выход по току хрома [12].

Сопоставление спектральных характеристик растворов различного ионного состава с кинетическими характеристиками позволило предположить, что растворы ЗСХ поглощают свет большей длины волны и с меньшей энергией возбуждения  $d$ -электронов хрома (111) (204,32 кДж/моль). Для хрома (111), входящего в состав “измененного” ЗСХ, эта энергия составляет 206,84 кДж/моль. На основании полученных данных был сделан вывод о том, что различие в катодной поляризации и потенциалов восстановления хрома (111) обусловлено разным сродством хрома (111) к электрону. Чем ближе вакантный энергетический уровень к ядру атома, тем легче электрон с катода переходит на него. Из растворов, поглощающих свет с большей энергией кванта, восстановление хрома (111) происходит при более электроположительных потенциалах.

Для практического применения были разработаны электролиты на основе “измененного” ЗСХ, в которые вводили поверхностно-активные добавки - моноэтаноламин или уротропин - с целью повышения блеска хромовых покрытий и их толщины (до 10 мкм). Был установлен оптимальный состав электролита (моль/л): сульфат хрома (“измененный” ЗСХ) - 0,5 (спектральные характеристики -  $\lambda_1 = 582-583$  нм;  $\lambda_2 = 416-418$  нм); сульфат натрия - 0,5; моноэтаноламин - 0,03.

В дальнейшем процесс хромирования из “измененного” ЗСХ был усовершенствован проведением электролиза в нестационарных режимах. Ю.Н. Шалимовым была разработана

электротермографическая установка, позволяющая измерять температуру приэлектродного слоя (толщина около 150 мкм) электролита  $t_s$  [13]. Исследованиями было установлено, что при электролизе в зависимости от катодной плотности тока  $i_k$  и продолжительности  $\tau_{эл.}$  процесса  $t_s$  может повышаться до 42-45<sup>0</sup>С, а при некоторых режимах ( $i_k = 35$  А/дм<sup>2</sup>,  $\tau_{эл.} = 30$  мин.) достигать 62-65<sup>0</sup>С. При этих температурах “измененный” ЗСХ переходит в ЗСХ, что было подтверждено спектрофотометрическими исследованиями. Поскольку выход по току хрома в ЗСХ меньше, чем в “измененном” ЗСХ, поэтому необходимо было разработать метод, позволяющий снизить температуру в прикатодном слое электролита. Традиционным методом, например, перемешиванием электролита необходимое снижение  $t_s$  не достигалось. С целью стабилизации  $t_s$  и всего процесса электролиза Ю.Н. Шалимовым был разработан метод, позволяющий проводить электролиз на импульсном токе. Для этого был использован источник постоянного тока, включающий транзисторный генератор П-импульсов, что позволило варьировать частоту следования импульсов ( $f$ ) от 0,01 до 500 Гц, а их длительность ( $\tau$ ) - от 0,002 до 100 с. Изменяя соотношение времени электролиза ( $\tau_{имп.}$ ) к времени паузы ( $\tau_{паузы}$ ), был определен оптимальный режим ( $\tau_{имп.} = 12$  с и  $\tau_{паузы} = 5$  с). В этих условиях проведения электролиза почти вдвое расширился диапазон  $i_k$  для получения блестящих хромовых покрытий, выход по току хрома увеличился до 30%, а толщина - до 50 мкм [14,15].

На основании проведенных исследований была разработана технология получения электролитических хромовых покрытий и успешно прошла испытания на Пензенском велосипедном заводе и Воронежском заводе “Эталон”.

### Свойства электролитических хромовых покрытий

Для изучения физико-химических свойств электролитических осадков хрома Э.А. Гранкиным был применен структурно-чувствительный метод, основанный на измерении внутреннего трения [16]. Внутреннее трение твердых тел представляет собой сложное, зависящее от многих факторов, явление. Диссипация энергии механических колебаний зависит от амплитуды и частоты, температуры и кристаллографической ориентации в исследуемом образце.

дуюемом образце, наличия в нем примесей, предварительной пластической деформации, термообработки, облучения и др.

Исследования были проведены на установке, состоящей из двух генераторов – низкочастотного и высокочастотного. Возбуждение исследуемой пленки электролитического хрома проводили электростатически низкочастотным генератором. Пленка хрома при этом совершает механические колебания, моделируя по частоте высокочастотный генератор. Частотномодулируемый сигнал принимается антенной измерителя частотной модуляции, детектируется и усиливается. С выхода измерителя частотной модуляции синусоидальный сигнал с амплитудой, определяемой отклонением пленки от положения равновесия, и частотой, равной собственной частоте изгибных колебаний пленки, поступает на вход амплитудного дискриминатора. При отключении низкочастотного генератора колебания пленки затухают, срабатывает дискриминатор и пересчетное устройство фиксирует число затухающих колебаний пленки между двумя заданными по амплитуде уровнями [16].

Исследованиями было установлено, что величина внутреннего трения  $Q^{-1}$ , определяемая в широком диапазоне температур (от  $-180$  до  $900^{\circ}\text{C}$ ), зависит от режимов электролиза – катодной плотности тока  $i_k$ , температуры электролита и параметров импульсного тока. Пленки хрома, полученные на импульсном токе, имеют более низкое внутреннее трение, чем пленки, осажденные на постоянном токе.

Была изучена природа максимума на кривой зависимости  $Q^{-1}(T)$  – пика внутреннего трения. Независимо от состава электролита хромирования на кривой  $Q^{-1}(T)$  обнаружен водородный пик при температуре  $50^{\circ}\text{C}$  для пленок хрома, осажденных из электролитов “измененного” ЗСХ, и при  $10^{\circ}\text{C}$  – для пленок, полученных из стандартного электролита. После термической обработки образцов хрома при  $200^{\circ}\text{C}$  водородный пик исчезает. При вторичном наводороживании пленок хрома, например, методом электролиза в растворах серной кислоты или натриевой щелочи, водородный пик был воспроизведен. Это позволило объяснить участие водорода в появлении максимума на кривой зависимости  $Q^{-1}(T)$ .

Последующими исследованиями некоторых физико-химических свойств хромовых покрытий, например, антикоррозионных, установлено, что между коррозионной стойко-

стью и внутренним трением обнаружена заметная корреляция. Таким образом, применение метода внутреннего трения для изучения электролитических осадков хрома позволило расширить сведения об их структуре и объяснить некоторые свойства.

### Наводороживание хромовых покрытий

Многочисленными исследованиями было установлено, что хромовые покрытия, полученные из стандартного электролита на основе соединений хрома (VI), в процессе электролиза наводороживаются, что обусловлено очень низким выходом по току хрома (10-12%) и, соответственно, высоким выходом по току водорода. Следствием этого является изменение структуры и некоторых свойств осадков хрома. Очевидно, что хромовые покрытия, осажденные из электролитов на основе соединений хрома (III), также должны наводороживаться. Впервые наводороживание хромовых покрытий, полученных из сернокислых растворов хрома – “измененного” ЗСХ, было изучено исследованиями, проведенными А.А. Гуляевым [17]. Для определения содержания водорода был разработан метод экстракции водорода из хромовых осадков в вакууме при нагревании в интервале температур  $200-400^{\circ}\text{C}$ . Измерения проводили в запаянных манометрических лампах типа ЛТ-2, в которые помещали исследуемые образцы. Продолжительность экстракции составляла 30 мин. Конечное значение давления фиксировалось вакуумметрическим прибором ВТ-3, начальное значение – ВИТ-2 ( $5 \times 10^{-5}$  тор).

Было установлено, что наводороживание осадков хрома зависит от ряда факторов:  $i_k$ ,  $\tau_{эл}$ , температуры сернокислого электролита и его pH. Зависимость содержания водорода от  $i_k$  имеет параболический характер. Сложное влияние оказывает  $\tau_{эл}$ . Установлено, что в начальный период электролиза (5-10 мин.) содержание водорода в осадках хрома возрастает незначительно, а при увеличении  $\tau_{эл}$  резко возрастает, что объяснено структурными изменениями в хrome. Заметное влияние оказывает температура электролита, с повышением которой от  $20$  до  $26^{\circ}\text{C}$  наводороживание снижается почти в четыре раза. Обнаружено влияние кислотности электролита: с увеличением pH существенно возрастает содержание водорода в осадках хрома, обусловленное внедрением в структуру образующихся в процессе

электролиза основных соединений хрома – оксидов и гидроксидов. Установлено, что осадки хрома, полученные на импульсном токе, менее наводороженные (на 20-25%) в сравнении с покрытиями, осажденными на постоянном токе [17].

В последующих исследованиях метод вакуумной экстракции был использован для определения наводороживания в пленках различных гальванопокрытий.

### Электролитические покрытия сплавами Cr-Co, Ni-Cr

Известно, что электроосаждение сплавов на катоде является одним из эффективных методов улучшения качества металлических покрытий. А.И. Фаличевой с сотрудниками были разработаны электролиты и технологии, позволяющие осаждать сплавы с разнообразными физическими и химическими свойствами [18-24].

На основе оптимального состава хромирования, включающего “измененный” ЗСХ, был разработан электролит для электроосаждения покрытий сплавом Cr-Co. Установлено, что при введении в базовый электролит сульфата кобальта в количестве 0,013-0,02 моль/л осаждается сплав Cr-Co с содержанием кобальта 10-12 % и структурой твердого раствора [18]. Исследовано влияние сульфата кобальта на некоторые свойства сернокислого электролита и свойств покрытий. С увеличением содержания  $\text{CoSO}_4$  повышается электропроводность электролита, его кроющая способность, расширяется диапазон  $i_k$  для получения блестящих покрытий. С увеличением содержания кобальта в сплаве, например, с 0,1 до 5% на 40% снижаются внутренние напряжения, а микротвердость повышается на 30%, наводороживание уменьшается почти в 2,5 раза.

Исследованы некоторые кинетические закономерности при совместном электроосаждении хрома и кобальта методом снятия поляризационных парциальных кривых для процессов образования хрома, кобальта, водорода, хрома (11) и сплава хром-кобальт. Установлено, что при электроосаждении сплава Cr-Co разряд ионов хрома (111) происходит с депляризацией, а ионов кобальта (11) с повышенной поляризацией [19].

Изучено влияние режимов электролиза на состав, выход по току сплава Cr-Co и корро-

зионные свойства. С увеличением  $i_k$  и pH электролита содержание кобальта в сплаве уменьшается, а выход по току возрастает. С повышением продолжительности электролиза содержание кобальта в сплаве увеличивается, выход по току сплава снижается. Установлено существенное повышение коррозионной стойкости осадков сплава с увеличением содержания в них кобальта. Например, при увеличении содержания кобальта в сплаве с 0,1 до 3,3% ( $i_k = 35 \text{ А/дм}^2$ ,  $\tau_{эл} = 5 \text{ мин.}$ , pH электролита 0,75) коррозионный ток снижается в три раза.

Одной из проблем при электроосаждении как хромовых покрытий, так и их сплавов является выбор материала анода. При получении хромовых покрытий из стандартных электролитов в качестве анода используют нерастворимый свинцовый. При электроосаждении хрома из электролитов на основе трехвалентных соединений свинцовые аноды применять нельзя, поскольку в процессе электролиза у анода накапливаются ионы шестивалентного хрома и препятствуют получению хромовых покрытий. Для электроосаждения покрытий Cr-Co были рекомендованы аноды из сплава  $\text{Pb}+10\%\text{Sn}+0.5\%\text{Co}$ . В процессе электролиза происходит накопление ионов трехвалентного кобальта в соответствии с анодной реакцией:  $\text{Co}^{2+} - \bar{e} = \text{Co}^{3+}$ , которая протекает легче, чем окисление Cr(111) в Cr(VI) [20]. В дальнейшем в качестве анода был рекомендован платинированный титан, на котором скорость окисления хрома (111) ничтожно мала.

А.И. Фаличевой и И.А. Полуниной было изучено анодное поведение никель-хромовых сплавов, которые были рекомендованы в качестве анодов при получении защитно-декоративных покрытий Ni-Cr из сернокислых электролитов [21, 22].

В работе [23] показано, что с целью получения покрытий сплавом Ni-Cr был использован базовый сернокислый электролит на основе “измененного” ЗСХ, в который вводили сернокислый никель до 5 г/л и уротропин (0,02 моль/л). В зависимости от режимов электролиза были получены качественные осадки сплава Ni-Cr с содержанием никеля от 0,02 до 10%, выходом по току до 20% и толщиной 10-20 мкм.

Для получения покрытий сплавом Ni-Cr был разработан электролит, включающий сернокислый хром (“измененный” ЗСХ) и сернокислый никель, а в качестве буферных и комплексообразующих – янтарную и малоновую

кислоты. Электрохимическими исследованиями и из анализа парциальных кривых было установлено, что в процессе электролиза образуются ионы хрома (II), не оказывающие, однако, существенного влияния на разряд ионов хрома (III). Основными процессами являются совместные выделения хрома и никеля. Применение буферных добавок заметно стабилизирует pH<sub>э</sub> и в целом катодный процесс, что позволяет получать защитно-декоративные покрытия в широком диапазоне  $i_k=5-20$  А/дм<sup>2</sup> сравнительно большой толщины и выходом по току 20-35% [24].

Последующие исследования были направлены на решение различных технологических задач.

### Получение и свойства пленок пиролитического хрома

Пиролитический хром используют в качестве износостойких и защитных покрытий, которые применяют для избирательного и неизбирательного травления в производстве низкоомных резисторов с проводящим слоем, а также высокоизносостойчивых хромированных фотошаблонов, для регенерации керамических и стеклянных оснований и т.д. Пленки пиролитического хрома получали пиролизом хроморганической жидкости бисэтилбензолхрома БАРХОС на цилиндрических керамических основаниях при 450<sup>0</sup>С и остаточном давлении в вакуумной камере, равном 1-10 мм рт. ст. Образующиеся пленки пиролитического хрома имеют сложный состав, включающий оксиды и карбиды углерода, и очень высокую коррозионную стойкость. Пленки не растворимы ни в одной из известных неорганических кислот. Поскольку в данной работе эти пленки были предназначены в качестве резисторов, после их получения необходимо было подобрать состав раствора для травления и доведения сопротивления резистивного слоя до номинала, а процесс травления проводить с требуемой скоростью.

На кафедре был разработан состав раствора травителя, включающий хлорноокислый церий (IV), хлорную кислоту и серноокислый кобальт (III) [25]. Применение данного состава позволило увеличить почти втрое скорость травления пленок при комнатной температуре и примерно в восемь раз при 70<sup>0</sup>С. На основании полученных результатов была разработана технология изготовления резисторов с задан-

ном значением номинального сопротивления и в 1980 г. внедрена на одном из радиозаводов в г. Нижний Новгород.

### Электроосаждение покрытий олово-никель

Электролитическое легирование оловянных покрытий некоторыми металлами, например, висмутом, кобальтом, никелем, устраняет переход белой модификации в серую, повышает прочность спая и длительность сохранения паяемости.

Для получения покрытий нашли применение фторид-хлоридные электролиты. Кроме солей никеля и олова основным компонентом в этих электролитах является фторид аммония, который образует комплексные анионы  $[\text{SnF}_4^{2-}$  и  $\text{SnF}_6^{4-}]$ , уменьшает окисление олова (II) в олово (IV), повышает блеск покрытий, но при этом увеличивает их хрупкость, способствует образованию трещин и тем самым снижает защитные свойства.

Для улучшения защитных свойств покрытий Sn-Ni был разработан электролит, в состав которого дополнительно ввели поверхностно-активную добавку ОС-20 [26]. Из этого электролита покрытия осаждаются светлые, с хорошей адгезией к основе, практически без пор и трещин.

В 1985 г. технология нанесения покрытия олово-никель была внедрена на предприятии п.я. Х-5446 (филиал ВЗПП "Электроника", г. Нововоронеж) и в течение четырех лет показала стабильные результаты при нанесении покрытий на токопроводящие элементы некоторых типов транзисторов.

### Электролитическое цинкование

Одним из реальных путей улучшения физико-химических свойств цинковых гальванопокрытий и интенсификации процесса цинкования является снижение pH<sub>э</sub> в околокатодном слое за счет увеличения буферной емкости электролита.

Исследованиями было установлено [27], что в качестве эффективных буферных добавок можно использовать некоторые ди- и оксикарбоновые кислоты, например, янтарную (0,2 моль/л) или молочную кислоту (0,7 моль/л). В присутствии этих добавок осаждаются качественные беспористые цинковые покрытия в сравнительно широком диапазоне  $i_k = 2-5$  А/дм<sup>2</sup> при комнатной температуре.

Электрохимические измерения показали, что в присутствии молочной и янтарной кислот заметной поляризации при выделении цинка не наблюдается, что обуславливает высокий выход по току цинка при одновременном увеличении скорости процесса за счет повышения стабильности  $pH_s$  и торможения процесса гидроксидообразования. При введении в электролит блескообразующей добавки – полиэтиленполиамин осаждаются высококачественные блестящие цинковые покрытия. Сочетание буферных и блескообразующих добавок позволило создать электролит, из которого цинковые покрытия осаждаются толщиной до 60 мкм. Оптимальный по составу электролит цинкования успешно прошел испытания на ВЗПП “Электроника”.

#### **Гальванические покрытия сплавом никель-бор**

Известно, что никелевые пленки нашли широкое применение в качестве технологического покрытия держателей микросборок взамен золотых покрытий. Они имеют хорошую свариваемость с алюминиевой микропроволокой методом ультразвуковой микросварки. Однако существенным недостатком пленок из чистого никеля является их низкая теплостойкость, поэтому эти покрытия применяют только при низкотемпературном монтаже элементов или при использовании восстановительной среды. При температуре 250-300<sup>0</sup>С на воздухе происходит интенсивное увеличение толщины оксида никеля, следствием чего является ухудшение качества свариваемости, а при длительной термообработке – к ее полной потере.

Проведенными исследованиями [28] было установлено, что электрохимическое легирование никеля 1 % бора значительно повышает свариваемость с Al микропроволокой и увеличивает коррозионную стойкость гальванически осажденных пленок сплава никель-бор [29].

В дальнейшем А.И. Фаличевой и А.В. Звягинцевой были проведены исследования по совершенствованию процесса электроосаждения покрытий сплавом никель-бор [30, 31]. Был разработан сульфатный электролит, содержащий борорганическую добавку, из которого получены гальванопокрытия никель-бор с содержанием бора до 2%. Установлено, что в отличие от аналогов из этого электролита можно осаждавать покрытия толщиной до 500 мкм, при этом твердость почти в три раза

больше, чем у никеля. Покрытие не окисляется при термообработке до 800<sup>0</sup>С, имеет стабильное и низкое переходное сопротивление, обладает способностью к пайке с бескислотными флюсами и сварке ультразвуком с алюминиевой микропроволокой. Покрытие никель-бор было рекомендовано в качестве износостойкого взамен хромового, а также для замены драгметаллов, используемых при сборке полупроводниковых приборов и печатных плат.

Технология нанесения гальванопокрытий сплавом никель-бор была успешно внедрена на некоторых радиоэлектронных предприятиях.

#### **Электроосаждение алюминиевых гальванопокрытий**

Одним из основных элементов ИЭТ, например, транзисторов и интегральных схем, являются токопроводящая пленочная металлизация и микропроволока из алюминия. При наличии на поверхности этих элементов остаточной влаги и в процессе термоциклирования (включение и выключение прибора) создаются условия для возникновения электрохимической коррозии, причиной которой является образование макрогальванических элементов (контактная коррозия).

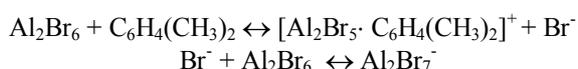
Проведенными научными исследованиями А.И. Фаличевой с сотрудниками было установлено, что при контакте алюминиевой проволоки с золотой металлизацией, используемой в транзисторах (например, КТ312), и в условиях ускоренных коррозионных испытаний наблюдается интенсивное разрушение микросварного контакта Al – Au [32].

Очевидно, что более коррозионноустойчивым должен быть сварной контакт алюминиевой проволоки (Al<sub>пр</sub>) с алюминиевой металлизацией, для которого практически отсутствует разность потенциалов. Алюминиевую металлизацию получают различными способами: напылением в вакууме или плакированием. Однако применение этих способов представляет технологические трудности и повышает стоимость производства изделий электронной техники.

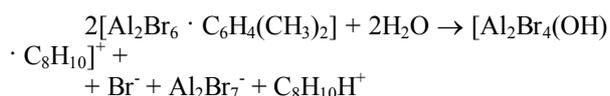
На основании проведенных исследований был сделан вывод, что наиболее перспективным является применение вместо золотого гальванического покрытия алюминиевого, электроосаждение которого осуществляли из ксилольных электролитов как наиболее ста-

бильных и допускающих ограниченный контакт с атмосферой [33- 37].

Основными компонентами ксилольных электролитов являются бромид алюминия и изомеры ксилола или их смесь. Особенностью приготовления электролитов является образование сложных по составу комплексных соединений, образующихся в течение длительного времени (около 20 часов). При взаимодействии бромида алюминия с ксилолом образуются  $\sigma$ - и  $\pi$ - комплексы, способные к диссоциации и обеспечивающие электропроводность растворов

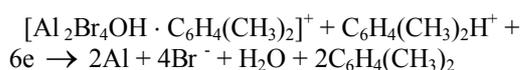


Под действием следов атмосферной влаги эти комплексы подвергаются гидролизу, что также способствует повышению электропроводности растворов:



Электропроводность растворов может увеличиваться и вследствие процессов переалкилирования и диспропорционирования ароматического углеводорода.

В результате сложных взаимодействий в ксилольных электролитах образуются потенциалопределяющие ионы, способные участвовать в катодном процессе, например:



Была изучена кинетика и свойства алюминиевых покрытий. Для улучшения качества алюминиевых покрытий вводили различные поверхностно-активные вещества [37]. Методом внутреннего трения исследована тонкая структура алюминиевых покрытий и сделан вывод о том, что для повышения коррозионной стойкости алюминиевые покрытия необходимо подвергать температурному отжигу [38, 39].

На основании проведенных исследований был разработан метод нанесения гальванического алюминиевого покрытия из ксилольного электролита на кристаллодержатели некоторых типов транзисторов и успешно проведены его испытания в производственных условиях на п/я А-7693 (ВЗПП "Электроника", г. Воронеж).

## Электрорафинирование золота

За период с 1997 по 2017 гг. сотрудники кафедры химии (химического цикла) продолжали проводить исследования по различным научным направлениям. В 1997–2003 гг. совместно с сотрудниками КБ "Феррит" (г. Воронеж) были проведены исследования по электрорафинированию золота [40]. Известно, что одним из методов очистки золота от примесных металлов (Zn, Fe, Cd, Sn и др.) является электрохимический метод. Создаются условия, при которых на золотом аноде, содержащем примесные металлы, происходит их окисление и переход в виде ионов в электролит, содержащий хлорид золота с высокой концентрацией. На катоде под действием постоянного тока осаждается только золото, а примесные металлы остаются в электролите. Однако применение этого метода ограничивается невозможностью перерабатывать сплавы (черновое золото) с содержанием серебра более 15 %, поскольку на поверхности анода образуется пассивирующая пленка хлорида серебра.

Для обеспечения переработки сплавов золота с повышенным содержанием серебра (до 30-40%) был разработан способ электрорафинирования, предусматривающий использование биполярного импульсного тока. Анодная пассивация преодолевается периодическим воздействием импульсов электрического тока, что достигается изменением соотношения импульсов тока положительного и отрицательного знаков (20:1). Эти параметры устанавливаются в процессе электролиза в зависимости от электрохимических характеристик электролитической ячейки, определяемых содержанием серебра в сплаве [41].

Разработанная технология электрорафинирования золота с применением реверсивного импульсного тока успешно прошла испытания на Магаданском аффинажном заводе.

## Анодирование алюминия

В последние десятилетия проводятся многочисленные исследования по синтезу нанопористых материалов, например, анодных пленок оксида алюминия (ПОА) или оксида титана, которые используют в качестве основы для получения упорядоченных массивов наночастиц с контролируемым диаметром и высокой геометрической анизотропией [42]. Возможность применения анизотропных металличе-

ских наночастиц (Ni, Co, Ni/Cu) на основе пористых пленок анодированного оксида алюминия показана, например, в работе [43].

Перспективным направлением в создании батареек и топливных элементов является использование ПОА, в поры которого внедряют углеродные нанотрубки (УНТ) [44]. Другим возможным применением нанотрубок может быть хранение водорода при создании топливных элементов. В последние годы УНТ начали широко использоваться для обнаружения газов ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$  и др.) при комнатной температуре при создании сенсоров.

За период с 2010 по 2013 гг. на кафедре химии под руководством В.А. Небольсина были проведены исследования по синтезу ПОА и изучению его свойств. ПОА получали по методу двухстадийного анодирования в 0,6 М сульфосалициловой кислоте при анодной плотности тока - 2  $\text{A}/\text{дм}^2$  и температуре 25 $^\circ\text{C}$ .

Первую стадию анодирования проводили в течение 10 – 15 мин. на алюминиевой фольге. Образовавшуюся на поверхности алюминия оксидную пленку растворяли в смеси 20 г/л  $\text{CrO}_3$  и 35 мл  $\text{H}_3\text{PO}_4$  при температуре 80 $^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. Продолжительность второго анодирования определяла толщину оксидной пористой пленки и составляла от 30 мин. Полученные пленки ПОА с упорядоченной структурой использовали в качестве подложки для выращивания УНТ в порах оксида.

Процесс синтеза УНТ на подложке из ПОА проводили пиролизом ацетилена с использованием в качестве катализатора нитрата никеля. Катализатор наносили в виде 0,5 М водного раствора путем пропитывания нанопор ПОА в ультразвуковой установке. В качестве буферного газа использовали водород. Расход газовой смеси варьировали в интервале от 0,5 до 1,5 л/мин. Время подачи газовой смеси изменяли в пределах от 5 до 30 мин. Пиролиз ацетилена осуществляли в интервале температур от 673 до 923 К. Для очистки от аморфного углерода и наночастиц катализатора полученные УНТ обрабатывали 60%-ой азотной кислотой. Структуру полученных образцов изучали на растровом электронном микроскопе JSM 6380LV в режиме отраженных электронов.

На рис. 1 представлена поверхность ПОА, из которого видно, что в процессе анодирования образуется регулярная структура с размером пор около 50 нм. После пиролиза на поверхности ПОА формируются УНТ с диамет-

рами близкими к 50 нм (рис. 2), что свидетельствует о том, что углеродные нанотрубки выращиваются из пор анодного оксида алюминия.

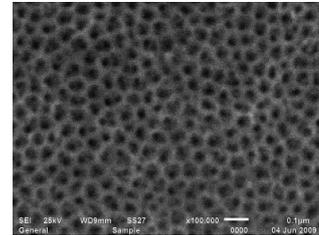


Рис. 1. СЭМ-фотография анодного пористого оксида алюминия

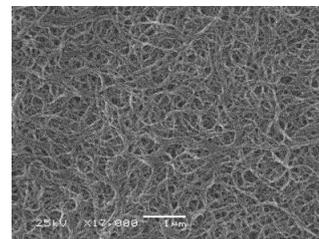


Рис. 2. СЭМ-фотография поверхности НОА, структурированной УНТ после обработки в 60 %-ой  $\text{HNO}_3$

На основании проделанных экспериментов был сделан вывод о том, что синтез УНТ на матрице ПОА позволяет получать однородные по диаметру и длине УНТ. Практическим применением результатов данной работы может стать использование композитов УНТ-НПОА в качестве эффективных адсорбентов - уловителей и сенсоров, например, водорода, аммиака и других газов в различных отраслях промышленности и отраслевых лабораториях.

### Анодирование титана

Одним из перспективных материалов для создания композитных материалов может быть анодный оксид титана, в порах которого можно выращивать нитевидные кристаллы, например, кремния.

Известно, что нитевидные нанокристаллы (ННК) кремния и других полупроводниковых материалов, получаемые эпитаксиальным синтезом по схеме пар - капельная жидкость - кристалл (ПЖК), обладают специфическими физическими свойствами и могут найти применение в качестве материалов для создания электронных приборов нового поколения, а также для получения необходимой текстуры на поверхности полупроводников [47].

Выращивание нитевидных кристаллов кремния чаще всего осуществляют на подложках из монокристаллического кремния электронной чистоты в виде полированных пластин с кристаллографической ориентацией {111}. В качестве катализаторов процесса ПЖК роста НК используют различные металлы, например Zn, Ni, Cu, Ag, Au, Pt, Pd и др. [2, 3]. Основными требованиями, предъявляемыми к металлам-катализаторам, являются устойчивость их к окислению, неспособность образовывать силициды и соединения с компонентами газовой среды, в которой проводится синтез ННК.

Ранее проведенными исследованиями на кафедре химии В.А. Небольсимым с сотрудниками было установлено [48-50], что наиболее стабильный, одномерный ориентированный рост кристаллов на кремниевой подложке обеспечивают жидкие частицы расплавов никеля и серебра. В присутствии этих металлов образующиеся кристаллы ориентированы вертикально к подложке, имеют цилиндрическую форму, постоянное по длине поперечное сечение, совершенную кристаллическую структуру.

В дальнейшем исследования были продолжены и в качестве подложки для выращивания ННК  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  были использованы нанопористые пленки диоксида титана НПАПОТ, полученные анодным окислением при  $i_a = 10 \text{ mA/cm}^2$  и  $\tau_{\text{эл.}} = 45 \text{ мин.}$  в электролите состава: 1%  $\text{NH}_4\text{F}$ , 2 %  $\text{H}_2\text{O}$ , растворитель – этиленгликоль. Было установлено, что в этих условиях анодирования на поверхности титана формируется нанопористая структура диоксида титана (рис. 3).

Для выращивания ННК в нанопорах диоксида титана в качестве катализатора использовали никель. Выращивание ННК  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  проводили методом химического парового осаждения в хлоридно-водородной проточной системе с горизонтальным расположением трубчатого кварцевого реактора [48]. Парогазовая смесь состояла из тетрахлорида кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) и германия ( $\text{GeCl}_4$ ) с концентрацией от 0,005 до 0,01 моль/л в водороде. Выращивание ННК осуществляли при  $T = 1273\text{-}1420 \text{ K}$  в течение 10-15 мин.

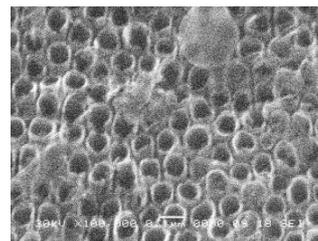


Рис. 3. РЭМ–изображение поверхности оксида титана, полученного из электролита состава: 1%  $\text{NH}_4\text{F}$ , 2 %  $\text{H}_2\text{O}$  и остальное – этиленгликоль. Режим электролиза:  $i_a = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\tau_{\text{эл.}} = 45 \text{ мин.}$

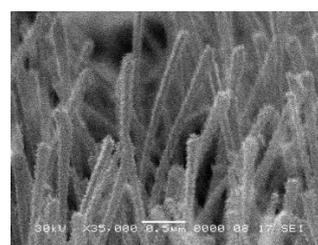


Рис. 4. РЭМ–микрофотографии роста ННК  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  в нанопорах  $\text{TiO}_2$  с участием частиц никеля. Режим анодирования:  $i_k = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\tau_{\text{эл.}} = 45 \text{ мин.}$

На рис. 4 показано, что рост ННК  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  в нанопорах  $\text{TiO}_2$  приобретает более упорядоченную структуру в сравнении с ростом ННК на неанодированной поверхности титана. На основании полученных экспериментальных результатов можно сказать, что рост ННК на анодированном титане происходит в нанопорах диоксида титана, т.е. “наследует” структуру подложки.

## Вывод

Таким образом, было установлено, что в качестве матрицы для выращивания упорядоченных систем ННК  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ , очевидно, можно использовать анодированный титан, диоксид которого имеет упорядоченную нанопористую поверхностную структуру, что может найти применение в технологиях управляемого выращивания ННК как перспективных материалов для реализации электронных схем нового поколения.

## Литература

1. Прикладная электрохимия / под ред. Н.Т. Кудрявцева. Изд. 2-е, пер. и доп. М.: Химия, 1975. 552 с.
2. Богорад Л.Я. Хромирование. Л.: Машиностроение, 1984. 96 с.
3. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х тт. / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. Т. 1. 240 с.

4. Фаличева А.И. Исследование процесса хромирования из электролитов, содержащих соединения хрома (III) и хрома (VI): дис. ... д-ра хим. наук. Свердловск, 1971.
5. Бурдыкина Р.И., Фаличева А.И. О механизме электровосстановления хроматных анионов // Электрохимия. 1987. Т. XXIII. Вып. 8. С. 1080-1086.
6. Фаличева А.И., Бурдыкина Р.И. О механизме катодных процессов при хромировании из хроматных электролитов // Защита металлов. 1995. Т. 31. № 2. С. 209-214.
7. Малинин В.Ф., Спиридонов Б.А., Сушкова В.П. Исследование катодных процессов при электровосстановлении хромовой кислоты в низкоконтрированных электролитах потенциодинамическими и гальваностатическими методами; ОНИИТЭХИМ. Черкассы. 11 с. Деп. в ВИНТИ 01.04.86, № 937.
8. Малинин В.Ф. Низкоконтрированные электролиты хромирования: исследование и внедрение в производство. Обзор // Защита металлов. 2000. Т. 36. № 4. С. 429-437.
9. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. М.: Химия, 1979. 352 с.
10. Фаличева А.И. Хромирование их электролитов, содержащих трехвалентные ионы хрома // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. 1964. Вып. 8. № 5. С.555-557.
11. Фаличева А.И. К вопросу о влиянии модификационного состава сульфата хрома на процесс электроосаждения хрома // Электрохимия. 1968. Т. IV. Вып. 7. С. 854-858.
12. Фаличева А.И. Кинетика парциальных катодных процессов в хромсульфатных электролитах // Известия вузов. Химия и хим. технология. 1976. Т. XIX. Вып. 11. С. 1734-1737.
13. Фаличева А.И., Шалимов Ю.Н., Ионова И.Г. Электротермографическое исследование прикатодного слоя при электроосаждении хрома из сернокислых электролитов // Защита металлов. 1972. Т. 8. № 4. С.499-505.
14. Шалимов Ю.Н., Фаличева А.И., Спиридонов Б.А. Исследование процесса электроосаждения хрома в нестационарных режимах // Защита металлов. 1977. Т. 13. №5. С. 623-625.
15. Шалимов Ю.Н. Влияние тепловых и электрических полей на электрохимические процессы при импульсном электролизе: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.03. Иваново, 2007. 36 с.
16. Гранкин Э.А., Фаличева А.И., Алтухов В.К. Влияние температурной зависимости внутреннего трения в электролитических осадках хрома // Электрохимия. 1970. Т. 6. № 8. С. 1131-1133.
17. Гуляев А.А. Исследование наводороживания осадков хрома, полученных из электролитов, содержащих соединения хрома (III): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.353. Воронеж, 1973. 25 с.
18. Исследование процесса совместного электроосаждения хрома и кобальта из сернокислого электролита/ А.И. Фаличева, Б.А. Спиридонов, Ю.Н. Шалимов, С.В. Жерноклеева // Защита металлов. 1975. Т. XI. Вып. 5. С. 622-623.
19. Спиридонов Б.А., Фаличева А.И., Шалимов Ю.Н. Электроосаждение сплава хром-кобальт в сернокислом электролите // Защита металлов. 1982. Т. 18. № 5. С. 782-784.
20. Электрохимическое поведение анода из сплава Pb-Sn-Co в сернокислом электролите для хромирования в присутствии ионов кобальта (III)/ А.И. Фаличева, Б.А. Спиридонов, В.И. Шаталова, Ю.Н. Шалимов // Защита металлов. 1975. Т. 11. № 4. С.507-509.
21. Полунина И.А., Фаличева А.И. Нихромовый растворимый анод при электроосаждении никель-хромовых сплавов // Защита металлов. 1988. Т. 24. № 2. С. 258-261.
22. Шалимов Ю.Н., Спиридонов Б.А., Полунина И.А. Получение коррозионноустойчивых хромоникелевых покрытий из сернокислых электролитов // Проблемы защиты металлов от коррозии: тез. докл. науч.-техн. конф. Липецк, 1985. С.92-93.
23. Исследование совместного электроосаждения хрома и никеля из сернокислого электролита / А.И. Фаличева, Л.Н. Шаршакова, Г.И. Митрофанов, Г.Г. Митрофанова // Защита металлов. 1978. Т.14. № 2. С.215-218.
24. Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Электроосаждение никель-хромовых покрытий из электролитов на основе сульфата хрома (III) // Журнал прикладной химии. 2001. Т.74. Вып.2. С.210-215.
25. А.с. 780524 СССР, МКИ<sup>3</sup> С 09 К 13/04 С 23 F 1/00. Состав для травления пиролитического хрома / Н.А. Соловьева, Б.Е. Раснецова, А.И. Фаличева, Б.А. Спиридонов. № 2781168/23-26; заявл. 16.04.79; опубл. 30.02.81, Бюлл. № 12. 2с.
26. Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Электроосаждение и коррозионные свойства оловоникелевых покрытий // Защита металлов. 1998. Т.34. № 4. С.442-444
27. Мирошник З.А., Фаличева А.И., Спиридонов Б.А. Новая композиция добавок в сульфатные электролиты цинкования // Композиционные материалы в машиностроении: тез. докл. науч.-практ. Семинара. Тернополь, 1989. С.125-126.
28. Исследование влияния температурного воздействия на свариваемость гальванического покрытия никель-бор с алюминиевой микропроволокой/ А.Г. Алексенко, А.И. Колычев, В.В. Зенин, В.В. Осенков // Электронная техника. Сер. Материалы. 1989. Вып. 7(244). С.3-6.
29. Исследование коррозионной устойчивости гальванически осажденных пленок сплава никель-бор/ А.И. Колычев, В.П. Снесаревский, Б.А. Спиридонов, А.И. Фаличева // Электронная техника. Сер. Материалы. 1989. Вып. 5(242). С.64-65.
30. Звягинцева А.В., Фаличева А.И. Физико-механические свойства никелевых покрытий, легированных бором // Гальванотехника и обработка поверхности. 1997. Т. 5. № 2. С. 24 - 29.
31. Звягинцева А.В. Взаимосвязь структуры и свойств гальванических никелевых покрытий, легированных бором, в изделиях электронной техники // Гальванотехника и обработка поверхности. 2007. Т. XV. № 1. С.16 - 22.
32. Исследование коррозионной стойкости контакта алюминий-золото в конденсате промышленной атмосферы/ В.В. Сакун, А.П. Сенцова, Б.А. Спиридонов, А.И. Фаличева // Электронная техника. Сер.7. Технология, организация производства и оборудование. 1982. Вып. 3. С. 27-28.
33. Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Электрохимические и фотохимические процессы, происходящие при электроосаждении алюминия из о-, м-, п-ксилольных растворов бромидов алюминия // Электрохимия. 1987. Т. 23. Вып. 5. С. 714-717.
34. Спиридонов Б.А. Влияние изомерной природы ксилола и продолжительности пропускания тока на химические превращения в электролитах алюминирования // Электрохимия. 1999. Т. 35. № 6. С. 719-723.

35. Бобряшов А.И., Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Коррозионная стойкость алюминиевых гальванопокрытий // Защита металлов. 1984. Т. 20. Вып. 2. С. 290–292.
36. Спиридонов Б.А., Бобряшов А.И., Фаличева А.И. Влияние органических добавок на электроосаждение алюминия из *m*-ксилольного электролита // Защита металлов. 1988. Т. 24. № 2. С. 316–320.
37. Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Фото- и электрохимические процессы в алкилбензолных электролитах алюминирования // Защита металлов. 1995. Т. 31. № 3. С. 295–299.
38. Гранкин Э.А., Спиридонов Б.А., Фаличева А.И. Влияние температуры отжига на анодное растворение электролитического алюминия // Защита металлов. 1990. Т. 26. №3. С.421–425.
39. Спиридонов Б.А. Электролитические алюминиевые покрытия, получение и свойства: монография. Воронеж: ВГТУ, 2005. 124 с.
40. Пат. № 2122594 Российская Федерация. 27.11.98. Способ рафинирования золота/Воронин Ю.А., Кондауров В.П., Погодин П.П., Спиридонов Б.А., Шалимов Ю.Н.; заяв. 97119447 от 26.11.97.
41. Совершенствование технологии электрографирования золота/ Ю.А. Воронин, В.П. Кондауров, Б.А. Спиридонов, Б.А. Литвинов // Металлург. 2003. №4. С. 49–50.
42. Пул Р., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
43. Напольский К.В., Солисеев А.А., Лукашин А.В. Анодное окисление алюминия // Микроструктуры новых функциональных материалов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. Вып 1. С. 7 – 8.
44. Белов А.Н., Гаврилов С.А., Шевяков В.И. Особенности получения наноструктурированного анодного оксида алюминия // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1–2. С. 223 – 227.
45. Спиридонов Б.А., Юрьев В.А., Косилов А.Т. Исследование процесса анодирования при формировании наноструктуры оксида алюминия // Прикладная синергетика в нанотехнологиях: сб. тр. V Междунар. симпозиума. М., 2008. С. 298 – 300.
46. Синтез углеродных нанотрубок на подложках из нанопористого анодированного оксида алюминия / А.Ю. Воробьев, В.П. Горшунова, А.Т. Косилов, Б.А. Спиридонов, В.А. Небольсин, В.А. Юрьев, Г.А. Сладких // Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии: тез. докл. II Междунар. техн. конф. Плес, 2010. С. 116.
47. Гиваргизов Е.Н. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара. М.: Наука, 1977. 304 с.
48. Небольсин В.А., Щетинин А.А. Механизм квазиодномерного роста нитевидных кристаллов Si и GaP из газовой фазы // Неорганические материалы. 2008. Т.44. № 10. С. 1159–1167.
49. Об общих закономерностях роста микро- и наноразмерных нитевидных кристаллов кремния / В.А. Небольсин, А.А. Долгачев, А.И. Дунаев, М.А. Завалишин // Известия РАН. Сер. физич. 2008. Т.72. № 9. С. 1285–1288.
50. Небольсин В.А., Воробьев А.Ю. Роль поверхностной энергии при росте углеродных нанотрубок в процессе каталитического пиролиза углеводородов // Неорганические материалы. 2011. Т.47. №2. С.168–172.
51. Исследование влияния режимов анодирования пленок оксида титана в растворах глицерина и этиленгликоля на их пористость / Б.А. Спиридонов, В.А. Небольсин, А.И. Дунаев, С.С. Шмакова, С.А. Лейба // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.2. С. 65–69.

Поступила 22.05.2018; принята к публикации 24.07.2018

#### Информация об авторах

**Спиридонов Борис Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: b.a.spiridonov@yandex.ru, тел. 8-960-110-69-79

### STAGES OF DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC RESEARCH WORK AT THE DEPARTMENT OF GENERAL CHEMISTRY OF THE VSTU. OVERVIEW

**B.A. Spiridonov**

**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the information on the formation of the Department of Chemistry in the VSTU and the development of research work for the period from 1968 to 2017 are given. The most notable contribution to the establishment of the Department of Chemistry was made by Professor A.I. Falicheva. Fourteen candidate dissertations were successfully defended under her leadership. The main scientific areas were electrochemistry, electroplating, corrosion and metal protection. The establishment of interrelation between the electrochemical parameters of the reduction of chromium (III), chromium (VI), and aluminum (III) ions with the spectral characteristics of solutions became a modern trend in science, which allowed us to formulate the theoretical foundations for the development of new electrolytes. Other topical problems related to the development of electrolytes and technologies in the production of galvanic coatings - zinc, aluminum, chromium-cobalt, chromium-nickel, nickel-boron, nickel-indium, tin-nickel, etc. also were successfully solved. Based on the studies, the article presents data on the solution of various practically important problems, for example, refining gold by electrolysis using reverse pulsed current, anodizing aluminum to produce nanoporous alumina. In 2010, the Department of Chemistry was headed by Dr. Tech. Sci., Professor V.A. Nebol'sin. Under his leadership, research was continued on the anodizing of aluminum and titanium to produce nanoporous oxide films, which were used as matrices in the pores of which carbon nanotubes (CNTs) and filamentary nanocrystals (FNCs) of silicon and Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> were grown. It was found that CNTs on a matrix of porous alumina can be used as sorbents of

various gases (hydrogen, ammonia, etc.). The principal possibility was found of growing the ordered FNC systems of silicon and  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  using a masking matrix of nanoporous titanium dioxide and nickel particles as a catalyst for the growth process

**Key words:** electrolyte, electrolysis, electroplating, anodizing, aluminum, titanium

### References

1. Kudryavtsev N.T. ed. "Applied electrochemistry" ("Prikladnaya elektrokimiya"), Moscow, Khimiya, 1975, 552 p.
2. Bogorad L.Ya. "Chrome plating" ("Khromirovanie"), Leningrad, Mashinostroenie, 1984, 96 p.
3. Schluger M.A. ed. "Galvanic coatings in mechanical engineering. Reference book" ("Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroyenii. Spravochnik"), Moscow, Mashinostroenie, 1985, 240 p.
4. Falicheva A.I. "Investigation of the process of chromium plating from electrolytes containing compounds of chromium (III) and chromium (VI): Dr. Chem. sci. diss." ("Issledovanie protsessa khromirovaniya iz elektrolitov, sodержashchikh soyedineniya khroma (III) i khroma (VI): dis. d-ra khim. nauk"), Sverdlovsk, 1971.
5. Burdykina R.I., Falicheva A.I. "On the mechanism of electroreduction of chromate anions", *Electrochemistry (Elektrokimiya)*, 1987, vol. XXIII, issue 8, pp. 1080-1086.
6. Falicheva A.I., Burdykina R.I. "On the mechanism of cathode processes during chromium plating from chromate electrolytes", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1995, vol.31, no. 2, pp. 209-214.
7. Malinin V.F., Spiridonov B.A., Sushkova V.P. "Investigation of cathodic processes during electroreduction of chromic acid in low-concentration electrolytes by potentiodynamic and galvanostatic methods" ("Issledovanie katodnykh protsessov pri elektrovostanovlenii khromovoy kisloty v nizkokontsentrirovannykh elektrolitakh potentsiodinamicheskimi i gal'vanostaticeskimi metodami"), ONITEKHIM, Cherkassy, Dep. VINITI 01.04.86, no. 937, 11 p.
8. Malinin V.F. "Low-concentrated chromium electrolytes: research and implementation in production. Overview", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 429-437.
9. Kudryavtsev N.T. "Electrolytic coatings with metals" ("Elektroliticheskie pokrytiya metallami"), Moscow, Khimiya, 1979, 352 p.
10. Falicheva A.I. "Chromium plating of their electrolytes containing trivalent chromium ions", *Journal of the All-Union Chemical Society after D.I. Mendeleev (Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*, 1964, issue 8, no. 5, pp. 555-557.
11. Falicheva A.I. "On the influence of the modification composition of chromium sulphate on the process of electrodeposition of chromium", *Electrochemistry (Elektrokimiya)*, 1968, vol. 4, issue 7, pp. 854-858.
12. Falicheva A.I. "Kinetics of partial cathodic processes in chrome sulfate electrolytes", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Chemistry and Chemical technology (Izvestiya vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya)*, 1976, vol. XIX, issue 11, pp. 1734-1737.
13. Falicheva A.I., Shalimov Yu.N., Ionova I.G. "Electrothermographic study of the cathode layer in the electrodeposition of chromium from sulfuric acid electrolytes", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1972, vol. 8, no. 4, pp. 499-505.
14. Shalimov Yu.N., Falicheva A.I., Spiridonov B.A. "Investigation of the process of chromium electrodeposition in nonstationary regimes", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1977, vol.13, no. 5, pp. 623-625.
15. Shalimov Yu.N. "Influence of thermal and electric fields on electrochemical processes during pulsed electrolysis: the author's abstract. Dr. Techn. Sci. diss." ("Vliyanie teplovykh i elektricheskikh poley na elektrokhimicheskie protsessy pri impul'snom elektrolize: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk"), Ivanovo, 2007, 36 p.
16. Grankin E.A., Falicheva A.I., Altukhov V.K. "Influence of the temperature dependence of internal friction in electrolytic precipitation of chromium", *Electrochemistry (Elektrokimiya)*, 1970, vol. 6, no. 8, pp. 1131-1133.
17. Gulyaev A.A. "Investigation of hydrogenation of chromium precipitates obtained from electrolytes containing chromium compounds (III): author's abstract. Cand. Tech. Sci. diss." ("Issledovanie navodorozhivaniya osadkov khroma, poluchennykh iz elektrolitov, sodержashchikh soyedineniya khroma (III): avtoref. dis. kand. tekhn. nauk"), Voronezh, 1973, 25 p.
18. Falicheva A.I., Spiridonov B.A., Shalimov Yu.N., Zhernokleeva S.V. "Investigation of the process of joint electrodeposition of chromium and cobalt from electrolyte sulfate", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1975, vol. XI, issue 5, pp. 622-623.
19. Spiridonov B.A., Falicheva A.I., Shalimov Yu.N. "Electrodeposition of a chromium-cobalt alloy in a sulphate electrolyte", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1982, vol. 18, no. 5, pp. 782-784.
20. Falicheva A.I., Spiridonov B.A., Shatalova V.I., Shalimov Yu.N. "Electrochemical behavior of the anode from the Pb-Sn-Co alloy in the sulfuric acid electrolyte for chromium in the presence of cobalt (III) ions", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1975, vol. 11, no. 4, pp. 507-509.
21. Polunina I.A., Falicheva A.I. "Nichrome soluble anode during electrodeposition of nickel-chromium alloys", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1988, vol. 24, no. 2, pp. 258-261.
22. Shalimov Yu.N., Spiridonov B.A., Polunina I.A. "Production of corrosion-resistant chromium-nickel coatings from sulfate electrolytes", *Problems of corrosion prevention of metals: Proc. of Scientific-Techn. Conf. (Problemy zashchity metallov ot korrozii: tez. dokl. nauch.-tekhn. konf.)*, Lipetsk, 1985, pp. 92-93.
23. Falicheva A.I., Sharshakova L.N., Mitrofanov G.I., Mitrofanova G.G. "Investigation of the joint electrodeposition of chromium and nickel from electrolyte sulfate", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1978, vol. 14, no. 2, pp. 215-218.
24. Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Electrodeposition of nickel-chromium coatings from electrolytes based on chromium sulphate (III)", *Journal of Applied Chemistry (Zhurnal prikladnoy khimii)*, 2001, vol. 74, issue 2, pp. 210-215.
25. Solov'yeva N.A., Rasnetsova B.E., Falicheva A.I., Spiridonov B.A. "Composition for the etching of pyrolytic chromium" ("Sostav dlya travleniya piroliticheskogo khroma"), certificate of authorship 780524 USSR, MKI<sup>3</sup> C 09 K 13/04 C 23 F 1/00, no. 2781168 / 23-26, 1979, 2 p.
26. Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Electrodeposition and corrosion properties of tin-nickel coatings", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1998, vol. 34, no. 4, pp. 442-444

27. Miroshnik Z.A., Falicheva A.I., Spiridonov B.A. "New composition of additives in zinc-sulphate electrolytes", *Composite Materials in Mechanical Engineering: Proc. of sci-practical seminar (Kompozitsionnye materialy v mashino-stroyenii: tez. dokl. nauch.-prakt. seminar)*, Ternopol, 1989, pp.125-126.
28. Aleksenko A.G., Kolychev A.I., Zenin V.V., Osenkov V.V. "Investigation of the influence of the temperature influence on the weldability of a nickel-boron plating coating with aluminum micro-wire", *Electronic Engineering. Ser. Materials (Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy)*, 1989, issue 7(244), pp. 3-6.
29. Kolychev A.I., Snesarevskiy V.P., Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Investigation of the corrosion resistance of galvanically deposited nickel-boron alloy films", *Electronic Engineering. Ser. Materials (Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy)*, 1989, issue 5(242), pp. 64-65.
30. Zvyagintseva A.V., Falicheva A.I. "Physico-mechanical properties of nickel coatings doped with boron", *Galvanics and surface treatment (Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti)*, 1997, vol. 5, no. 2, pp. 24-29.
31. Zvyagintseva A.V. "Interrelation of the structure and properties of galvanic nickel coatings doped with boron in electronic products", *Galvanics and surface treatment (Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti)*, 2007, vol. V, no. 1, pp. 16-22.
32. Sakun V.V., Sentsova A.P., Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Investigation of the corrosion resistance of aluminum-gold contact in industrial atmosphere condensate", *Electronic engineering. Ser.7. Technology, production organization and equipment (Elektronnaya tekhnika. Ser.7. Tekhnologiya, organizatsiya proizvodstva i oborudovanie)*, 1982, issue 3, pp. 27-28.
33. Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Electrochemical and photochemical processes occurring during electrodeposition of aluminum from o-, m-, p-xylene solutions of aluminum bromide", *Electrochemistry (Elektrokhimiya)*, 1987, vol. 23, issue 5, pp. 714-717.
34. Spiridonov B.A. "Influence of the isomeric nature of xylene and duration of current transmission on chemical transformations in aluminum electrolytes", *Electrochemistry (Elektrokhimiya)*, 1999, vol. 35, no. 6, pp. 719-723.
35. Bobryashov A.I., Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Corrosion resistance of aluminum electroplating", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1984, vol. 20, issue 2, pp. 290-292.
36. Spiridonov B.A., Bobryashov A.I., Falicheva A.I. "Effect of organic additives on the electrodeposition of aluminum from the m-xylene electrolyte", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1988, vol. 24, no. 2, pp. 316-320.
37. Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Photo- and electrochemical processes in alkylbenzene electrolytes of aluminization", *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 295-299.
38. Grankin E.A., Spiridonov B.A., Falicheva A.I. "Influence of annealing temperature on anodic dissolution of electrolytic aluminum *Metal Prevention (Zashchita metallov)*, 1990, vol. 26, no. 3, pp. 421-425.
39. Spiridonov B.A. "Electrolytic aluminum coatings, production and properties: monograph" ("Elektroliticheskie alyumini-evye pokrytiya, poluchenie i svoystva: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2005, 124 p.
40. Voronin Yu.A., Kondaurov V.P., Pogodin P.P., Spiridonov B.A., Shalimov Yu.N. "Method of refining gold" ("Sposob rafinirovaniya zolota"), Patent of The Russian Federation no. 2122594, 1998.
41. Voronin Yu.A., Kondaurov V.P., Spiridonov B.A., Litvinov B.A. "Perfection of the technology of gold electrorefining", *Metallurgist (Metallurg)*, 2003, no. 4, pp. 49-50.
42. Poole R., Owens F. "Nanotechnologies", Moscow, Tekhnosfera, 2006, 336 p.
43. Napolskiy K.V., Soliseev AA, Lukashin A.V. "Anodic oxidation of aluminum", *Microstructures of new functional materials (Mikrostruktury novykh funktsional'nykh materialov)*, Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2006, issue 1, pp. 7-8.
44. Belov A.N., Gavrilov S.A., Shevyakov V.I. "Peculiarities of obtaining nanostructured anodic alumina oxide", *Russian nanotechnologies (Rosstyskie nanotekhnologii)*, 2006, vol. 1, no. 1-2, pp. 223-227.
45. Spiridonov B.A., Yur'ev V.A., Kosilov A.T. "Investigation of the anodizing process in the formation of nanostructures of aluminum oxide", *Applied synergetics in nanotechnologies: Proc. of V Intern. Symposium (Prikladnaya sinergetika v nanotekhnologiyakh: sb. tr. V Mezhdunar. simpoziuma)*, Moscow, 2008, pp. 298-300.
46. Vorob'yev A.Yu., Gorshunova V.P., Kosilov A.T., Spiridonov B.A., Nebol'sin V.A., Yur'ev V.A., Sladkikh G.A. "Synthesis of carbon nanotubes on substrates made of nanoporous anodized aluminum oxide", *Modern methods in theoretical and experimental electrochemistry: Proc. of II Intern. tech. Conf. (Sovremennye metody v teoreticheskoy i eksperimental'noy elektrokhemii: tez. dokl. II Mezhdunar. tekhn. konf.)*, Ples, 2010, pp. 116.
47. Givargizov E.N. "Growth of filamentous and lamellar crystals from the vapor" ("Rost nitevidnykh i plastinchatykh kristallov iz para"), Moscow, Nauka, 1977, 304 p.
48. Nebol'sin V.A., Shchetinin A.A. "Mechanism of quasi-one-dimensional growth of filamentary Si and GaP crystals from the gas phase", *Inorganic Materials (Neorganicheskie materialy)*, 2008, vol. 44, no. 10, pp. 1159-1167
49. Nebolsin V.A., Dolgachev A.A., Dunaev A.I., Zavalishin M.A. "On the general patterns of growth of micro- and nanoscale filamentary silicon crystals", *Proc. of the Russian Academy of Sciences. Ser. phys. (Izvestiya RAN. Ser. fizich)*, 2008, vol. 72, no. 9, pp. 1285-1288.
50. Nebol'sin V.A., Vorob'yev A.Yu. "The role of surface energy in the growth of carbon nanotubes in the process of catalytic pyrolysis of hydrocarbons", *Inorganic Materials (Neorganicheskie materialy)*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 168-172.
51. Spiridonov B.A., Nebol'sin V.A., Dunaev A.I., Shmakova S.S., Leyba S.A. "Investigation of the effect of anodizing regimes of titanium oxide films in solutions of glycerol and ethylene glycol on their porosity", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6.2., pp. 65-69.

Submitted 22.05.2018; revised 24.07.2018

#### Information about the author

**Boris A. Spiridonov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: b.a.spiridonov@yandex.ru, tel. 8-960-110-69-79

**ЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ КЛЕЕВОГО ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО Т-107**А.М. Кудрин<sup>1</sup>, К.С. Габриельс<sup>2</sup><sup>1</sup>ЗАО «Русавиаинтер», г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** в рамках комплексных исследовательских испытаний технологического материала, адаптированного для процессов автоматизированной выкладки, на основе углеродного волокна Formosa 12K и клевого эпоксидного связующего Т-107, было проведено моделирование долговременной механической нагрузки на материал – испытания на усталость. Исследования показали, что качественное прогнозирование остаточных свойств ПКМ определяется испытаниями на прочность после ударного воздействия и циклическими схемами нагружения. Проведенные циклические физико-механические испытания в соответствии со стандартами ASTM D 5766 и D 7615 позволили определить величину максимальной нагрузки (механического сопротивления материала с концентратором напряжений) на уровне 50,62 кН, а также смитировать реальные условия эксплуатации. Определен характер разрушения материала - LGM (lateral-gage-middle) – разрушение ПКМ по всей толщине образца непосредственно в области сквозного отверстия с присутствием незначительных расслоений в рабочей зоне в направлениях  $\pm 45^\circ$  от центра отверстия. Схожий характер разрушения, но с гораздо более серьезными последствиями наблюдался при циклическом нагружении образцов ПКМ с амплитудным диапазоном от 10 % до 70 % от нагрузки разрушения. Образцы с диапазонами нагружения 20-60 % и 15-65 % выдержали  $10^6$  циклов усталостных испытаний без видимой деформации, показав остаточную прочность на уровне 90 % от первоначального значения

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, углепластик, ПКМ, испытания на усталость, растяжение с отверстием, циклические испытания

**Введение**

На сегодняшний день полимерные композиционные материалы (ПКМ) сохраняют статус наиболее привлекательных инновационных материалов современности и, как следствие, продолжают создавать устойчивую потребность в разработке новых наукоемких технологических решений, обеспечивающих их применимость не только для аэрокосмической отрасли, но и в гражданских, бытовых сферах. Существенное расширение применимости ПКМ в качестве конструкционных материалов предъявляет повышенные требования к методам контроля основных эксплуатационных характеристик. Базовый набор физико-механических испытаний существенно расширяется в сторону сложных комплексных прочностных испытаний, имитирующих длительную эксплуатацию в агрессивных рабочих средах. Одними из таких видов испытаний являются усталостные испытания. Циклическая нагрузка имитирует разрушение ПКМ вследствие наложения дискретных микродеформаций материала (разрушение волокна, отслаивание волокна от матрицы, микротрещины матрицы

связующего), приводящих к макродеформации – образованию трещины, позволяющей в реальности агрессивной среде, в первую очередь влаге, разрушить материал [1].

Любой материал, подверженный циклической нагрузке, разрушится, если приложенная нагрузка превысит его сопротивление. Усталостные испытания проводятся при нагрузках меньших прогнозируемого сопротивления ПКМ. При проведении испытаний искусственно создаются дефекты, влияющие на силу сопротивления материала («предел выносливости»): агрессивная среда, температурные перепады, повреждения на поверхности и/или наличие сквозного отверстия.

Авиационные материалы постоянно подвержены ударам и долговременным механическим нагрузкам (усталости). Вызванные ими повреждения визуально практически не идентифицируются до момента полного разрушения. Единственным методом контроля и определения жизненного цикла используемого материала являются прочностные испытания, моделирующие реальные эксплуатационные условия. Имитация ударного воздействия на ПКМ описана в работе [2]. Однако исследования показывают, что данных об ударном

воздействии часто недостаточно для достоверного прогноза остаточных свойств ПКМ [3], необходимо проведение дополнительных испытаний на усталость.

Циклические испытания проводят в первую очередь для определения времени, характера и механизма разрушения при действии нагрузки с целью определения максимально возможного срока эксплуатации конструкции из ПКМ, в особенности в сравнении с аналогичными испытаниями для металлических сплавов. Также важны статистические данные для сравнения поведения различных материалов в стандартных условиях – с целью выбора уже существующих и разработки новых композитов.

Стандартный комплексный метод циклических испытаний ПКМ представляет собой испытание на усталость при одноосном растяжении-сжатии с применением специализированного оборудования, позволяющего оказать на материал циклическое воздействие (до 1 млн. циклов) низкой частоты, имитирующее жизненный цикл изделия. В результате строится SN-диаграмма (остаточная прочность-количество циклов) или кривая Войлера, которая помогает количественно оценить предельную нагрузку, способную выдержать испытуемый материал [4-5].

В ПКМ основная роль в подобных испытаниях отводится полимерному связующему, качество которого практически полностью отвечает за остаточную жесткость материала. В данной работе рассмотрено поведение эпоксидного связующего нового поколения полимерных материалов.

### Методика эксперимента

Моделирование долговременной нагрузки на ПКМ с использованием циклических схем нагружения с определением предела сопротивления материала проводилось на элементарных образцах углепластика, полученного на основе однонаправленного безуткового препрега с армирующим наполнителем Formosa 12K в терморепактивной эпоксидной матрице T-107, разработанной ЗАО «ИНУМиТ» [6]. Изготовление препрега производилось в рамках адаптации технологического материала для систем автоматизированной выкладки, которое

предусматривало комплексные исследовательские испытания прочностных и эксплуатационных характеристик материала с построением математической модели, позволяющей прогнозировать эксплуатационные свойства ПКМ на стадии изготовления [7, 8].

Испытания проводились при комнатной температуре ( $23 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ ) в соответствии со стандартами ASTM D 5766 [9] и D 7615 [10].

Подготовка элементарных образцов ПКМ для испытаний на растяжение с отверстием и циклические испытания осуществлялись по схеме выкладки  $[+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]_{2s}$  в 16 слоев каждый. Испытания на растяжение проводились с помощью двухколонной рамы Instron 5985; образцы с концентратором напряжений (рис. 1) – со сквозным отверстием (диаметр из соотношения 1:6 к ширине образца) устанавливали соосно с захватами машины. По итогам испытаний определяли остаточные предел прочности и модуль упругости.

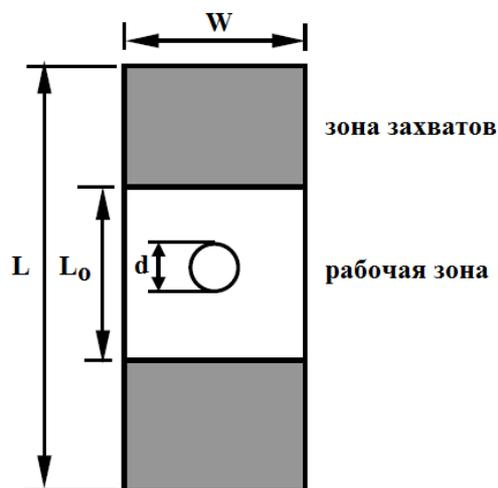


Рис. 1. Схематическое изображение элементарного образца для испытаний на растяжение с отверстием: L – длина образца,  $L_0$  – рабочее расстояние, W – ширина, d – диаметр сквозного отверстия

Циклические испытания проводили в сервогидравлической испытательной системе для динамических и статических испытаний Instron 8802 на образцах аналогичной геометрии. Частота колебаний одноосного растяжения-сжатия была задана низкой – 5 Гц, чтобы не допустить аутогенный перегрев образца во время испытаний. Количество циклов испытаний –  $10^6$ . Предварительная постоянная нагрузка была выбрана на уровне

40 % от величины максимальной нагрузки разрушения. Амплитуды циклов растяжения-сжатия задавались от  $\pm 20\%$  до больших значений, приведших к досрочному разрушению образца ПКМ. По результатам испытаний определялась величина предельной амплитудной нагрузки на полимерный композиционный материал, остаточный предел прочности образцов, выдержавших циклические испытания.

### Результаты и обсуждения

Для определения максимальной нагрузки разрушения (предела сопротивления материала) в соответствии со стандартом ASTM D 5766 [9] были изготовлены элементарные образцы в количестве 5 штук со сквозным серединным отверстием, диаметром согласно пропорции к ширине 1:6 (рис. 2). Основные геометрические размеры элементарных образцов приведены в табл. 1.

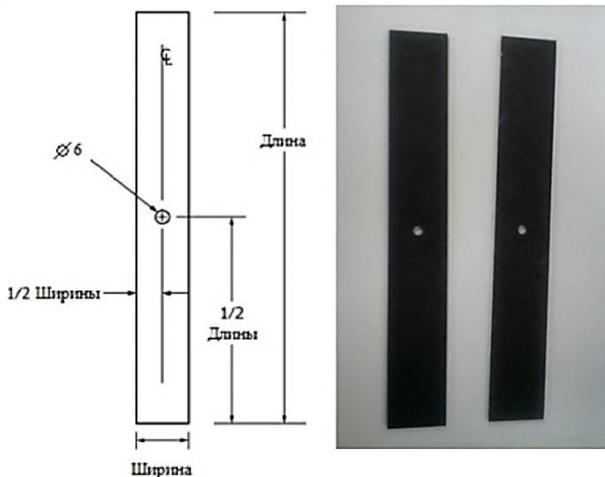


Рис. 2. Вид образца с отверстием в виде полосы прямоугольного сечения

Таблица 1  
Геометрические размеры образцов

Наименование		Значение, мм
Длина образца	L	$250 \pm 0,5$
Рабочее расстояние	$L_0$	$\geq 50$
Ширина образца	W	$36,0 \pm 0,5$
Толщина образца	h	1,0
Диаметр отверстия	d	6

Испытания на растяжение проводились согласно общепринятой методике испытаний на растяжение [11] до полного разрушения с фиксацией максимальной нагрузки

разрушения. Для всех образцов определен характер разрушения, согласно методикам, описанным в работах [9, 12-13] – LGM (lateral-gage-middle) – разрушение ПКМ по всей толщине образца непосредственно в области сквозного отверстия с присутствием незначительных расслоений в рабочей зоне в направлениях  $\pm 45^\circ$  от центра отверстия (рис. 3). Результаты испытаний приведены в табл. 2. Средние значения остаточного предела прочности в 5 раз ниже истинных значений аналогичных образцов ПКМ (2097,58 МПа для образцов ПКМ, выложенных в автоматизированном режиме [8]); значения остаточного модуля упругости – ниже в 3 раза (146,92 ГПа). Относительное удлинение составило 0,93 %. Значения остаточного предела прочности для образцов углепластика с концентратором напряжений соответствуют уровню в 400-500 МПа аналогичных материалов на основе эпоксидных смол [13]. Рассчитанное среднее значение максимальной нагрузки является входным параметром «максимальная нагрузка разрушения» для циклических испытаний.



Рис. 3. Внешний вид образца ПКМ после испытаний на растяжение с отверстием

Таблица 2  
Результаты испытаний на растяжение ПКМ с отверстием

№	$F_{max}$ , кН	$\sigma_{раст.}$ , МПа	$E_{раст.}$ , ГПа
1	51,35	436,14	52,4
2	50,76	422,26	50,21
3	48,69	409,74	49,26
4	48,12	404,76	49,25
5	52,38	440,65	51,98
Ср.	50,26	422,71	50,62

По результатам статических испытаний были определены входные данные для циклических испытаний по методу прямого нагружения, при постоянно действующей

предварительной нагрузке с заданной амплитудой дополнительного воздействия [10]:

- максимальная нагрузка – 50,62 кН;
- предварительная нагрузка (40 % от максимальной нагрузки) – 20,12 кН;
- частота колебаний одноосного растяжения-сжатия – 5 Гц;
- количество циклов испытаний –  $10^6$  шт.;
- амплитуда циклов нагрузки относительно значения предварительной нагрузки (амплитуда дополнительного воздействия) –  $\pm 20\%$ ,  $\pm 25\%$ ,  $\pm 30\%$ .

Нагружение образцов ПКМ осуществлялось программным путем по синусоиде от минимального до максимального значения на каждый цикл, за ноль принято значение предварительной нагрузки (40 % от максимальной). Образцы с диапазонами нагружения 20-60 % и 15-65 % выдержали испытания, образец с амплитудой нагружения 10-70 % полностью разрушился в области концентратора напряжения на 519 376 цикле (рис. 4). Контроль за температурой образца в рабочей зоне исключает термическую составляющую разрушения, вызванную аутогенным нагреванием образца в ходе циклического нагружения.



Рис. 4. Внешний вид образца ПКМ с диапазоном нагружения 10-70 %

Наличие бóльшей амплитуды испытаний при одинаковой частоте существенно увеличило одноосное сжатие высокой интенсивности в области концентратора

напряжений (отверстия). Наблюдаемый визуально характер разрушения показал продольное расслоение ПКМ незадолго до полного разрушения.

Образцы с меньшими диапазонами нагружений, выдержавшие циклические испытания, показали снижение прочности на 10 % ( $380 \pm 10$  МПа) от остаточного предела прочности тех же образцов до испытаний. В отличие от металлических сплавов авиационного назначения, остаточная прочность которых существенно снижается при циклических испытаниях, достигая предельно низких значений задолго до  $10^6$  циклов (потери составляют до 50-70 %) [14], полимерные композиты, армированные углеродными волокнами, демонстрируют одинаково высокие значения вплоть до момента разрушения.

Свойство ПКМ – не проявлять видимых деформаций до момента полного разрушения, отрицательно сказывается на методах визуального контроля и диагностики повреждений изделий. Частичное приведение SN-диаграммы к «металлическому» виду (расширение диапазона циклов нагружений, предшествующих полному разрушению) возможно с применением гибридных ПКМ. Аналогично с демпфирующей способностью противостоять распространению трещины при ударных воздействиях на гибридные армированные структуры (стеклоуглепластики [15]), включение в разнонаправленную ( $+45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ$ ) структуру углепластика слоев стеклопластика позволит существенно повысить трещиностойкость ПКМ. Вариация соотношений стекло- и углепластика должна выбираться эмпирически, ее результаты могут послужить продолжением работ по исследованию усталостных испытаний полимерных композитов.

### Заключение

Проведенные циклические испытания полимерных композиционных материалов на основе терморезистивного эпоксидного связующего нового поколения Т-107 показали хорошие результаты остаточных механических свойств образцов ПКМ. Полимерная матрица показала высокий уровень сопротивления циклическим и ударным нагрузкам [2]. Наличие концентратора напряжения (отверстия) существенно снижает остаточную прочность материала (в 5 раз от истинных

значений прочности), тем не менее позволяет выдерживать долговременное циклическое низкочастотное воздействие ( $10^6$  циклов) в широком диапазоне нагрузений. Остаточная прочность ПКМ, выдержавших циклические испытания, составила 90 % от первоначальных значений.

#### Литература

1. Sims G. Fatigue test methods, problems and standards // *Fatigue in Composites: Science and Technology of the Fatigue Response of Fiber-Reinforced Plastics*. 2003. P. 36-62.
2. Определение предела прочности полимерного композиционного материала на сжатие после удара в соответствии со стандартом ASTM D 7137/ А.М. Кудрин, О.А. Караева, К.С. Габриельс, А.В. Солопченко // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018. Т. 14. № 2. С. 164-169.
3. Cairns D.S., Lagace P.A. Residual Tensile Strength of Graphite/Epoxy and Kevlar/Epoxy Laminates with Impact Damage // *Composite Materials: Testing and Design*. 1990. Vol. 9. P. 48-63.
4. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading/ P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, J.D.B. Costa, M.O.W. Richardson // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69. P. 154-160.
5. Derewonko A., Gieleta R. Carbon-epoxy composite fatigue strength – experiment and FEM numerical estimation // *Journal of KONES powertrain and transport*. 2012. Vol. 19. № 3. P. 103-110.
6. T-107 – <http://inunit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/>
7. Prediction of polymer composite material products using neural networks/ A.V. Gaganov, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, A.A. Gurtovoy // *International Conference on Innovative Material Science and Technology*. 2016. P. 398-405.
8. Оптимизация технологии изготовления материала для процесса автоматизированной выкладки/ М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин, А.А. Лялин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2017. Т. 13. № 3. С. 128-133.
9. ASTM D 5766/D 5766M «Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates»
10. ASTM D 7615/D 7615M «Standard Practice for Open-Hole Fatigue Response of Polymer Matrix Composite Laminates»
11. ASTM D 3039/D 3039M «Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials»
12. Unified Model for Predicting the Open Hole Tensile and Compressive Strengths of Composite Laminates for Aerospace Applications/ P. Davidson, E.J. Pineda, Ch. Heinrich, A.A. Waas // *54th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2013. P. 1-26.
13. Fan X.L., Qin W.J., Suo T. Experimental Investigation on the Tensile Strength of Composite Laminates Containing Open and Filled Holes // *Проблемы прочности*. 2014. № 2. С. 141-146.
14. Esp B. *Practical Analysis of Aircraft Composites* // Grand Oak Publishing. USA. 2017. 737 p.
15. The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107/ O.V. Ovdak, Yu.E. Kalinin, A.M. Kudrin, O.A. Karaeva, D.Ya. Degtyarev // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9. Issue 1. P. 108-113.

Поступила 14.05.2018; принята к публикации 24.07.2018

#### Информация об авторах

**Кудрин Алексей Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, директор по науке, ЗАО «Русавиаинтер» (394004, Россия, г. Воронеж, ул. Ленинградская, 31-В), e-mail: kudrin@rusaviainter.com

**Габриельс Константин Сергеевич** – канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gabriels\_k@mail.ru

### CYCLIC TESTS OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS BASED ON HOT-MELT EPOXY BINDER T-107

**A.M. Kudrin<sup>1</sup>, K.S. Gabriels<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>“**Rusaviainter**”, **Voronezh, Russia**

<sup>2</sup>**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** within the framework of complex research tests of technological material adapted for automated layout – based on carbon fiber Formosa 12K and hot-melt epoxy binder T-107, modeling of long-term mechanical stress (fatigue tests) was carried out. The studies showed that qualitative prediction of residual properties of CFRP was determined by strength tests after impact and cyclic loading schemes. Performed cyclic physical and mechanical tests in accordance with ASTM D 5766 and D 7615 allowed to determine the value of the maximum load (mechanical resistance of the material with the stress concentrator) at the level of 50.62 kN, and also to simulate the real operating conditions. The article shows the nature of the material destruction – LGM (lateral-gage-middle) – the destruction of the CFRP along the entire thickness of the sample directly in the region of the notch with the presence of insignificant delamination in the working zone in the directions  $\pm 45^\circ$

from the center of the notch. A similar type of failure, but with much more destruction, was observed with cyclic loading of CFRP samples with an amplitude range from 10 % to 70 % of the fracture load. Samples with loading ranges of 20-60 % and 15-65 % withstood  $10^6$  cycles of fatigue tests without visible deformation, showing a residual strength of 90 % from the original value

**Key words:** polymeric composite material, CFRP, carbon fiber reinforced plastics, fatigue test, notch tension strength, cyclic tests

#### References

1. Sims G. "Fatigue test methods, problems and standards", *Fatigue in Composites: Science and Technology of the Fatigue Response of Fiber-Reinforced Plastics*, 2003, pp. 36-62.
2. Kudrin A.M., Karaeva O.A., Gabriels K.S., Solopchenko A.V. "Determination of the ultimate strength of polymer composite material for compression after impact, in accordance with standard ASTM D 7137", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2018, vol. 14, no 2, pp. 164-169.
3. Cairns, D.S., Lagace P.A. "Residual tensile strength of graphite/epoxy and kevlar/epoxy laminates with impact damage", *Composite Materials: Testing and Design*, 1990, vol. 9, pp. 48-63.
4. Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Costa J.D.B., Richardson M.O.W. "Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading", *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, pp. 154-160.
5. Derewonko A., Gieleta R. "Carbon-epoxy composite fatigue strength – experiment and FEM numerical estimation", *Journal of KONES powertrain and transport*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 103-110.
6. "T-107", available at: <http://inumit.ru/rus/produkcija-i-uslugi/ugleplastiki/Resins/>
7. Gaganov A.V., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Gurtovoy A.A. "Prediction of polymer composite material products using neural networks", *International Conference on Innovative Material Science and Technology*, 2016, pp. 398-405.
8. Voskoboybik M.Yu., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Polukhin D.V., Lyalin A.A. "Optimization of the material manufacturing technology for the automated computation process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 128-133.
9. ASTM D 5766/D 5766M "Test method for open-hole tensile strength of polymer matrix composite laminates"
10. ASTM D 7615/D 7615M "Standard practice for open-hole fatigue response of polymer matrix composite laminates"
11. ASTM D 3039/D 3039M "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials"
12. Davidson P., Pineda E.J., Heinrich Ch., Waas A.A. "Unified model for predicting the open hole tensile and compressive strengths of composite laminates for aerospace applications", *54th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013, pp. 1-26.
13. Fan X.L., Qin W.J., Suo T. "Experimental investigation on the tensile strength of composite laminates containing open and filled holes", *Strangth Problems (Problemy prochnosti)*, 2014, vol. 2, pp. 141-146.
14. Esp B. "Practical analysis of aircraft composites", Grand Oak Publishing, USA, 2017, 737 p.
15. Ovdak O.V., Kalinin Yu.E., Kudrin A.M., Karaeva O.A., Degtyarev D.Ya. "The influence of content of reinforcing filler on mechanical properties of carbon-glass fiber reinforced plastics in matrix T-107", *Inorganic Materials: Applied Research*, 2018, vol. 9, issue 1, pp. 108-113.

Submitted 14.05.2018; revised 24.07.2018

#### Information about the authors

**Aleksey M. Kudrin**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Director for Sciences, CJSC "Rusaviainter", (31-B Leningradskaya st., Voronezh, 394004, Russia), e-mail: kudrin@rusaviainter.com

**Konstantin S. Gabriels**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Research Engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: gabriels\_k@mail.ru

## СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ $\text{In}_2\text{O}_3$ , $\text{ZnO}$ , МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДОМ

О.В. Жилова, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** методом ионно-лучевого распыления были синтезированы тонкопленочные наноструктуры  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$ , а также тонкие пленки  $\text{ZnO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  и  $\text{C}$ . Рентгеноструктурный анализ полученных образцов показал, что тонкие пленки  $\text{ZnO}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3$ , полученные методом ионно-лучевого распыления оксидных мишеней, характеризуются нанокристаллической структурой с гексагональной кристаллической решеткой для  $\text{ZnO}$  (пространственная группа  $R\bar{3}m$ ) и кубической для  $\text{In}_2\text{O}_3$  (пространственная группа  $Ia\bar{3}$ ). Тонкие пленки чистого углерода в исходном состоянии являются аморфными. Тонкие пленки  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  характеризуются гетерогенной структурой, в которой нанокристаллики оксидного полупроводника расположены в матрице аморфного углерода. Термическая обработка пленок  $\text{ZnO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  при температурах до 873 К приводит к росту размера кристаллов оксидного полупроводника, однако в пленках  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  рост кристаллитов выражен заметно слабее, что свидетельствует о более высокой стабильности наноструктурного состояния пленок  $\text{In}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ , модифицированных углеродом. В пленках  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  выявлено наличие некоторого избыточного по величине дифракционного фона, которое можно связать со средним расстоянием между кристаллитами оксидного полупроводника

**Ключевые слова:** широкозонные полупроводники, тонкие пленки, оксид индия, оксид цинка, ионно-лучевое напыление, термическая обработка, рентгеноструктурный анализ

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-08-36411)

### Введение

Тонкопленочные материалы на основе оксидных полупроводников  $\text{ZnO}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3$  обладают высокими значениями подвижности носителей заряда, термической и химической стабильностью структуры, прозрачностью в диапазоне длин волн видимого света и поэтому находят широкое применение в различных направлениях электроники [1]. Применение наноструктур на основе полупроводниковых материалов позволит повысить их стабильность и улучшить характеристики, чего невозможно добиться в рамках традиционных методов синтеза. Например, для газовых датчиков обычно используют мелкозернистые оксидные полупроводники с размером зерна от 10 до 100 нм [2-3]. Ограничение роста зерен в пленке можно добиться путем контролируемого введения модифицирующих добавок.

Поэтому исследование структуры гетерогенных наносистем на основе оксидных полупроводников, модифицированных углеродом, является актуальной задачей физического материаловедения.

### Образцы и методика эксперимента

Тонкие пленки гетерогенных систем  $\text{ZnO-C}$  и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  были получены поочередным распы-

лением мишеней оксидных полупроводников и углерода с осаждением на вращающуюся подложку при помощи ионно-лучевого напыления. В качестве подложек использовался кремний. Для получения образцов разной толщины между мишенью и подложкодержателем устанавливался V-образный экран. Количество оборотов подложкодержателя определяло количество бислоев в пленках полупроводник-углерод. Эффективные толщины полученных систем варьировались от 5 до 125 нм. Структуру пленок исследовали методом дифракции рентгеновских лучей на дифрактометре Bruker D2 Phaser ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1,54 \text{ \AA}$ ). Для расшифровки и анализа полученных дифрактограмм было использовано специализированное программное обеспечение Bruker DIFFRAC EVA 3.0 и TOPAS 4 с применением базы данных PDF2012.

Для исследования влияния термообработки на структуру полученных образцов были проведены термические отжиги в вакуумной камере путем плавного нагрева с выдержкой при заданной температуре в течение 30 минут и последующим охлаждением при давлении остаточных газов  $P \sim 10 \text{ Па}$ .

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены картины дифракции рентгеновских лучей ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1,54 \text{ \AA}$ ) от тонких пленок углерода, полученных методом

ионно-лучевого распыления. Видно, что в исходном состоянии и после отжига для данных пленок характерна аморфная структура [4], что проявляется в виде широкого гало на рис. 1.

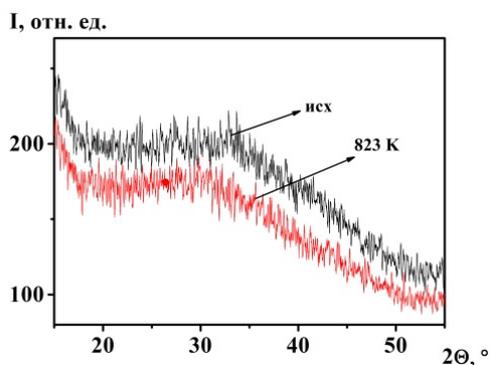


Рис. 1. Картины дифракции рентгеновских лучей ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1,54 \text{ \AA}$ ) от тонких пленок углерода в исходном состоянии и после термической обработки

Из результатов рентгеноструктурного анализа тонких пленок ZnO следует, что все образцы характеризуются гексагональной кристаллической решеткой с пространственной группой симметрии  $P63mc$  (рис. 2а). Параметры решетки  $a$  и  $c$  отличаются от табличных, приведенных в базе данных ICDD PDF2 [5], что свидетельствует либо о дефектности структуры полученной пленки (табл. 1), либо о наличии механических напряжений первого рода. Во всех изученных образцах тонких пленок ZnO независимо от их толщины наблюдается текстура с осью  $\langle 001 \rangle$ , перпендикулярная плоскости подложки, что проявляется в виде очень высокой интенсивности пика (002) на рис. 2а и может быть связано с особенностями формирования кристаллической структуры в процессе синтеза образцов.

Картины дифракции рентгеновских лучей от пленок ZnO толщиной 100 нм, подвергнутых отжигам при различных температурах ( $T_{\text{TO}}$ ) в течение 30 минут, представлены на рис. 2б. Анализ приведенных зависимостей показал, что при повышении температуры термообработки максимумы рентгеновской дифракции сдвигаются в сторону больших брегговских углов. Оценки параметров решетки гексагонального ZnO показали немонотонную зависимость параметра  $a$  от температуры отжига (рост и приближение к табличным значениям при 523К и плавное уменьшение с увеличением  $T_{\text{TO}}$  выше 523К), при этом параметр  $c$  приближается к равновесному (табл. 1). Таким образом, параметры решетки ZnO в полученных тонких пленках определяются не только механически-

ми напряжениями первого рода, но также дефектностью структуры, вероятно связанной с наличием большого количества вакансий по кислороду и других точечных дефектов.

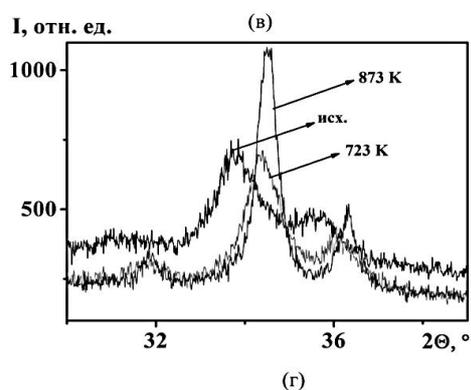
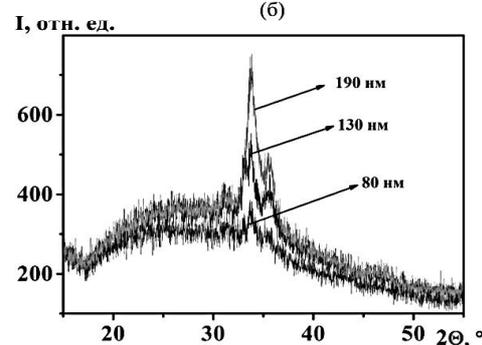
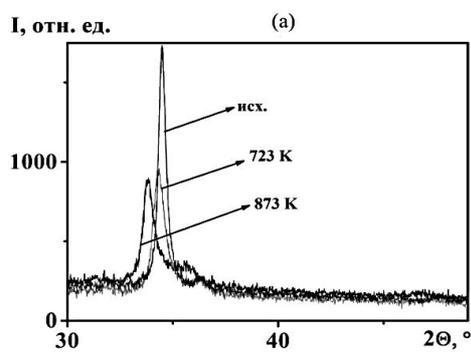
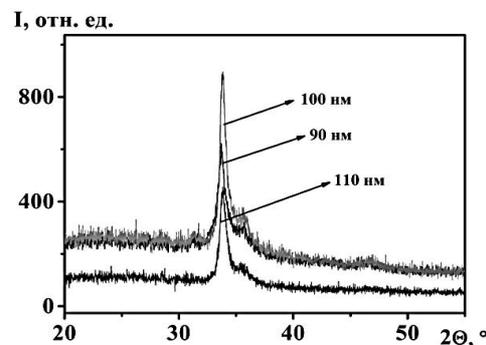


Рис. 2. Картины дифракции рентгеновских лучей ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1,54 \text{ \AA}$ ) от тонких пленок ZnO и ZnO-C в исходном состоянии (а, в) и после термической обработки (б, г)

Таблица 1

$T_{TO}, K$	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$D_{ZnO} (ZnO), \text{нм}$	$D_{ZnO} (ZnO-C), \text{нм}$
300 [6]	3,351	5,226	-	-
300	3,03	5,294	8,1	8,3
523	3,27	5,28	9,12	8,1
573	3,26	5,26	10,1	8,2
623	3,26	5,24	11,4	8,8
673	3,26	5,23	13,1	9,3
723	3,25	5,23	11,9	9,2
773	3,24	5,21	15,4	10,6
823	3,23	5,2	18,9	13,8
873	3,23	5,2	22,1	16,1

Особенностью картин дифракции рентгеновских лучей от тонких пленок ZnO после термообработки является увеличение интенсивности и сужение дифракционного максимума (002). Оценка размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) была проведена по формуле Шеррера [6]:

$$D = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos \Theta}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина монохроматической волны ( $\lambda_{CuK\alpha 1} = 1,54 \text{ Å}$ );  $\Theta$  – брегговский угол, соответствующий положению максимума рентгеновской дифракции;  $\beta$  – ширина пика на половине высоты;  $D$  – размер ОКР, который в нашем случае можно отождествить со средним размером зерна. Результаты приведены в табл. 2.

Рассмотрим зависимости картин дифракции рентгеновских лучей от пленок ZnO-C, имеющих различную толщину, в исходном состоянии (рис. 2в). Рентгеноструктурный анализ тонких пленок ZnO-C показал для всех образцов наличие рефлексов только от одной кристаллической фазы – гексагонального ZnO. В пленках ZnO, модифицированных углеродом, также как и в исходных пленках ZnO, наблюдается текстура с осью  $\langle 001 \rangle$ , перпендикулярная плоскости подложки. Анализ картин дифракции рентгеновских лучей, полученных от пленок ZnO-C после термообработки, показывает, что дифракционные максимумы от кристаллов ZnO существенно сдвигаются в сторону больших углов при повышении температуры обработки (рис. 2г).

Расчеты параметров кристаллической решетки ZnO для тонких пленок ZnO-C показали значения, сопоставимые с полученными для тонких пленок чистого ZnO.

Сравнение среднего размера кристаллитов ZnO для тонких пленок ZnO ( $D_{ZnO} (ZnO)$ ) и ZnO-C ( $D_{ZnO} (ZnO-C)$ ) показало, что в исходном состоянии размеры кристаллитов практически совпадают, однако после термообработки размер кристаллитов ZnO в пленках, модифицированных углеродом, увеличивается слабее для тех же  $T_{TO}$ , чем в пленках чистого ZnO, что проявляется тем сильнее, чем выше  $T_{TO}$  (табл. 1). Таким образом, добавление углерода в ZnO приводит к улучшению температурной стабильности нанокристаллического состояния тонких пленок ZnO-C.

Анализ дифрактограмм тонких пленок  $In_2O_3$  и  $In_2O_3-C$  показал, что для всех исследованных образцов выявлена кубическая кристаллическая решетка с пространственной группой симметрии Ia-3, которую можно отнести к фазе  $In_2O_3$ . Сравнение параметра  $a$  кристаллической решетки  $In_2O_3$  с табличными данными базы PDF2012 (табл. 2) позволило установить несоответствие литературным данным, вероятно вызванное большим количеством точечных дефектов структуры, а также тем, что в процессе напыления в пленке возникают механические напряжения первого рода. Из рис. 3а и 3в видно, что положения максимумов рентгеновской дифракции, а следовательно, и параметр решетки  $a$ , не зависят от толщины тонких пленок.

После термической обработки при температурах выше 523 К максимумы рентгеновской дифракции  $In_2O_3$  сдвигаются в сторону больших брегговских углов. Расчеты параметра  $a$  показали достаточно хорошее совпадение со значениями, взятыми из базы данных PDF2012 (табл. 2), что свидетельствует о релаксации механических напряжений и более равновесной кристаллической структуре тонких пленок  $In_2O_3$  после термообработки при температурах выше 523 К.

Для тонких пленок  $In_2O_3-C$  помимо рефлексов кубического  $In_2O_3$  наблюдается широкое гало, которое может быть отнесено к рентгеноаморфной фазе (рис. 3в), в качестве которой могут выступать аморфный углерод, а также мелкокристаллический (с размеров менее 3 нм) и аморфный оксид индия.

Как и для тонких пленок оксида цинка, для образцов  $In_2O_3$  и  $In_2O_3-C$  были проведены оценки размеров кристаллитов по методу Шеррера. Как для тонких пленок чистого  $In_2O_3$ , так и для  $In_2O_3-C$  размер кристаллитов  $In_2O_3$  увеличивается с увеличением температуры отжига (табл. 2).

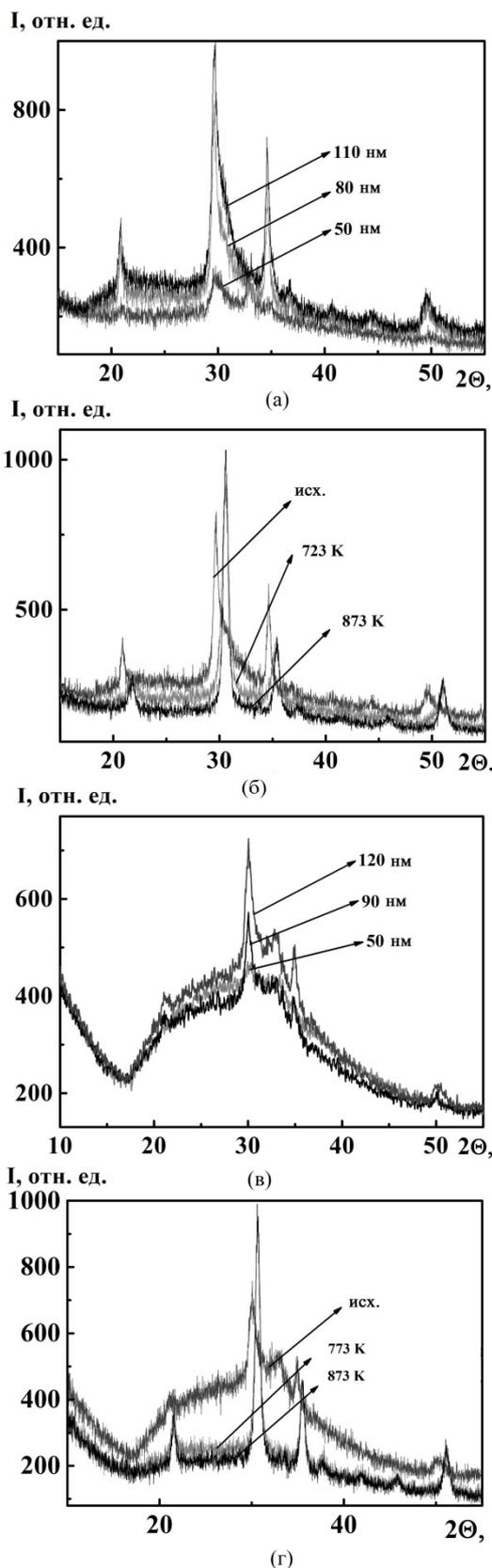


Рис. 3. Картины дифракции рентгеновских лучей ( $\lambda_{CuK\alpha 1} = 1,54 \text{ \AA}$ ) от пленок  $In_2O_3$  и  $In_2O_3-C$  в исходном состоянии (а, в) и после термической обработки (б, г)

Таблица 2

$T_{\text{то}}, \text{K}$	$a, \text{ \AA}$	$D_{In_2O_3} (In_2O_3), \text{ нм}$	$D_{In_2O_3} (In_2O_3-C), \text{ нм}$
300 [7]	10,12	—	—
300	10,39	8,5	12,0
523	10,12	8,9	12,3
573	10,12	9,5	13,0
623	10,12	10,8	13,7
673	10,12	11,3	14,4
723	10,12	11,5	13,6
773	10,12	12,4	14,0
823	10,12	14,3	14,4
873	10,12	16,5	15,6

После термообработки пленок  $In_2O_3-C$  содержание рентгеноаморфной фазы уменьшилось, о чем свидетельствует уменьшение площади под широким гало на рис. 3г. При этом размеры кристаллитов  $In_2O_3$  увеличились (табл. 2) и становятся тем больше, чем выше температура термообработки. Из табл. 2 видно, что после отжига размер кристаллитов в пленке  $In_2O_3-C$  ниже, чем в чистом  $In_2O_3$ . Уменьшение содержания аморфной фазы не может происходить из-за кристаллизации аморфного углерода, так как используемые температуры отжига слишком малы для осуществления процесса графитизации. Следовательно, уменьшение содержания аморфной фазы происходит по причине кристаллизации (или рекристаллизации) рентгеноаморфного оксида индия.

Таким образом, из анализа картин рентгеновской дифракции тонких пленок  $In_2O_3-C$  до и после термообработки следует, что добавление углерода приводит к уменьшению размеров кристаллитов  $In_2O_3$ , при этом некоторая доля оксида индия (вероятно на границах с углеродом) также находится в рентгеноаморфном состоянии. Так же, как и для пленок  $ZnO-C$  добавление углерода в пленках  $In_2O_3-C$  приводит к улучшению температурной стабильности нанокристаллического состояния.

На картинах дифракции рентгеновских лучей, измеренных в области малых брегговских  $2\theta = 1 - 10^\circ$ , для пленок  $In_2O_3-C$  и  $ZnO-C$  был обнаружен небольшой избыточный по величине дифракционный фон по отношению к интенсивности дифрагированного пучка для тонких пленок чистых  $ZnO$  и  $In_2O_3$ . При увеличении температуры обработки данный фон исчезает. Для анализа полученных результатов из зависимостей  $I(2\theta)$  для пленок, модифицированных углеродом, было проведено вычитание зависимостей  $I(2\theta)$  для пленок чистых оксидов в диапазоне  $2\theta = 1 - 10^\circ$  согласно формуле:

$$\Delta I = I(\text{In}_2\text{O}_3 / \text{ZnO-C}) - I(\text{In}_2\text{O}_3 / \text{ZnO}) \quad (2)$$

Величина  $2\Theta$  была преобразована в характеристический размер  $d$  согласно выражению  $\lambda = 2d\sin(2\Theta)$ . Результаты представлены на рис. 4.

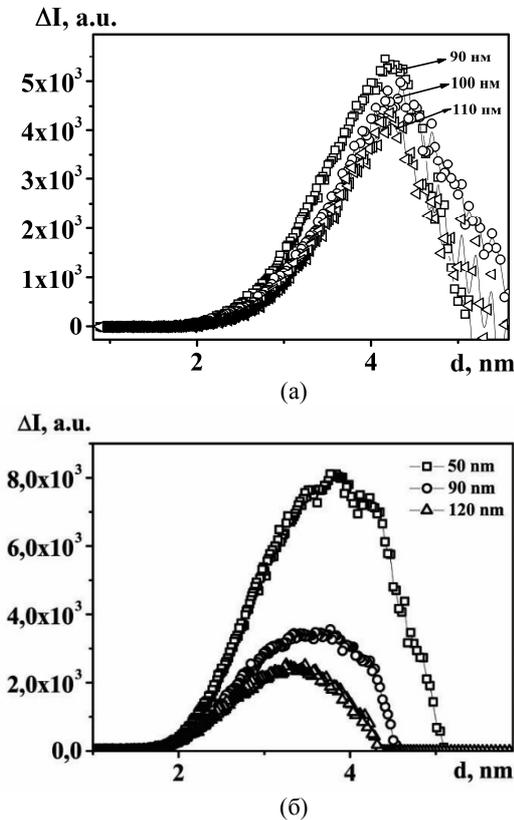


Рис. 4. Зависимости  $\Delta I(d)$  для пленок ZnO-C (а) и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  (б)

Полученные результаты не совпадают с измеренными толщинами бислоев ZnO-C и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$ . Поэтому можно предположить, что в пленках, модифицированных углеродом, присутствуют нанокристаллиты оксидов цинка или индия, хаотически расположенные в аморфной матрице углерода. В этом случае пики на рис. 4 можно связать со средним расстоянием между кристаллитами оксидного полупроводника.

### Заключение

В работе был проведен сравнительный анализ структуры гетерогенных систем  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$

и ZnO-C, полученных методом послойного ионно-лучевого напыления, и тонких пленок ZnO и  $\text{In}_2\text{O}_3$ , полученных при аналогичных условиях.

Тонкие пленки ZnO и  $\text{In}_2\text{O}_3$ , полученные методом ионно-лучевого распыления оксидных мишеней, характеризуются нанокристаллической структурой с гексагональной кристаллической решеткой для ZnO (пространственная группа R63mc) и кубической для  $\text{In}_2\text{O}_3$  (пространственная группа Ia-3).

Анализ картин дифракции рентгеновских лучей от тонких пленок ZnO-C и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  выявил, что структура образцов является гетерогенной, в которой нанокристаллики оксидного полупроводника расположены в матрице аморфного углерода.

Наноструктурное состояние тонких пленок ZnO-C и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$  является более стабильным к воздействию температуры, чем для тонких пленок чистых оксидов, что подтверждается исследованиями зависимостей размеров кристаллитов от температуры термообработки. Полученный результат может быть полезным для дальнейшего практического применения тонких пленок ZnO-C и  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-C}$ , например, в качестве сенсорного материала газовых датчиков.

### Литература

1. Coleman V.A., Jagadish C. Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing; properties; applications // Elsevier science bv. Amsterdam. 2006. pp. 1–589.
2. Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A. Wide bandgap semiconductors. Fundamental properties and modern photonic and electronic devices // Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007. P. 486.
3. Tang Y., Ma J.  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanostructures: synthesis and chlorobenzene sensing properties // RSC Advances. 2014. V.4. №49. P. 25692–25697.
4. Электрические свойства тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого напыления / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 11. С. 1722-1728.
5. База ICDD PDF-2, Release, 2012, карточка №01-075-1533.
6. Уманский Я.С. Рентгенография металлов. М.: Металлургия, 1967. 236 с
7. База ICDD PDF-2, Release, 2012, карточка №00-006-0416.

Поступила 30.05.2018; принята к публикации 24.07.2018

### Информация об авторах

Жилова Ольга Владимировна – канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: zhilova105@mail.ru

**Макагонов Владимир Анатольевич** – канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vlad\_makagonov@mail.ru

**Панков Сергей Юрьевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: srgpank@mail.ru

## STRUCTURE OF THIN FILMS OF WIDE-ZONE SEMICONDUCTORS $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO, MODIFIED BY CARBON

O.V. Zhilova, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the thin-film nanostructures ZnO-C and  $\text{In}_2\text{O}_3$ -C and thin films ZnO,  $\text{In}_2\text{O}_3$  and C were synthesized by ion-beam sputtering. The X-ray diffraction analysis of the obtained samples showed that thin films of ZnO and  $\text{In}_2\text{O}_3$  obtained by ion-beam sputtering of oxide targets are characterized by nanocrystalline structure with hexagonal crystal lattice for ZnO (space group P63mc) and cubic for  $\text{In}_2\text{O}_3$  (space group Ia-3). Thin films of pure carbon in the initial state are amorphous. Thin films of ZnO-C and  $\text{In}_2\text{O}_3$ -C are characterized by a heterogeneous structure in which the nanocrystals of the oxide semiconductor are located in the matrix of amorphous carbon. The thermal treatment of ZnO,  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO-C, and  $\text{In}_2\text{O}_3$ -C films at temperatures up to 873 K leads to an increase in the size of the oxide semiconductor crystals, however, in ZnO-C and  $\text{In}_2\text{O}_3$ -C films, the growth of the crystals is markedly weaker, which indicates a higher stability of the nanostructured state of  $\text{In}_2\text{O}_3$ , ZnO films modified by carbon. In ZnO-C and  $\text{In}_2\text{O}_3$ -C films, a certain excess diffraction background was detected, which can be related to the average distance between the crystals of the oxide semiconductor

**Key words:** wide-bandgap semiconductors, thin films, indium oxide, zinc oxide, ion-beam sputtering, thermal treatment, X-ray analysis

**Acknowledgements:** the work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-08-36411)

### References

1. Coleman V.A., Jagadish C. “Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties and applications”, Elsevier science bv., Amsterdam, 2006, pp. 1–589.
2. Takahashi K., Yoshikawa A., Sandhu A. “Wide bandgap semiconductors. Fundamental properties and modern photonic and electronic devices”, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007, 486 p.
3. Tang Y., Ma J. “ $\text{In}_2\text{O}_3$  nanostructures: synthesis and chlorobenzene sensing properties”, *RSC Advances*, 2014, vol. 4, no. 49, pp. 25692–25697.
4. Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Makagonov V.A., Pankov S.Yu., Sitnikov A.V. “Electrical properties of thin films of amorphous carbon obtained by ion-beam deposition”, *Journal of Technical Physics (Zhurnal tekhnicheskoy fiziki)*, 2017, vol. 62, no. 11, pp. 1724–1730.
5. ICDD PDF-2 database, Release, 2012, PDF Card №01-075-1533
6. Umanskiy Ya.S. “Radiography of metals” (“Rentgenografiya metallov”), Moscow, Metallurgiya, 1967, 236 p.
7. ICDD PDF-2 database, Release, 2012, PDF Card №00-006-0416.

Submitted 30.05.2018; revised 24.07.2018

### Information about the authors

**Ol'ga V. Zhilova**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Junior Researcher, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: zhilova105@mail.ru

**Vladimir A. Makagonov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Junior Researcher, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vlad\_makagonov@mail.ru

**Sergey Yu. Pankov**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: srgpank@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРУ ПЛЕНОК ОКСИДА ТИТАНА

В.А. Небольсин, Б.А. Спиридонов, В.А. Юрьев, Н. Свайкат, А.В. Макарова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** для получения функциональных материалов с различными свойствами используется электрохимическое модифицирование поверхности металлов. Тонкие оксидные пленки получались с помощью потенциодинамического метода. Изучена кинетика электрохимического анодирования титана марки ВТ 6. Установлено, что при анодном окислении титана в этиленгликолевом электролите в присутствии  $\text{NH}_4\text{F}$  формируется нанопористая структура оксида титана с диаметром пор 50-70 нм. В кислом электролите, содержащем  $\text{HF}$ , образуются нанопоры диаметром 100-110 нм, что связано с более высокой скоростью растворения оксида титана в сравнении со скоростью его образования. Более толстые пленки ( $> 5$  мкм) были получены из электролитов с контролируемым рН. Показано, что на начальных стадиях анодирования при длительности электролиза 1-2 мин. внешний вид поверхности анодированного титана заметно отличается от оксида, формируемого при длительности электролиза более 4 мин. По данным рентгеновской и электронной дифракции следует, что на ранних стадиях электролиза на поверхности титана образуется кристаллическая фаза оксида  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ , а с увеличением времени анодирования наблюдается диффузное гало, что означает переход в аморфную фазу  $\text{TiO}_2$

**Ключевые слова:** анодирование титана, электролиз, оксид титана, нанопоры

### Введение

Известно, что электрохимическое модифицирование поверхности металлов широко используется для получения функциональных материалов с различными свойствами [1-8]. Так, например, в последние годы проводятся многочисленные исследования по изучению свойств пористых оксидных пленок, полученных на титане и его сплавах [1, 3, 5, 8], что обусловлено их применением в качестве функциональных материалов [7]. Внимание, проявляемое к оксиду титана, связано с его сенсорными и оптическими свойствами, высокой фотокаталитической активностью, позволяющей реализовать процессы очистки воды и воздуха от загрязнений [2]. Одним из уникальных свойств титана и его сплавов является биологическая совместимость с клетками и тканями живых организмов для имплантации [9]. Для получения тонких оксидных пленок используются самые различные методы: нанесение из растворов (dip-coating и spin-coating), электрофорез, осаждение из газовой фазы [10, 11]. Однако наиболее интересной микроструктурой обладают пленки оксида титана, полученные электрохимическим методом путем анодного окисления металлического титана во фторсодержащих электролитах [5, 7, 8, 11]. Пленки оксида титана, полученные из таких

электролитов, состоят из нанотрубок, ориентированных перпендикулярно металлической подложке [11]. При этом внутренний и внешний диаметр нанотрубок можно варьировать в пределах нескольких десятков нанометров в зависимости от условий анодирования. Несомненными достоинствами данного типа структур является открытая пористость и достаточно узкое распределение пор по размерам [11]. При определенных условиях анодирования происходит формирование высокоупорядоченной плотной упаковки нанотрубок, обусловленное одновременно происходящими процессами роста и растворения оксида с достаточно большой толщиной (до 5 мкм), что позволяет использовать пленки пористого  $\text{TiO}_2$  в качестве газоселективных мембран и носителей для катализаторов [2]. Формирование оксидных пленок на титане является результатом одновременно происходящих процессов роста и растворения оксида [5].

Более толстые пленки ( $> 5$  мкм) были получены из электролитов с контролируемым рН, например, в присутствии сульфатных и фосфатных буферных растворах [3, 11]. Для того, чтобы снизить локальные флуктуации рН, используют вязкие электролиты, добавляя, например, глицерин [4, 11]. В результате этого удалось вырастить пленки толщиной до 7 мкм, состоящие из трубок с гладкими стенками диаметром 65 нм [4, 11]. Также в одной из своих работ Д.И. Петухов и соавторы представили способ синтеза и результаты исследо-

ваний свойств пленок пористого  $\text{TiO}_2$ , полученного анодным окислением титана в 0,5 %-м растворе  $\text{NH}_4\text{F}$  в глицерине [5, 11].

В последнее время разработаны новые электролиты, содержащие  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , в которых скорость роста нанопористого анодного оксида титана существенно больше, чем в электролитах с  $\text{F}^-$  - ионами [6]. Однако из электролитов с хлоридом аммония при анодировании формирование трубчатого оксида титана происходит не на всей поверхности, а только на отдельных участках [6]. Ранее проведенными нами исследованиями было установлено, что анодные пористые оксидные пленки можно получать из этиленгликолевого электролита в присутствии фторида аммония [7, 8].

Цель настоящей работы – выявить закономерность влияния режимов анодирования на фазовый состав и структуру анодных пленок, получаемых в процессах электрохимического окисления титана марки В6 в этиленгликолевом электролите.

### Методика эксперимента

Перед проведением электрохимических измерений поверхность образцов из технического титана - сплава ВТ6 (V 3,5, Al 5,3 -6,8) зачищали наждачной бумагой, полировали алмазной пастой, обезжировали щелочным раствором и спиртом, декапировали в серной кислоте (1:1) [11]. Анодные кривые потенциал-плотность тока ( $E - I$  кривые) снимали потенциодинамическим методом (0,5 мВ/с) в трехэлектродной ячейке [7]. Рабочим электродом служил образец из сплава ВТ 6 с площадью  $S = 1 \text{ см}^2$  [7]. В качестве электрода сравнения использовали хлорид-серебряный, а вспомогательный электрод – из платины [7]. Потенциалы приведены без пересчета.

Анодирование титановых образцов проводили во фторопластовой двухэлектродной электрохимической ячейке на потенциостате П-5827 М в гальваностатическом режиме в электролите состава [11]: 1%  $\text{NH}_4\text{F}$ , 2%  $\text{H}_2\text{O}$ , остальное – этиленгликоль [8, 10-12]. Плотность анодного тока  $i_a$  варьировали от 0,25 до 3 А/дм<sup>2</sup> [11], а продолжительность электролиза  $\tau_{\text{эл}}$  - от 30 мин. до 2 часов [8, 11, 12]. Для равномерного формирования оксидной пленки анодирование проводили при перемешивании электролита с помощью магнитной мешалки [11]. Структуру пористого оксида титана изучали методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе GSM 63- 80 LV и ме-

тодом дифракции быстрых электронов “на отражение” на электронографе ЭГ100 при ускоряющем напряжении 80 кВ на анодированном титане, полученном в этиленгликолевом электролите при анодной плотности тока 1 А/дм<sup>2</sup> и продолжительности электролиза от 15 до 45 мин. [11, 12].

Дифрактограммы на исследуемых образцах получали на автоматическом дифрактометре PANalytical EMPYREAN с использованием излучения  $\text{Cu K}\alpha_1$  (гибридный  $\text{Ge}\{111\}$  монохроматор на первичном пучке) и позиционно-чувствительном детекторе PIXcel<sup>1D</sup>. Измерение проводили в режиме отражения,  $\theta/2\theta$  сканирование с шагом  $0.026^\circ$  по  $2\theta$ . Диапазон измерения осуществляли в пределах  $15 - 80^\circ 2\theta$ . Расчет межплоскостных расстояний и интегральных интенсивностей, используемых для уточнения параметров ячейки, проводился по данным профильного анализа экспериментальных дифрактограмм (метод Паули) (Fig.1 дифрактограммы представлены в файлах для каждого из образцов). Все расчеты по уточнению дифрактограмм, определению и уточнению параметров ячеек, определению фазового состава проводились с использованием комплекса программ HighScore Plus, Version:3.0.t (3.0.5), Date 30-01-2012. Produced by: PANalytical B.V. Amelo, The Netherland. Фазовый анализ (полуколичественный) проводили с использованием «порошковой» базы данных PDF-2 ICDD (международного центра дифракционных данных).

### Результаты исследований

На рис. 1 представлены зависимости потенциал-плотность анодного тока ( $E - i_a$  кривые) для титана ВТ 6, полученные в потенциодинамическом режиме. Для сравнения  $E - i_a$  кривые снимали в двух растворах, содержащих в одном из них HF, а в другом -  $\text{NH}_4\text{F}$ . Видно, что в этиленгликолевом растворе, содержащем HF, при изменении потенциала в интервале от - 1.0 до 5,0 В плотность анодного тока  $i_a$  монотонно возрастает от 0,1 до 1,8 мА/см<sup>2</sup> (кривая 1). Очевидно, что в исследуемом диапазоне потенциалов происходит процесс не только формирования оксидной пленки, но и ее растворение как за счет активации поверхности титана, так и вследствие образования комплекса  $[\text{TiF}_6]^{2-}$  [11].

В менее кислом растворе, содержащем  $\text{NH}_4\text{F}$ , характер  $E - i_a$  кривых заметно отличается (кривая 2). Вначале наблюдается рост анодного тока до потенциала 1,1 В - максимум

ма на кривой, что можно объяснить образованием барьерного слоя, а затем ток снижается до  $5,6 \text{ mA/cm}^2$  при потенциале  $E = 3,3 \text{ В}$ . Очевидно, что снижение тока обусловлено зарождением и самоорганизацией пор. В дальнейшем при изменении потенциала до  $4,7 \text{ В}$  анодный ток практически не изменяется, что, очевидно, связано с “работой” сформированной на поверхности титана оксидной пленки, через поры которой протекает процесс окисления и рост массива нанотрубок.

Из полученных данных следует, что, очевидно, в интервале  $E$  от  $3,5$  до  $4,2 \text{ В}$  происходит образование нанопористой регулярной структуры оксида титана.

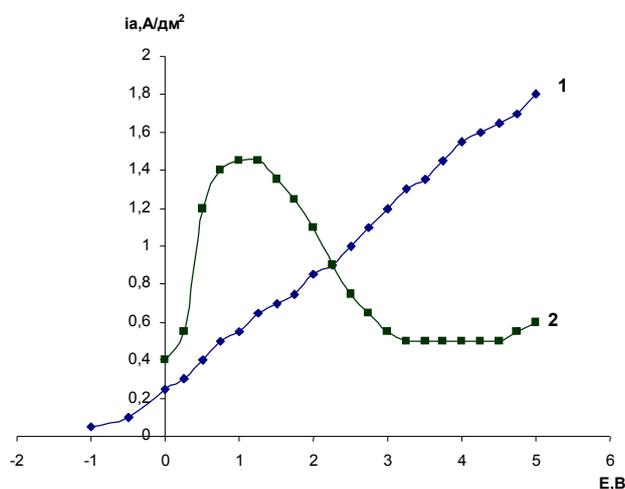


Рис. 1. Потенциодинамические  $E - i$  кривые для титана ВТ 6, полученные в растворах состава:  
1 – этиленгликоль + 1 % HF + 2 % H<sub>2</sub>O;  
2 – этиленгликоль + 1 % NH<sub>4</sub>F + 2 % H<sub>2</sub>O

На рис. 2 представлена структура поверхности анодированного титана, полученная при  $i_a = 0,5 \text{ mA/cm}^2$  и  $\tau_{эл.} = 1,5$  часа, с размерами пор  $50-70 \text{ нм}$ .

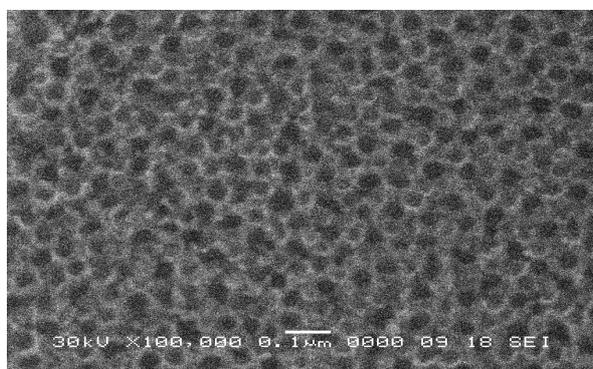


Рис. 2. РЭМ – изображение поверхности оксида титана, полученного из электролита, содержащего 1 % NH<sub>4</sub>F в смеси 100 мл этиленгликоля и 2 мл H<sub>2</sub>O. pH 7. Режим электролиза:  $i_a = 0,5 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\tau_{эл.} = 1,5$  часа

При дальнейшем увеличении анодной плотности тока до  $i_a = 20 \text{ mA/cm}^2$  и  $\tau_{эл.} = 45 \text{ мин.}$  размер пор возрастает до  $80-90 \text{ нм}$  (рис. 3). Видно, что в этих условиях анодирования формируется упорядоченная нанопористая структура пленки в виде взаимосвязанных нанотрубок.

В кислом электролите, содержащем плавиковую кислоту, размер пор заметно возрастает до  $100-110 \text{ нм}$  за счет растворения стенок нанотрубок. Из полученных данных можно заключить, что анодирование титана целесообразно проводить в этиленгликолевом электролите, содержащем фторид аммония, а не плавиковую кислоту.

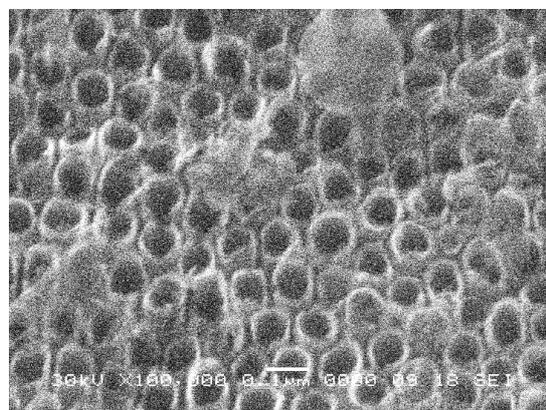


Рис. 3. РЭМ – изображение поверхности оксида титана, полученного из электролита состава: 1 % NH<sub>4</sub>F, 2 % H<sub>2</sub>O, остальное – этиленгликоль. Режим электролиза:  $\tau_{эл.} = 45 \text{ мин.}$  [12]

Установлено, что заметное влияние на внешний вид анодных пленок оказывает продолжительность электролиза. Представляло интерес изучить влияние  $\tau_{эл.}$  на внешний вид (отражательную способность), фазовый состав оксида титана, его поверхностную структуру.

Если проводить анодирование титана в этиленгликолевом электролите, содержащем 1 % NH<sub>4</sub>F и 2 % H<sub>2</sub>O при  $i_a = 10 \text{ mA/cm}^2$  и небольших значениях  $\tau_{эл.} = 1-2 \text{ мин.}$ , то образуются оксидные пленки, окрашенные в цвета “побежалости” с преобладанием голубого цвета и с достаточно высокой отражательной способностью. При дальнейшем увеличении  $\tau_{эл.}$  блеск поверхности анодированного титана заметно снижается, окраска поверхности анодированного титана становится светло-коричневой, а через 5 мин. электролиза формируется аморфная коричневая пленка.

Известно, что окисление титана кислородом протекает с образованием оксидов по схе-

ме:  $Ti + O_2 \rightarrow TiO \rightarrow Ti_6O \rightarrow Ti_3O \rightarrow Ti_2O_3 \rightarrow TiO_2$ , при этом в оксидах  $Ti_6O$  и  $Ti_3O$  образуются металлические связи, а  $TiO_2$  – ковалентное соединение [13].

Возможность образования низших оксидов титана можно проиллюстрировать термодинамическими характеристиками, например, стандартными энтальпиями образования оксидов титана (в пересчете  $\Delta H^0$  образования оксидов титана на один атом присоединенного кислорода)  $\Delta H^0_{TiO} = - 564,3$  кДж/моль;  $\Delta H^0_{Ti_2O_3} = - 522,5$  кДж/моль [14]. В сравнении с высшим оксидом  $TiO_2$ , для которого  $\Delta H^0_{TiO_2} = - 457,7$ , кДж/моль низшие оксиды более стабильны в стандартных условиях, но при этом их окисление с образованием диоксида титана происходит самопроизвольно. Например, с учетом стандартных энтальпий и энтропий образования  $Ti_2O_3$  и  $TiO_2$  превращение низшего в высший оксид происходит с выделением энергии и уменьшением свободной энергии Гиббса:  $Ti_2O_3 + 0,5O_2 = 2TiO_2$ ,  $\Delta H^0 = - 359,2$  кДж,  $\Delta G = - 305$  кДж [15].

Можно предположить, что в начальных стадиях анодирования образуются оксиды с металлической связью, с кристаллической структурой. Для этого необходимо было исследовать фазовый состав анодных пленок, полученных при малом времени электролиза.

Фазовый анализ изучали на образце анодированного титана марки ВТ 6, полученного из электролита состава: 1%  $NH_4F + 2$ мл  $H_2O + +100$  мл этиленгликоля, в режиме  $i_a = 10$  мА/см<sup>2</sup>,  $\tau_{эл.} = 1$  мин.

Результаты рентгенографических исследований и данных и анализа дифрактограмм представлены на рис. 4.

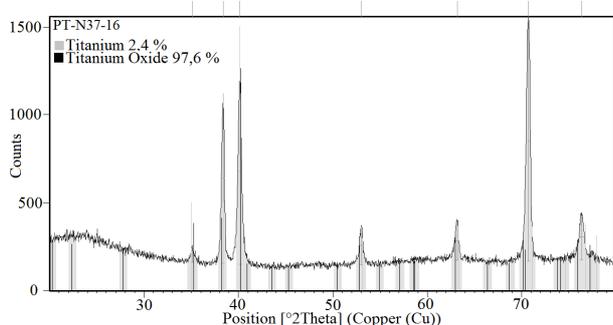


Рис. 4. Дифрактограмма анодированного титана ВТ6

В табл. 1 и 2 приведены сведения о результатах рентгенографического исследования

образцов анодированного титана ВТ 6 и их фазовый состав.

Таблица 1  
Рентгенографические данные образцов анодированного титана ВТ 6

Положение максимума, $2\theta$ , °	Высота пика, им/с	Полная ширина пика на уровне половины высоты пика (FWHM), °	Межплоскостное расстояние, Å	Относительная интенсивность, %
35.0952	84.63	0.4992	2.55490	6.18
38.3708	970.16	0.2184	2.34400	70.82
40.1574	1055.30	0.3744	2.24374	77.03
53.0081	223.19	0.3744	1.72612	16.29
63.1683	225.09	0.3744	1.47074	16.43
70.7112	1369.96	0.2496	1.33120	100.00
76.3471	255.73	0.4368	1.24635	18.67

Таблица 2  
Сведения о фазовом составе образцов анодированного титана ВТ 6

Код	Содержание, %	Название соединения	Сдвиг нуля, $\Delta 2\theta$	Масштабный фактор	Химическая формула
01-072-1807	2,4	Оксид титана	0.300	0.716	$Ti_6O$
98-016-8830	97,6	Титан	-0.500	0.869	$Ti_1$

Из анализа полученных данных следует, что основная фаза, составляющая образец, чистый  $Ti_1$ . На дифрактограмме присутствуют максимумы, соответствующие оксиду титана  $Ti_6O$ , но эти максимумы на всем диапазоне съемки перекрываются с более интенсивными максимумами, соответствующими  $Ti_1$ -фазе. Следует отметить, что дифракционные максимумы, соответствующие фазе  $TiO_2$  не выявлены. Можно предположить, что при малых значениях длительности электролиза вначале формируется кристаллическая фаза  $Ti_6O$ , которая с увеличением продолжительности анодирования постепенно переходит в аморфную фазу  $TiO_2$ .

В определенной степени подтверждением возможному образованию кристаллической фазы  $Ti_6O$  являются данные, представленные на электронограмме (рис. 5) и полученные для ВТ6, анодированного в тех же условиях электролиза.

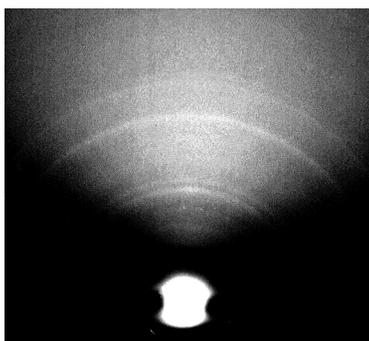


Рис. 5. Электронограмма оксидного слоя на титане VT6, полученного при  $i_a = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\tau_{\text{эл.}} = 1 \text{ мин.}$  в этиленгликолевом электролите, содержащем 1% фторида аммония

Для сравнения была получена электронограмма для титана VT6, анодированного при той же плотности тока, но при большей длительности анодирования ( $\tau_{\text{эл.}} = 10 \text{ мин.}$ ). Образующийся оксид титана не имеет кристаллической структуры. Это соответствует, очевидно, образованию аморфной фазы  $\text{TiO}_2$ .

При дальнейшем увеличении длительности анодирования от 15 до 45 мин. также подтверждается некристаллический характер образующегося оксида.

Выполненная электронограмма показала диффузное гало, указывающее на присутствие в анодном слое аморфной фазы. Также наблюдается интерференционный максимум, указывающий на присутствие в покрытии кристаллической фазы с межплоскостным расстоянием в решетке, равным 0,318 нм. Учитывая элементный состав покрытия, кристаллическая фаза может соответствовать рутилу  $\text{TiO}_2$  с тетрагональной решеткой.

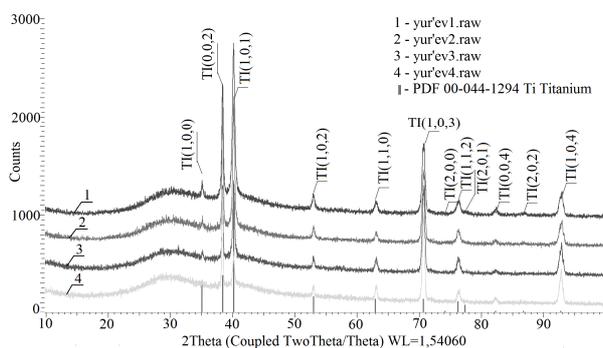


Рис. 6. Дифрактограммы образцов анодированного титана VT6 с поверхностным оксидным слоем, полученных при  $i_a = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $\tau_{\text{эл.}} = 15 \text{ мин.}$  (1), 20 мин. (2), 30 мин. (3), 45 мин. (4)

Дополнительно структура анодного покрытия была исследована на рентгеновском дифрактометре «Bruker». Были исследованы 4

образца, отличающиеся длительностью анодирования. Данные приведены на рис. 6, на котором фиксируется кристаллическая решетка чистого титана (основы) и гало, соответствующее аморфному оксиду титана, присутствующего на поверхности.

### Заключение

Потенциодинамическим методом изучена кинетика электрохимического анодирования титана VT6 [7]. Подтверждено, что в этиленгликолевом электролите в присутствии  $\text{NH}_4\text{F}$  формируются пористые анодные нанотрубки оксида титана с диаметром пор 50-70 нм. В кислом электролите, содержащем  $\text{HF}$ , образуются нанотрубки большего диаметра – 100-110 нм, что связано с более высокой скоростью растворения оксида титана в сравнении со скоростью его образования.

Показано, что на начальных стадиях анодирования при малых значениях длительности процесса электролиза ( $\tau_{\text{эл.}} = 1-2 \text{ мин.}$ ) внешний вид анодированного титана заметно отличается от пленок, полученных при  $\tau_{\text{эл.}} = 4-5 \text{ мин.}$  и более. Из данных анализа дифрактограмм и электронограмм было установлено, что вначале на поверхности чистого титана образуется блестящий низковалентный оксид  $\text{Ti}_6\text{O}$ , а при  $\tau_{\text{эл.}} > 4 \text{ мин.}$  – аморфный  $\text{TiO}_2$ .

### Литература

1. Masao Kaneko, Ichiro Okuro. Photocatalysis. Springer. Kodansha, 2002.
2. Zwillig M., Darque-Ceretty E. Anodic oxidation of titanium and TAGV alloy in chromic media. An electrochemical approach // *Electrochim. Acta.* 1999. № 44. P. 921.
3. Titanium oxide nanotubes prepared in phosphate electrolytes / A. Ghicov, H. Tsuchiya, J.M. Masak, P. Schmuki // *Electrochem. Comm.* 2005. № 7. P. 505-509.
4. Smooth Anodic  $\text{TiO}_2$  Nanotubes / J.M. Masak, H. Tsuchiya, L. Taveriya et al. // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005. № 44. P. 1-4.
5. Синтез и исследование свойств пленок пористого  $\text{TiO}_2$ , полученных анодным окислением / Д.И. Петухов, И.В. Колесник, А.А. Елисеев, А.В. Лукашин, Ю.Д. Третьяков // *Альтернативная энергетика и экология.* 2007. № 1 (45). С. 65-69.
6. Titania nanotubes prepared by anodization in fluoride-free acids / C. Richer, E. Panaitesasaai, R. Willey, L.G. Menon // *Mater Res*, 2007, vol. 22, pp. 1624-1631.
7. Синтез нанопористого  $\text{TiO}_2$  анодным окислением титана и перспективы его применения / В.А. Небольсин, Б.А. Спиридонов, А.И. Дунаев, А.Ю. Воробьев // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия "Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения".* 2016. Вып. 1(12). С. 15-19.

8. Получение нанопористых пленок титана электрохимическим анодным окислением / В.А. Небольсин, Б.А. Спиридонов, А.И. Дунаев, Е.В. Богданович // Неорганические материалы. 2017. Т. 53. № 6. С. 1-7.

9. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration / L. Gu'ehennec, A. Soueidan, P. Layrolle, Y. Amouriq // Dental Mat., 2007. V. 23. P. 844-854.

10. Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. Изд. / Сокол И.Я., Ульянин Е.А., Фельдгандлер Э. Г. и др. М.: Металлургия, 1989. 400 с.

11. Исследование влияния режимов анодирования пленок оксида титана в растворах глицерина и этиленгликоля на их пористость / Б.А. Спиридонов, В.А. Небольсин, А.И. Дунаев, С.С. Шмакова, С.А. Лейба

// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.2. С.6 5-69.

12. Получение упорядоченных систем нитевидных нанокристаллов твердого раствора  $Si_xGe_{1-x}$  с использованием маскирующей матрицы из нанопористого диоксида титана / В.А. Небольсин, Б.А. Спиридонов, А.И. Дунаев, А.Ю. Воробьев, А.С. Самофалова // Композиты и наноструктуры. 2017. Вып. 3-4(35-36). С. 173-178.

13. Ахметов Н.С. Неорганическая химия: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1975. 672 с.

14. Фролов В.В. Химия: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1979. 559 с.

15. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. СПб.: Изд. "Химия", Ленинградское отделение, 1978. 392 с.

Поступила 04.05.2018; принята к публикации 24.07.2018

### Информация об авторах

**Небольсин Валерий Александрович** – д-р техн. наук, профессор, декан факультета радиотехники и электроники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vcmsao13@mail.ru, тел. 84732560465

**Спиридонов Борис Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры химии и химической технологии, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: b.a.spiridonov@yandex.ru, тел. 89601106979

**Юрьев Владимир Александрович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры материаловедения и физики металлов, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: yuryevva@gmail.com, тел. 89507653146

**Свайкат Нада** – аспирант кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nadaalieva84@gmail.com, тел. 89518503491

**Макарова Анастасия Валерьевна** – магистрант кафедры материаловедения и физики металлов, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: DAV.NV@mail.ru, тел. 89518538170

## THE INFLUENCE OF ELECTROLYSIS MODES ON THE PHASE COMPOSITION AND STRUCTURE OF TITANIUM OXIDE FILMS

V.A. Nebol'sin, B.A. Spiridonov, V.A. Yur'ev, N. Swaikat, A.V. Makarova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** electrochemical modification of the metal surface was used to obtain functional materials with different properties. Thin oxide films were obtained by the potentiodynamic method. The kinetics of electrochemical anodizing of titanium grade W6 was studied. It was found that the anodic oxidation of titanium in the ethylene glycol electrolyte in the presence of  $NH_4F$  formed a nanoporous structure of titanium oxide with a pore diameter of 50-70 nm. In an acidic electrolyte containing HF, nanopores with a diameter of 100-110 nm were formed, which is associated with a higher rate of dissolution of titanium oxide in comparison with the rate of its formation. Thicker films ( $>5 \mu m$ ) were obtained from electrolytes with controlled pH. It was shown that at the initial stages of anodizing at the duration of electrolysis 1-2 min the appearance of the surface of anodized titanium differed markedly from the oxide formed at the duration of electrolysis more than 4 min. According to X-ray and electron diffraction data, a crystalline phase of  $Ti_6O$  oxide was formed on the surface of titanium at the early stages of electrolysis, and a diffuse halo was observed with an increase in the anodizing time, which means a transition to the amorphous phase of  $TiO_2$

**Key words:** titanium anodizing, electrolysis, titanium oxide, nanopores

### References

1. Masao Kaneko, Ichiro Okuro "Photocatalysis", Springer, Kodansha, 2002.
2. Zwilling M., Darque-Ceretty E. "Anodic oxidation of titanium and TAGV alloy in chromic media. An electrochemical approach", *Electrochim.Acta*, 1999, no. 44, pp. 921.
3. Ghicov A., Tsuchiya H., Masak J.M., Schmuki P. "Titanium oxide nanotubes prepared in phosphate electrolytes", *Electrochem. Comm.*, 2005, no. 7, pp. 505-509.
4. Masak J.M., Tsuchiya H., Taveriya L. et al. "Smooth anodic  $TiO_2$  nanotubes", *Angew. Chem. Int. Ed*, 2005, no. 44, pp. 1-4.

5. Petukhov D.I., Kolesnik I.V., Eliseev A.A., Lukashin A.V., Tret'yakov Yu.D. "Synthesis and study of properties of porous TiO<sub>2</sub> films obtained by anodic oxidation", *Alternative energy and ecology (Alternativnaya energetika i ekologiya)*, 2007, no. 1 (45)
6. Richer C., Panaitesasaai E., Willey R., Menon L.G. "Titania nanotubes prepared by anodization in fluorine-free acids", *Material Res.*, 2007, vol. 22, pp. 1624-1631.
7. Nebol'sin, V.A., Spiridonov B.A., Dunaev A.I., Vorobyev A.Yu. "Synthesis of nanoporous TiO<sub>2</sub> by anodic oxidation of titanium and prospects for its application", *Scientific Bulletin of Voronezh state University of architecture and construction. Series "Phys. - chem. problems and high technologies of building materials science" (Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya "Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya")*, 2016, issue 1(12), pp. 15-19.
8. Nebol'sin V.A., Spiridonov B.A., Dunaev A.I., Bogdanovich E.V. "Production of nanoporous films of titanium by electrochemical anodic oxidation", *Inorganic materials (Neorganicheskie materialy)*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1-7.
9. Gu'ehennec L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. "Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration", *Dental Mat.*, 2007, vol. 23, pp. 844-854.
10. Sokol I.Ya., Ul'yanin E.A., Feldgandler E.G. "Structure and corrosion of metals and alloys: manual" ("Struktura i korroziya metallov i splavov: Atlas. Sprav. Izd."), Moscow, Metallurgia, 1989, 400 p.
11. Spiridonov B.A., Nebol'sin V.A., Dunaev A.I., Shmakov S.S., Leiba S.A. "Study of the influence of the modes of anodizing of titanium oxide films on their porosity in solutions of glycerol and ethylene glycol", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6.2, pp. 65-69.
12. Nebol'sin V.A., Spiridonov B.A., Dunaev A.I., Vorob'yev A.Yu., Samofalova A.S. "Obtaining ordered systems of filamentous nanocrystals of a solid solution of Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> using a masking matrix from nanoporous titanium dioxide", *Composites and nanostructures (Kompozity i nanostruktury)*, 2017, issue. 3-4 (35-36), pp. 173-178.
13. Akhmetov N.S. "Inorganic chemistry. Textbook for universities" ("Neorganicheskaya khimiya: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1975, 672 p.
14. Frolov V.V. "Chemistry: textbook for universities" ("Khimiya: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1979, 559 p.
15. Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. "Short chemical handbook" ("Kratkiy khimicheskiy spravochnik"), Leningrad, Khimiya, 1978, 392 p.

Submitted 04.05.2018; revised 24.07.2018

#### Information about the authors

**Valeriy A. Nebolsin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Dean of the Faculty of radio engineering and electronics, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vcmsao13@mail.ru, ph. 84732560465

**Boris A. Spiridonov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: b.a.spiridonov@yandex.ru, ph. 89601106979

**Vladimir A. Yuryev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: yuryevva@gmail.com, ph. 89507653146

**Nada Swaikat**, Graduate student, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: nadaalievna84@gmail.com, ph. 89518503491

**Anastasia V. Makarova**, MA, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: DAV.NV@mail.ru, ph. 89518538170