

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Информатика, вычислительная техника и управление*

|                                                                                                                                                                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Описание и оценка эффективности подсистемы поддержки принятия управленческих решений в условиях неопределенности с применением математической модели на основе оценки рисков на примере работы центра скорой медицинской помощи |           |
| <b>И.М. Пашуева, С.М. Пасмурнов, Е.Н. Королев, А.В. Бондарев.....</b>                                                                                                                                                           | <b>7</b>  |
| Моделирование производственных систем вентиляции                                                                                                                                                                                |           |
| <b>А.М. Шмырин, С.Л. Подвальный, О.А. Мещерякова, В.В. Сёмина.....</b>                                                                                                                                                          | <b>13</b> |
| Специализированная система моделирования для имитации функционирования многостадийных обслуживающих комплексов                                                                                                                  |           |
| <b>С.А. Олейникова.....</b>                                                                                                                                                                                                     | <b>19</b> |
| Программная реализация конструктора нейронных сетей                                                                                                                                                                             |           |
| <b>Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев.....</b>                                                                                                                                                      | <b>25</b> |
| Разработка и реализация алгоритма построения расписания сталеплавильного производства на основе адаптации фрактала Кантора                                                                                                      |           |
| <b>М.А. Цуканов, О.А. Божкова.....</b>                                                                                                                                                                                          | <b>32</b> |
| Анализ результатов экспериментальных исследований с использованием конструктора нейронных сетей                                                                                                                                 |           |
| <b>Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев.....</b>                                                                                                                                                      | <b>38</b> |
| Формирование структуры байесовской сети процесса тестирования надежности информационных систем                                                                                                                                  |           |
| <b>Т.В. Азарнова, Н.Г. Аснина, Д.К. Проскурин, П.В. Полухин.....</b>                                                                                                                                                            | <b>45</b> |

### *Энергетика*

|                                                                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Определение оптимизационных подходов при проектировании горелочного устройства автономного источника тока на основе термоэлектрического генераторного модуля кольцевой геометрии |           |
| <b>Т.С. Тимошинова, И.Э. Свиридов, Д.П. Шматов.....</b>                                                                                                                          | <b>52</b> |
| Программно-технический комплекс непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования ядерных энергетических установок                                           |           |
| <b>В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов.....</b>                                                                                                                             | <b>58</b> |

### *Радиотехника и связь*

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Автоматическая калибровка усилителей в составе АЦП                                                                                        |           |
| <b>В.С. Кононов, С.И. Рембеза.....</b>                                                                                                    | <b>64</b> |
| Устройство формирования опознавательных сигналов на основе микроконтроллера                                                               |           |
| <b>Н.Н. Кошелева, А.Б. Буслаев, С.И. Рембеза.....</b>                                                                                     | <b>69</b> |
| Однопороговый последовательный алгоритм обнаружения прямоугольного радиопульса с неизвестными длительностью, амплитудой и начальной фазой |           |
| <b>Б.В. Матвеев, М.М. Шахморadian, А.А. Макаров.....</b>                                                                                  | <b>74</b> |

### *Машиностроение и машиноведение*

|                                                                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей                     |           |
| <b>В.В. Куц, В.В. Пономарев.....</b>                                                                              | <b>81</b> |
| Направления повышения эффективности двухслойных звукопоглощающих конструкций для канала воздухозаборника самолета |           |
| <b>В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев.....</b>                                                           | <b>86</b> |

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Высокотемпературная ползучесть азотированного титана<br><b>В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин.....</b> | <b>90</b> |
| Синтез допусков параметров геометрической точности металлорежущих станков<br><b>О.В. Аникеева.....</b>      | <b>95</b> |

### ***Физика***

|                                                                                                                                                                                                                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Электрическое сопротивление и термоЭДС нанокompозитов $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$<br><b>В.А. Макагонов, А.С. Краснова, Л.И. Янченко, И.М. Трегубов, М.А. Каширин .....</b>                                                                                  | <b>104</b> |
| Повышение адгезионных свойств коммутационных слоёв на полупроводниковых ветвях p-типа термоэлектрических генераторных батарей<br><b>Е.К. Белоногов, В.А. Дыбов, А.В. Костюченко, С.Б. Кущев, Д.В. Сериков, С.А. Солдатенко, Е.Н. Федорова, А.В. Бугаков .....</b> | <b>110</b> |
| Оптимизация состава самозакаливающихся чугунов<br><b>Л.С. Печенкина.....</b>                                                                                                                                                                                      | <b>117</b> |
| Электрические и магниторезистивные свойства бескислородных композитов $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$<br><b>Т.В. Трегубова, О.В. Стогней, И.М. Трегубов, В.В. Кирпан, К.Г. Королев.....</b>                                                                   | <b>122</b> |
| Статистико-геометрический анализ атомной структуры аморфных сплавов системы Re-Tb<br><b>А.В. Бондарев, И.Л. Батаронов, И.М. Пашуева.....</b>                                                                                                                      | <b>128</b> |
| Применение градиентометрических схем для выделения вклада различных источников магнитных полей<br><b>И.М. Голев, Е.А. Никитина, А.М. Агеев, А.В. Сергеев.....</b>                                                                                                 | <b>133</b> |
| Влияние старения на термостойкость материала полимерного канального огнепреградителя<br><b>В.И. Рубинов, С.А. Гордиенко, А.А. Попов, А.В. Кушнырев.....</b>                                                                                                       | <b>138</b> |
| Термическая стабильность многослойной наноструктуры Mg/NbO<br><b>О.В. Стогней, А.Н. Смирнов, А.В. Ситников.....</b>                                                                                                                                               | <b>144</b> |
| Влияние наноразмерного оксидного наполнителя на свойства халькогенидов висмута p-типа проводимости<br><b>Ю.В. Панин, И.С. Ильяшев, Ю.Е. Калинин, А.А. Камынин, К.Г. Королев.....</b>                                                                              | <b>151</b> |

# CONTENTS

## *Informatics, computer engineering and control*

|                                                                                                                                                                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Description and estimation of the efficiency of the subsystem of supporting making managerial decisions under conditions of uncertainty with the application of the mathematical model based on risk assessment on the example of work of an ambulance center |           |
| <b>I.M. Pashueva, S.M. Pasmurnov, A.V. Bondarev.....</b>                                                                                                                                                                                                      | <b>7</b>  |
| Mathematical modeling of ventilation systems for production facilities                                                                                                                                                                                        |           |
| <b>A.M. Shmyrin, C.L. Podval'ny, O.A. Meshcheryakova, V.V. Syemina.....</b>                                                                                                                                                                                   | <b>13</b> |
| Specialized simulation system for imitation of functioning of multistage service complexes                                                                                                                                                                    |           |
| <b>S.A. Oleynikova.....</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>19</b> |
| Program implementation of the neural network designer                                                                                                                                                                                                         |           |
| <b>E.A. Gantseva, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, D.S. Boldyrev.....</b>                                                                                                                                                                                   | <b>25</b> |
| Development and implementation of the algorithm design compiling schedule of steelmaking based on adaptation of the fractal Cantor                                                                                                                            |           |
| <b>M.A. Tsukanov, O.A. Bozhkova.....</b>                                                                                                                                                                                                                      | <b>32</b> |
| Experiment results analysis using the neural networks designer                                                                                                                                                                                                |           |
| <b>E.A. Gantseva, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, D.S. Boldyrev.....</b>                                                                                                                                                                                   | <b>38</b> |
| Bayesian network structure formation of information systems reliability testing process                                                                                                                                                                       |           |
| <b>T.V. Azarnova, N.G. Asnina, D.K. Proskurin, P.V. Polukhin.....</b>                                                                                                                                                                                         | <b>45</b> |

## *Energetics*

|                                                                                                                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Optimization approaches determination in the design of an autonomous current source burner device on the basis of the thermoelectric generator module of ring geometry |           |
| <b>T.S. Timoshinova, I.E. Sviridov, D.P. Shmatov.....</b>                                                                                                              | <b>52</b> |
| Program-technical complex of continuous monitoring of operating damage to equipment of nuclear energy installations                                                    |           |
| <b>V.P. Povarov, M.B. Bakirov, A.D. Danilov.....</b>                                                                                                                   | <b>58</b> |

## *Radio engineering and communication*

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Auto-calibration of amplifiers in ADC                                                                                                     |           |
| <b>V.S. Kononov, S.I. Rembeza.....</b>                                                                                                    | <b>64</b> |
| Identification signals forming device based on a microcontroller                                                                          |           |
| <b>N.N. Kosheleva, A.B. Buslaev, S.I. Rembeza.....</b>                                                                                    | <b>69</b> |
| The single-threshold sequential algorithm for detection of the rectangular radio pulse with unknown duration, amplitude and initial phase |           |
| <b>B.V. Matveev, M.M. Shahmoradian, A.A. Makarov.....</b>                                                                                 | <b>74</b> |

## *Mechanical engineering and science of machines*

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Method for determining the position of the teeth of the interlocking side cutter with the constructive radial feed |           |
| <b>V.V. Kuts, V.V. Ponomarev.....</b>                                                                              | <b>81</b> |
| The ways to increase efficiency of acoustic honeycomb sandwich for an aircraft air intake duct                     |           |
| <b>V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, V.I. Fedoseev.....</b>                                                            | <b>86</b> |
| High temperature creep of the nitrided titan                                                                       |           |
| <b>V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.B. Korchagin.....</b>                                                              | <b>90</b> |
| Synthesis of geometric accuracy parameters tolerances of metal-cutting equipment                                   |           |
| <b>O.V. Anikeeva.....</b>                                                                                          | <b>95</b> |

## *Physics*

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Electrical resistance and thermal electromotive force of nanocomposites $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$<br>V.A. Makagonov, A.A. Krasnova, L.I. Yanchenko, I.M. Tregubov, M.A. Kashirin.....                                                             | 104 |
| Adjection properties increase of switching layers on n-type semiconductor branches of thermoelectric generator batteries<br>E.K. Belonogov, V.A. Dybov, A.V. Kostyuchenko, S.B. Kushchev, D.V. Serikov, S.A. Soldatenko, E.N. Fedorova, A.V. Bugakov..... | 110 |
| Composition optimization of self-hardening cast-iron<br>L.S. Pechenkina.....                                                                                                                                                                              | 117 |
| Electrical and magnetic-resistance properties of $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ anoxic composites<br>T.V. Tregubova, O.V. Stogney, I.M. Tregubov, V.V. Kirpan, K.G. Korolev.....                                                                     | 122 |
| Statistical geometry analysis of atomic structure of Re-Tb system amorphous alloys<br>A.V. Bondarev, I.L. Bataronov, I.M. Pashueva.....                                                                                                                   | 128 |
| Application of gradientometric schemes for detecting the contributions of different magnetic fields sources<br>I.M. Golev, E.A. Nikitina, A.M. Ageev, A.V. Sergeev.....                                                                                   | 133 |
| Ageing effect on the thermal stability of the polymer channel flame barrier material<br>V.I. Rubinov, S.A. Gordienko, A.A. Popov, A.V. Kushnyrev.....                                                                                                     | 138 |
| Thermal stability of multilayer Mg/NbO nanostructure<br>O.V. Stogney, A.N. Smirnov, A.V. Sitnikov.....                                                                                                                                                    | 144 |
| Nanosized oxide filler influence on the properties of p-type conductivity bismuth chalcogenides<br>Yu.V. Panin, I.S. Il'yashev, Yu.E. Kalinin, A.A. Kamynin, K.G. Korolev.....                                                                            | 151 |



**ОПИСАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДСИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ РИСКОВ  
НА ПРИМЕРЕ РАБОТЫ ЦЕНТРА СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ**

**© 2017 И.М. Пашуева, С.М. Пасмурнов, А.В. Бондарев**

В статье предложена подсистема поддержки принятия оперативных управленческих решений в условиях неопределенности, основанная на оценке рисков возникновения критического состояния системы. На примере центра скорой медицинской помощи это критическое состояние характеризуется переходом службы из нормального в чрезвычайный режим работы. Математическая модель позволяет с помощью многокритериальной оценки оперативно проанализировать загруженность районных центров, спрогнозировать загруженность в ближайшее время и предложить оптимальный вариант решения. В процессе решения поставленной задачи были предложены модель и принципы оценки и анализа рисков при оптимизации схем перераспределения ресурса между районными центрами. Для определения количественных характеристик оценки риска возможно применить метод, основанный на построении обобщенных оценок вариантов решений. Для сравнения вариантов решений используется несколько функций агрегирования. В качестве оптимального варианта выбирается тот, на котором достигнут максимум функции агрегирования.

Описание подсистемы поддержки принятия оперативных управленческих решений в городском центре скорой медицинской помощи приводится с помощью сетей Петри. В качестве позиций выбираются состояния системы от момента приема вызова до момента возвращения бригады скорой медицинской помощи на станцию. Механизмы функционирования подсистемы скорой медицинской помощи в так называемом чрезвычайном режиме работы, который характеризуется существенным увеличением количества вызовов в одном из районов центра скорой медицинской помощи, описываются в качестве отдельных позиций.

В статье приводятся результаты имитационного моделирования рассматриваемой подсистемы поддержки принятия оперативных управленческих решений на примере функционирования городского центра скорой медицинской помощи г. Воронежа в разных режимах работы

Ключевые слова: подсистема поддержки принятия управленческих решений, сети Петри, моделирование, оценка рисков

**Введение**

Актуальной на сегодняшний день задачей, стоящей перед организациями и службами различного уровня, является задача оперативности в обслуживании поступающих заявок, повышение качества оказываемых услуг, эффективность использования, распределения имеющегося транспортного и человеческого ресурса в условиях неопределенности. В рамках возрастающих возможностей современных информационных технологий возникает необходимость разработки новых моделей и алгоритмов работы подсистем управления и помощи в принятии управленческих решений, разработка программных комплексов поддержки принятия оперативных управленческих решений в условиях неопределенности и риска [1, 2]. В

процессе функционирования сложной системы периодически возникают такие состояния системы, которые требуют изменения состава или элементов системы для эффективной работы и предотвращения возникновения критического состояния [3]. Разработка алгоритмов, помогающих предотвратить возникновение критических состояний системы и выявить приближение показателей системы к критическому значению, а также разработать варианты стабилизации состояния системы – является одной из актуальных задач современных информационных технологий.

**Модель подсистемы**

Работа центра скорой медицинской помощи характеризуется двумя основными режимами: нормальным и экстренным [4, 5]. Для экстренного режима работы характерно резкое увеличение количества поступающих в районный центр вызовов. При таком режиме работы возникает необходимость перераспределения бригад между районными центрами.

---

Пашуева Ирина Михайловна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vapushka@yandex.ru  
Пасмурнов Сергей Михайлович - ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: vapushka@yandex.ru  
Бондарев Алексей Владимирович - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: bondarev@mail.ru

Для помощи в принятии оперативных управленческих решений предлагается математическая модель, позволяющая с помощью многокритериальной модели оперативно проанализировать загруженность районных центров и предложить оптимальные варианты решения. В процессе решения поставленной задачи были предложены модель и принципы оценки и анализа рисков при оптимизации схем перераспределения ресурса между районными центрами. Определение факторов риска и первоначальная качественная их оценка обуславливают те параметры модели, изменения которых должны быть оценены в имитационной модели. Принципы работы схемы оценки и анализа рисков при оптимизации распределённого ресурса центра скорой медицинской помощи можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 1.

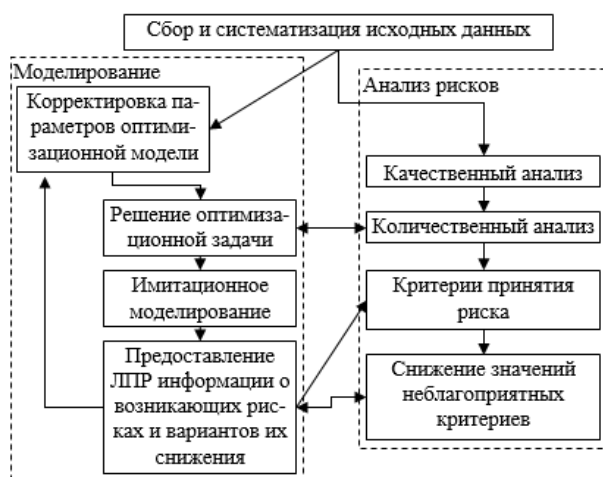


Рис. 1. Взаимодействие модели поддержки принятия управленческих решений и методов анализа рисков

В виде качественных показателей анализа рисков возникновения перехода в чрезвычайный режим работы можно выделить как внутренние риски системы, такие как перебои в поставке медикаментов на станцию скорой медицинской помощи, поломки оборудования оказания медицинской помощи, нехватка персонала и неполное оснащение бригад, возможная поломка машины скорой помощи, так и внешние риски системы, такие как отсутствие мест в ближайших медицинских учреждениях, вероятность попадания машины скорой медицинской помощи в ДТП с пациентом или без него, возникновение крупных заторов на дорогах и т.д.

Количественный анализ рисков представляет собой оценку времени обслуживания каждого вызова, соотношения

количества поступающих вызовов и количества машин скорой медицинской помощи для каждой районной подстанции, среднее время обслуживания вызова за период. После определения количественных показателей риска анализируются возможности устранения неблагоприятных показателей работы центра скорой медицинской помощи, приводящие к переходу центра скорой медицинской помощи в экстренный режим работы. Анализируется ситуация во всех районных центрах скорой медицинской помощи и выбирается набор районных подстанций и предлагается для перераспределения количество бригад скорой медицинской помощи. После перераспределения ресурса бригад ситуация снова анализируется.

Для определения количественных характеристик оценки риска возможно применить метод, основанный на построении обобщенных оценок вариантов решений. Каждое решение оценивается по каждому из критериев  $S_j$ . Для сравнения вариантов решений используется несколько функций агрегирования. В качестве оптимального варианта выбирается тот, на котором достигнут максимум функции агрегирования следующего вида:

$$\alpha_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (d_i \cdot v(A_i, S_j)), \quad (1)$$

$$\beta_i = \varphi \cdot \min(d_i \cdot v(A_i, S_j)) + (1 - \varphi) \cdot \max(d_i \cdot v(A_i, S_j)), \quad (2)$$

где  $d_i$  - вес критерия,  $v(A_i, S_j)$  - оценка

критерия  $S_j$  для района  $A_i$ ,  $m$  - количество критериев,  $\varphi$  - изменяемый параметр,  $i$  - индекс района.

### Моделирование подсистемы

Наглядным аппаратом описания сложных систем является аппарат сетей Петри. Существует большое разнообразие разновидностей и расширений сетей Петри. В частности, теорию сетей Петри можно применять при моделировании системы управления центром скорой медицинской помощи. В качестве позиций будем выбирать состояния системы от момента приема вызова до завершения работы бригады и отправления отчета об обслуживании пациента.

Выберем маркеры двух типов: вызовы и бригады. В моделируемой системе имеет

большое значение время. Поэтому следует выбрать временные сети Петри.

На рис. 2 построена модель работы станции скорой помощи, состоящей из двух районов. Поступающие на диспетчерский пункт вызовы принимаются и классифицируются по определенным алгоритмам. Прием вызовов на диспетчерских пунктах моделируется позициями  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$ . Каждому вызову по результатам проведенного телефонного опроса (переход  $t_1, t_2, t_3$  и  $t_4$ ) присваивается ряд параметров: степень неотложности, количество бригад, которым необходимо отреагировать на вызов, и тип оборудования бригады, соответствующий жалобам пациента ( $a_5$ ). Входная функция сети Петри для этих переходов будет иметь вид:  $I(t_1) = a_1; I(t_2) = a_2; I(t_3) = a_3; I(t_4) = a_4$ , а выходная -  $O(t_1, t_2, t_3, t_4) = a_5$ . Затем, в переходе  $t_5$  к позиции  $a_6$  каждый вызов дублируется столько раз, сколько необходимо бригад на его реагирование и направляется в тот районный пункт скорой медицинской помощи, к которому относится территориально:  $I(t_5) = a_5, O(t_5) = a_6$ .

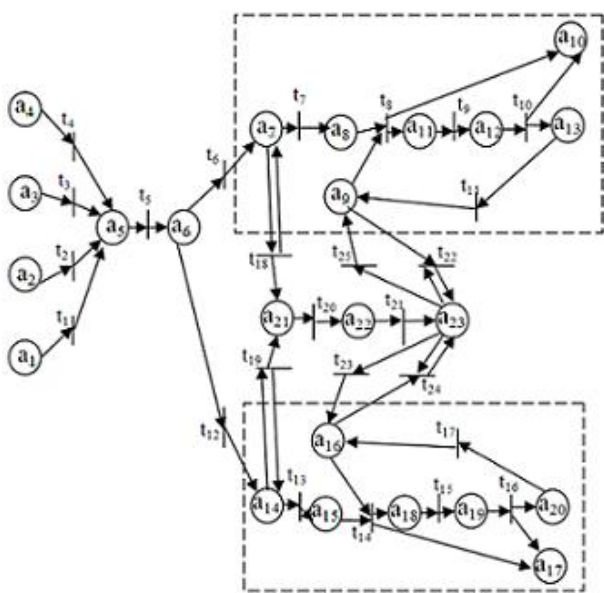


Рис. 2. Сеть Петри, иллюстрирующая работу центра скорой медицинской помощи

В следующем переходе  $t_6$  к позиции  $a_7$  вызовы, относящиеся к данному району города:  $I(t_6) = a_6, O(t_6) = a_7$ . Переход  $t_7$  выстраивает вызовы по мере неотложности: экстренные, неотложные, линейные:  $I(t_7) = a_7, O(t_7) = a_8$ . Этот переход является переходом с условием: пропускается заявка с наивысшим

приоритетом. Если заявки имеют равную степень приоритета, то пропускается та заявка, которая поступила в очередь позиции  $a_7$  раньше. Позиция  $a_9$  содержит маркеры, которые соответствуют количеству бригад в центре скорой помощи данного района города, которые готовы обслужить новый вызов. Каждая бригада имеет свои параметры: местоположение, тип оборудования автомобиля, состояние (на выезде или свободен).

В переходе  $t_8$  по определенному алгоритму выбирается бригада:  $I(t_8) = \{a_8, a_9\}, O(t_8) = \{a_{10}, a_{11}\}$ . При этом учитывается удаленность бригады от места нахождения пациента, оснащение машины. В этом переходе меняются параметры фишек. Вызов закрепляется за бригадой, и эта информация записывается в специальный файл статистики (позиция  $a_{10}$ ). Позиция  $a_{11}$  показывает, что бригада выехала на вызов. Переход  $t_9$  имеет временную задержку фишки до тех пор, пока бригада не прибудет к больному. При этом переход является сложным процессом. Система помогает бригаде городского центра скорой медицинской помощи максимально быстро добраться до пункта назначения: с помощью портативных компьютеров и системы спутникового слежения прокладывается кратчайший маршрут, указывается информация о возможных пробках и заторах на дороге. Входная и выходная функции для перехода будут иметь вид:  $I(t_9) = a_{11}, O(t_9) = a_{12}$ .

Позиция  $a_{12}$  – бригада приехала и начинает осмотр больного. Переход  $t_{10}$  также является сложным процессом и имеет временную задержку. В этом переходе пациента осматривают, возможно, обращаются к базе данных за дополнительной медицинской информацией о пострадавшем, о возможных аллергических реакциях и хронических заболеваниях и при необходимости доставляют в ближайшую больницу. Система отслеживает завершение перехода по результату – отправления отчета о работе в позицию  $a_{10}$ . Позиция  $a_{13}$  – бригада освободилась и готова принять новый вызов. Если вызова нет, она направляется (переход  $t_{11}$ ) в свой диспетчерский пункт  $a_9$ , соответственно  $O(t_{11}) = a_9, I(t_{11}) = a_{13}$ .

Переход  $t_{12}$  характеризует принятие вызова на диспетчерский пункт скорой медицинской помощи другого района города. Все районы работают аналогичным образом, поэтому и сеть

Петри для них будет аналогичной. Количество районов, как и количество диспетчеров, принимающих вызов, может быть различным.

Таким образом, воспользовавшись аппаратом сети Петри, можно определить конечное множество позиций  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{23}\}$ , множество переходов  $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_{25}\}$ , а также входную и выходную функции. Маркеры приняты двух типов: бригады, количество которых заранее известно и не меняется, и вызовы, которые генерируются в позициях  $a_1, a_2, a_3$  и  $a_4$  по вероятностной функции, зависящей от времени  $M_0(a_1, a_2, a_3, a_4) = f(\tau)$ . Начальная маркировка сети содержит только маркеры бригад в позициях  $a_9$  и  $a_{16}$  для соответствующего района:  $M_0(a_9) = n_1$ ,  $M_0(a_{16}) = n_2$ .

Большинство переходов построенной сети Петри требуют время на выполнение, которое колеблется в определенных пределах, описываемых функцией временных задержек  $v(\tau)$ . Время, затрачиваемое на выполнение каждого перехода, формирует временную базу  $\Theta = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i\}$ . В сети вводится пассивное состояние метки в позициях: если в позицию поступает метка, то она не может участвовать в возбуждении перехода в течение определенного времени. Поскольку каждой дуге соответствует вероятность блуждания метки в сети, то составленная сеть Петри является стохастической.

Позиции  $a_{21}$ ,  $a_{22}$  и  $a_{23}$  моделируют ситуацию, при которой необходимо перебросить бригады скорой помощи из одного района города в другой, в котором чрезвычайно большое количество вызовов. Переходы  $t_{18}$ ,  $t_{19}$ ,  $t_{20}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ ,  $t_{23}$ ,  $t_{24}$  и  $t_{25}$  являются переходами с условиями: если количество вызовов превосходит определенное значение, на пункт главного врача скорой медицинской помощи отправляется сообщение. С разрешения главного врача некоторые бригады из других районов могут быть переброшены для обслуживания вызовов. После того, как количество вызовов опустится до среднестатистического значения, бригады возвращаются в свои районы и продолжают работу.

Проанализируем полученную сеть Петри, моделирующую подсистему поддержки принятия оперативных управленческих решений на основе математической модели оценки риска. Построенная сеть не является безопасной, поскольку в каждый момент времени в различных позициях,

характеризующих состояние системы, может находиться различное количество фишек или маркеров (больше одного). Моделируемая сеть является сохраняющей относительно вектора взвешиваний  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , где  $n=23$  – количество состояний сети, элементы  $w_9, w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{16}, w_{18}, w_{19}, w_{20}, w_{23}$  равны 1, остальные элементы 0. При этом общее количество фишек в соответствующих позициях будет соответствовать суммарному количеству бригад во всех районах города. В данной сети Петри существуют конфликтующие переходы, такие как  $t_6, t_{12}$ . Поэтому необходимо использование переходов-ключей, каждый из которых имеет свою вероятность срабатывания. Соответственно суммарная вероятность конфликтующих ключей равна 1. Сеть не является тупиковой, т.е. при любой разметке не возникнет ситуация, при которой все переходы будут пассивными.

Удобно выделить в отдельную сеть Петри ситуацию переброски бригады из одного района города в другой, нуждающийся в большем количестве медицинских машин. Для каждого района существуют два главных параметра, определяющие необходимость и возможность осуществления переброски: это количество ожидающих обслуживания вызовов и количество свободных бригад.

Предположим ситуацию, в которой в некотором районе количество бригад значительно меньше необходимого для нормальной работы районной станции медицинской помощи. Тогда необходимо проанализировать загруженность вызовами другие районные станции города и из всех имеющихся станций выбрать ближайшую с наибольшим количеством свободных машин. Переброска бригад должна осуществляться с одобрения главного врача городского центра скорой медицинской помощи, поэтому сообщение о возникшей ситуации появляется на экране автоматизированного рабочего места главного врача. Варианты по переброске бригады предоставляются ему для выбора и утверждения.

Анализ такой многопозиционной сети Петри является не простой задачей. Для моделирования данной сети Петри был выбран пакет GPSS.

Используя стандартные блоки и операторы программы были построены две модели работы служб скорой медицинской помощи: с применением автоматизированной подсистемы поддержки принятия оперативных

управленческих решений на основе математической модели оценки рисков и вторая модель, иллюстрирующая работу центра скорой медицинской помощи без применения подсистемы помощи в принятии оперативных управленческих решений. Две модели рассматривались в равных условиях по поступающим вызовам: их количеству и классу, а также по ресурсам бригад. За время моделирования каждой моделью было обслужено 300 вызовов. В результате неоднократных экспериментов были получены графики скорости обслуживания поступающих вызовов (рис. 3).

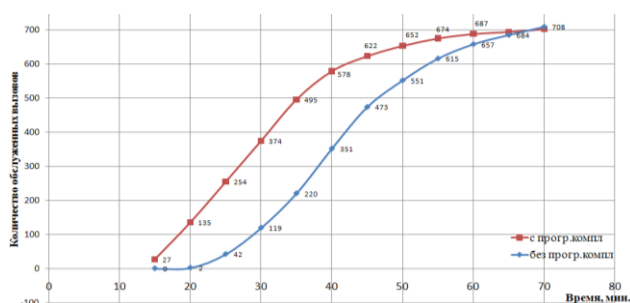


Рис. 3. Сравнение скорости обслуживания вызовов до и после применения подсистемы поддержки принятия решения

### Выводы

Система поддержки принятия оперативных управленческих решений на основе математической модели оценки рисков в работе городского центра скорой медицинской помощи заметно ускоряет и оптимизирует работу службы. В подсистеме учитываются вызовы, поступившие относительно давно и до сих пор не обслуженные, им отдается приоритет. Это

позволяет рационально организовать работу станций скорого медицинского обслуживания.

По результатам имитационного моделирования можно сделать вывод о том, что использование подсистемы поддержки принятия оперативных управленческих решений на основе математической модели оценки рисков повышает эффективность, упрощает и оптимизирует работу центра скорой медицинской помощи, сокращает время реагирования на вызов.

### Литература

1. Кравец О.Я. Экономика и менеджмент в научных исследованиях систем управления и информационных технологиях. / О.Я. Кравец // Экономика и менеджмент. - 2013. - Т. 8. - № 2. - С. 23-29.
2. Подвальный С.Л. Сопряженные системы и градиент при оптимизации динамических систем / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 12-1. - С. 57-62.
3. Kravets O.Ja. Probabilistic approach to management rationalization in quality management system/ O.Ja. Kravets // Modern innovative approaches to development of economic relations in conditions of globalization: Proceedings of the International scientific and practical conference (Yelm, WA, USA, May 2014)/ Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O.Ja. Kravets. - 2014. - С. 66-78.
4. Пашуева И.М. Моделирование и анализ подсистемы управления центрами быстрого реагирования с помощью сетей Петри / И.М. Пашуева, С.М. Пасмурнов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7. - № 9. - С. 106-109.
5. Пашуева И.М. Применение сетей Петри в моделировании подсистемы управления центрами быстрого реагирования / И.М. Пашуева, С.М. Пасмурнов // Системы управления и информационные технологии: научно-технический журнал. - 2011. - № 4.1 (46). - С. 162-166.

Воронежский государственный технический университет

## DESCRIPTION AND ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF THE SUBSYSTEM OF SUPPORTING MAKING MANAGERIAL DECISIONS UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY WITH THE APPLICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL BASED ON RISK ASSESSMENT ON THE EXAMPLE OF WORK OF AN AMBULANCE CENTER

I.M. Pashueva<sup>1</sup>, S.M. Pasmurnov<sup>2</sup>, A.V. Bondarev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vapushka@yandex.ru

<sup>2</sup>PhD, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vapushka@yandex.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bondarev@mail.ru

The article proposes a subsystem supporting the adoption of operational management decisions in conditions of uncertainty, based on an assessment of the risks in a critical state of emergency. On the example of an ambulance center, this critical condition is characterized by the transition of the service from normal to emergency operation. The mathematical model allows us to analyze quickly the workload of the district centers, predict the workload in the near future and propose the optimal solution. In the process of solving this problem, a model and principles of risk assessment and analysis were proposed for optimizing the schemes of resource redistribution between district centers. To determine the quantitative characteristics of a risk assessment, it is possible to apply a method based on the construction of generalized estimates of decision options. To compare the solution options, several aggregation functions are used. As an optimal option, the one on which the aggregation function is maximum is selected.

The description of the subsystem supporting the adoption of operational management decisions in the city ambulance center using Petri nets is given. The positions of the system are selected from the moment of receiving a call until the ambulance crew returns to the station. The mechanisms of functioning of the subsystem of ambulance in so-called emergency mode of operation, which is characterized by a significant increase in the number of calls in one of the areas of the ambulance center, are described as separate items.

The article presents the results of simulation modeling of the subsystem of support for making operational management decisions based on the example of the functioning of the city ambulance center in Voronezh in different modes of operation

Key words: subsystem of support of making management decisions, Petri nets, modeling, risk assessment

### References

1. Pashueva I.M., Pasmurnov S.M. "Modeling and analysis of control subsystem of fast response centres by using Petri nets", The Bulletin of Voronezh State Technical University, 2011, vol. 7, no. 9, pp. 106-109.
2. Pashueva I.M., Pasmurov S. M. "Application of Petri nets in the modeling of a control subsystem of fast response centres", Control systems and information technology, 2011, no. 4.1(46), pp. 162-166.
3. Pashueva I.M. "The simulation of a distributed network of emergency services with the use of aggregation functions", Proc. of the XIII Intern. Seminar "Physic-mathematical modeling of systems" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XIII mezhdunar. seminara), Voronezh, 2015, part 2, pp. 65-68.
4. Pashueva I.M. "Simulation of the control system centres of ambulance services using multi-criteria evaluations", Proc. of the XIII Intern. Seminar "Physic-mathematical modeling of systems" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XIII mezhdunar. seminara), Voronezh, 2015, part 2, pp. 74-78.
5. Pashueva I.M. "Modeling the process of redistribution of the transport resources of a distributed ambulance centres network", Proc. of the XIII Intern. Seminar "Physic-mathematical modeling of systems" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XIII mezhdunar. seminara), Voronezh, 2015, part 2, pp. 79-83.
6. Pashueva I.M. "Modeling of functioning a distributed ambulance centres network using medical air transport", Proc. of the XIV Intern. Seminar "Physic-mathematical modeling of systems" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XIV mezhdunar. seminara), Voronezh, 2016, part 2, pp. 124-130.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ**

© 2017 А.М. Шмырин, С.Л. Подвальный, О.А. Мещерякова, В.В. Сёмина

При производстве таких строительных материалов, как цемент, недостаточно эффективной является работа систем обеспыливающей вентиляции. Запыленность воздуха в рабочих зонах на различных этапах производства может превышать предельно допустимые концентрации во много раз. В данной работе рассмотрена оптимизация системы вентиляции помещения цеха с помощью окрестностного моделирования, позволяющая очищать приточный воздух, удалять избытки тепла, влаги, пыли, вредных газов и паров, поступающих в воздух рабочих помещений при технологическом процессе, поддерживать необходимую по технологическим параметрам влажность воздуха в помещении, а также очищать загазованный и запыленный воздух перед его выбросом в атмосферу. Модель строится для цеха, в котором находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера. Предлагаемая модель имеет иерархическую структуру, выходные величины моделей более высокого уровня используются как параметры моделей более низкого уровня. Ставится задача идентификации моделей сложной системы в условиях параметрической связи моделей, которые описывают неполноту исходных данных

Ключевые слова: математическое моделирование, окрестностные системы, системы вентиляции

**Введение**

В химической промышленности процессы производства зачастую сопровождаются поступлением в воздушную среду помещения тепла, влаги, паров, пыли, токсических газов. Данные выделения изменяют состав и состояние воздушной среды, образующей микроклимат в помещении, что, в свою очередь, негативно влияет на производительность труда, вызывает отклонения в состоянии здоровья рабочих.

Для устранения указанных вредных поступлений применяется герметизация технологического оборудования, но не всегда такие меры технологически и экономически целесообразны. Оптимально организованная и автоматически управляемая система вентиляции является главным способом обеспечения микроклимата производственных помещений, соответствующего санитарным нормам и правилам. Система вентиляции поддерживает допустимые параметры воздушной среды, сохраняя инженерные конструкции помещения и повышая работоспособность людей.

Рассмотрим решение указанной проблемы на примере производства строительных материалов. При производстве цемента недостаточно эффективной является работа систем обеспыливающей вентиляции, так как запыленность воздуха в рабочей зоне упаковки

продукта может превышать предельно-допустимые концентрации более чем в 50 раз.

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование и оптимизация систем вентиляции, направленные на уменьшение выбросов вредных веществ. Создание энергоэффективной автоматической системы производственной вентиляции, связанной с технологическим процессом, позволит достичь сбережения энерго- и денежных ресурсов, обеспечить высокую производительность работы вращательных цементных печей.

**Постановка задачи**

Систему цементного производства по аналогии с [1, 2] можно представить в виде следующих узлов: «1-Система первичной обработки сырья», «2-Помол сырья», «3-Обжиг», «4-Помол клинкера», «5-Отгрузка цемента». Пыль выделяется при всех процессах дробления и измельчения известняка и угля, при разгрузке печи, последующем транспорте и измельчении цемента, его отгрузке. Три основных источника выбросов пыли дымовой трубы - это печь, клинкерный холодильник и цементные мельницы.

Рассмотрим цех, включающий третий узел, в нем находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера, а также пульт управления, на котором выполняются работы операторского типа. Исследования показали, что наибольшее количество цементной пыли выделяется из зон подсушки, кальцинирования и экзотермических реакций. Также клинкерная пыль образуется в конце зоны спекания и зоны охлаждения.

---

Шмырин Анатолий Михайлович – ЛГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: amsh@lipetsk.ru  
Подвальный Семён Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: spodvalny@yandex.ru  
Мещерякова Ольга Анатольевна – ЛГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: omes-48@mail.ru  
Сёмина Валерия Владимировна – ЛГТУ, ст. преподаватель, e-mail: pravilnik@mail.ru

Помимо высокого содержания цементной пыли в данном производственном помещении вредными факторами являются значительные тепlopоступления от головки вращательной цементной печи, низкая влажность воздуха, недостаточная звукоизоляция пульта управления.

Существующая система вентиляции воздуха не справляется с цементной пылью и тепlopоступлениями, постоянно выходят из строя кондиционеры, регулирующие температуру в рабочей зоне пульта управления.

### Описание структурной модели

Для оптимизации работы системы вентиляции рассмотрим ее структурную схему, включающую следующие узлы: «Вход», «Нагрев», «Увлажнение», «Пульт управления», «Цех», «Фильтр», «Выброс». Для обеспечения энергосбережения предусмотрим рециркуляцию воздуха: передача части воздуха после фильтров вновь на узел нагрева. Вращательная печь представлена четырьмя зонами: 1 – зона подогрева сырья; 2 – зона декарбонизации; 3 – зона появления клинкера; 4 – зона охлаждения (см. рис. 1).

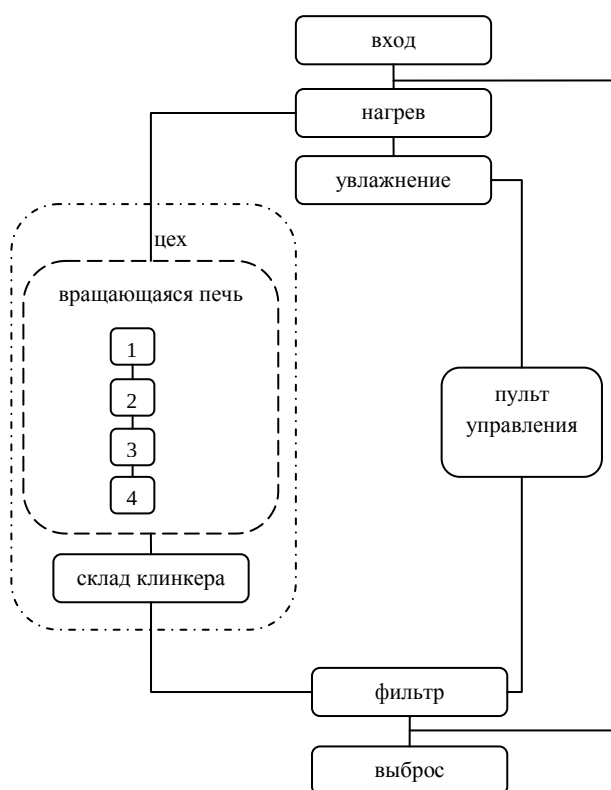


Рис. 1. Схема системы вентиляции

Свяжем работу вращательной цементной печи с системой вентиляции следующим образом. Режим работы печи влияет на количество

выделяемой пыли: работа вращающейся печи с частыми кратковременными остановками, а также замедленное вращение нарушает процесс формирования зерен клинкера, происходит образование клинкерной пыли. Помимо обеспечения микроклимата в помещении, система вентиляции должна обеспечивать соответствующие нормам выбросы твердых частиц (пыли) в атмосферу. В зависимости от количества поступлений цементной пыли производится коррекция работы вращательной печи в рамках допустимых значений ее параметров.

Предлагаемая система автоматического управления микроклиматом [2] осуществляет свою работу с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), связывающего работу системы вентиляции и кондиционирования, системы управления работой печи.

Параметры воздушной среды снаружи и внутри помещения, измеряются с помощью датчиков, поступают в качестве входных сигналов в математическую модель, реализованную на языке программирования ПЛК, далее производится анализ данных, реализуется оптимальный алгоритм автоматического управления [3].

Осуществить регулирование объема приточного воздуха в помещении предпочтительнее плавным изменением частоты вращения электроприводов вентиляторов с помощью частотного регулирования. Указанный способ помогает сэкономить большое количество энергии, затрачиваемой на подготовку и распределение воздуха [4,5].

Входными сигналами в модель будут такие параметры, как влагосодержание насыщенного воздуха и воздуха в зоне нахождения людей, подвижность воздуха в помещении, температура воздуха в приточной, вытяжной и рекуперационных системах вентиляции, температура и относительная влажность в рабочей зоне, температурный градиент по высоте помещения, температура воздуха в помещении по показаниям мокрого термометра, количество людей в помещении, режим работы печи, количество загрязняющих веществ, концентрация пыли в потоке загрязняющего газа. По показаниям этих параметров определяется необходимое количество приточного, вытяжного, рекуперационного воздуха [6], то есть выходом модели будут частоты вращения электропривода соответствующих вентиляторов.



### Описание окрестностной модели

Систему цементного производства с помощью окрестностного моделирования [1, 2] можно представить в виде следующих узлов: «Система первичной обработки сырья», «Помол сырья», «Обжиг и система очистки воздуха», «Помол клинкера», «Отгрузка цемента», «Экология».

Каждый узел включает совокупность агрегатов и складов системы цементного производства.

Рассмотрим цех, включающий узел «Обжиг и система очистки воздуха», состоящий из подсистем 1 и 2, представленных на рис. 2. В отделении 1 находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера, а также пульт управления вращательной печью, на котором выполняются работы операторского типа.

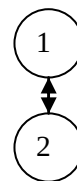


Рис. 2. Увеличенная схема узла «Обжиг и система очистки воздуха»

Представим систему вентиляции в виде окрестностной системы, включающую узлы (рис. 3): «4-Вход», «5-Фильтр1», «6-Кондиционирование1», «7- Фильтр2», «8-Кондиционирование2», «9-Помещение пульта управления», «10-Вытяжка», «11-Фильтр3», «12-Выброс». Узел 4 подает наружный воздух в помещение, далее воздух очищается от пыли в узле 5, доводится до нужной температуры и влажности в узле 6. Так как требования к параметрам воздушной среды в помещении пульта управления более жесткие, чем в помещении цеха, воздух необходимо дополнительно обработать (узел 7, 8) для достижения необходимых параметров микроклимата.

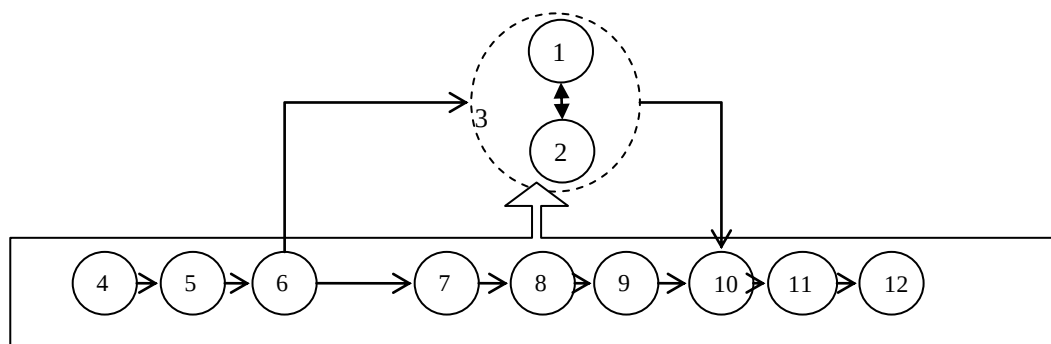


Рис. 3. Подробная схема узла «Обжиг и система очистки воздуха»

Далее подготовленный воздух поступает в помещение пульта управления (узел 9) и в цех (узел 3), из которых удаляется вытяжной вентиляцией - узлом 10, но так как удаляемый воздух должен соответствовать экологическим требованиям, он проходит фильтрацию (узел 11), и только потом утилизируется в атмосферу (узел 12). Для обеспечения энергосбережения предусмотрим рециркуляцию воздуха - передачу части воздуха после фильтров вновь на узел 5. От вращающейся печи в цех поступают пыль и тепло, которые являются вредными факторами для воздушной среды помещения.

Опишем состояния и управления в узлах:

$X_1(4)$  – температура наружного воздуха, °C;  
 $X_2(4)$  – плотность приточного наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $X_3(4)$  – концентрация пыли в

наружном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $X(5)$  – концентрация пыли в приточном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $X_1(6)$  – температура приточного воздуха, °C;  $X_2(6)$  – влагосодержание приточного воздуха, г/кг;  $X(7)$  – концентрация пыли в приточном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $X_1(8)$  – температура приточного воздуха, °C;  $X_2(8)$  – влагосодержание приточного воздуха, г/кг;  $X_1(9)$  – количество человек, шт;  $X_2(9)$  – температура в рабочей зоне, °C;  $X_3(9)$  – влагосодержание воздуха в рабочей зоне, г/кг;  $X_4(9)$  – температурный градиент по высоте помещения, °C /м;  $X_5(9)$  – подвижность воздуха, м/с;  $U_1(9)$  – текущий расход приточного воздуха, м/с<sup>2</sup>;  $U_2(9)$  – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.;  $X_1(3)$  – температура воздуха в рабочей зоне, °C;  $X_2(3)$  – температурный градиент по высоте помещения, °C /м;  $X_3(3)$  – подвижность возду-

ха, м/с;  $X_4(3)$  – влагосодержание воздуха в рабочей зоне, г/кг;  $U_1(3)$  – текущий расход приточного воздуха, м/с<sup>2</sup>;  $U_2(3)$  – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.;  $X_1(10)$  – концентрация пыли в удаляемом воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $X_2(10)$  – влагосодержание удаляемого воздуха, г/кг;  $X_3(10)$  – температура удаляемого воздуха, °C;  $U_1(10)$  – текущий расход удаляемого воздуха, м/с<sup>2</sup>;  $U_2(10)$  – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.;  $X(11)$  – концентрация пыли в удаляемом воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $U(11)$  – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.;  $X(12)$  – концентрация пыли в утилизируемом воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $X_1(1)$  – температура поверхности вращательной печи, °C;  $X_2(1)$  – концентрация пыли от печи в воздухе рабочей зоны, мг/м<sup>3</sup>.

Основной характеристикой вентилятора является подача нагнетателя (количество воздуха) при работе на сеть без статической составляющей напора, пропорциональная частоте вращения нагнетателя. Необходимая частота вращения электропривода в зависимости от необходимого количества приточного воздуха:

$$U_2(i) = \frac{U_1(i) \cdot \omega_i}{L_i}, i = 3, 9, \quad (1)$$

где  $L_i$  – номинальный расход приточного воздуха, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_i$  – номинальная частота вращения электропривода вентилятора, об./мин. Номинальные характеристики вентилятора указываются в его паспорте.

Так как в производственном помещении одновременно происходит выделение теплоты и вредных веществ, то за количество приточного воздуха в пульт управления  $U_1(9)$ , в цех  $U_1(3)$  необходимо принимать большее из рассчитанных для каждого вида производственных выделений:

$$U_1 = \max(U_1^1, U_1^2, U_1^3), \quad (2)$$

где  $U_1^1$  – требуемый расход приточного воздуха для удаления теплоизбытков,  $U_1^2$  – требуемый расход приточного воздуха для удаления пыли,  $U_1^3$  – расход воздуха, определяемый по нормируемой кратности воздухообмена.

Полученное значение  $U_1$  необходимо проверить на соответствие санитарно-гигиеническим нормам по подаче в помещение наружного воздуха.

Расчет требуемого расхода приточного воздуха для удаления теплоизбытков  $U_1^1$  производится по формуле:

$$U_1^1 = \frac{\sum Q_{изб} \cdot 3,6}{X_1(4)(X_3(10) - X_2(4))c}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3)$$

где  $X_3(10)$  – температура удаляемого воздуха, °C;  $X_1(4)$  – температура приточного воздуха, °C;  $X_2(4)$  – плотность приточного наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость воздуха кДж/(м<sup>3</sup>°C).

Температуру удаляемого воздуха вычисляют по формуле:

$$X_3(10) = X_2(3) + X_4(3) \cdot (h - h_{p.z.}), \quad (4)$$

где  $X_2(3)$  – температура в рабочей зоне, °C;  $X_4(3)$  – температурный градиент по высоте помещения, °C/м;  $h$  – расстояние от пола до центра вытяжных проемов, м;  $h_{p.z.}$  – высота рабочей зоны, м.

Избытки явного тепла рассчитываются следующим образом:

$$\sum Q_{изб} = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (5)$$

Теплопоступления от освещения:

$$Q_1 = F \cdot E \cdot q_{осв} \cdot \eta_{осв}, \quad (6)$$

где  $F$  – площадь пола помещения, м<sup>2</sup>;  $E$  – удельная освещенность, лк;  $q_{осв}$  – коэффициент удельного тепловыделения Вт/(м<sup>2</sup> лк);  $\eta_{осв}$  – доля тепла, поступающая в помещение.

Теплопоступления от людей в помещении:

$$Q_2 = q_n \cdot X_1(9), \quad (7)$$

где  $q_n$  – количество тепла, выделяемое человеком, Вт;  $X_1(9)$  – количество человек.

Теплопоступления от цементной печи:

$$Q_3 = \alpha \cdot F_1 (X_1(2) - X_2(3)), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>°C);  $F_1$  – площадь поверхности печи в цеху, м<sup>2</sup>;  $X_1(2)$  – температура поверхности печи, °C.

Воздухообмен при выделении в помещение цементной пыли рассчитывается следующим образом:

$$U_1^2 = \frac{G}{z - X(7)}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (9)$$

где  $G$  – массовый расход пыли, г/ч;  $z$  – допустимая объемная концентрация пыли в воздухе помещения, г/м<sup>3</sup>.

Расход воздуха, определяемый по нормируемой кратности воздухообмена, выражается формулой

$$U_1^3 = K \cdot V, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (10)$$

где  $K$  – коэффициент кратности воздухообмена,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $V$  – объем помещения,  $\text{м}^3$ .

В результате окрестного представления получаем сложную систему, состоящую из двух компонент.

Моделируя сложную систему из-за иерархической структуры моделей выходные величины моделей более высокого уровня используются как параметры моделей более низкого уровня. Выходом узла 1 является поступление клинкерной пыли и теплопоступления от вращательной печи. В таком рассмотрении системы ставится задача идентификации моделей сложной системы в условиях параметрической связи моделей, которые описывают неполноту исходных данных.

Для оценки эффективности работы модели применим критерий:

$$K = \frac{1}{K_1} + K_2 + K_3 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где  $K_1 = \frac{K_1^p}{K_1^f}$  – производительность печи,

$K_2 = \frac{K_2^f}{K_2^p}$  – объем потребляемой энергии си-

стемой вентиляции,  $K_3 = \frac{K_3^f}{K_3^p}$  – объем выбро-

сов цементной пыли,  $K^f$  и  $K^p$  – фактическое и плановое значение показателя.

## Заключение

Таким образом, для повышения экологической безопасности производства предлагается оптимизация системы вентиляции помещения цеха обжига клинкера, позволяющая очищать приточный воздух, удалять избытки тепла, влаги, пыли, вредных газов и паров, очищать загазованный и запыленный воздух перед его выбросом в атмосферу.

## Литература

1. Шмырин А.М. Параметрическая идентификация окрестностной модели процесса воздухообмена в производственном помещении / А.М. Шмырин, Е.П. Трофимов, В.В. Сёмина // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2017. – № 3 (Т. 23). – С. 460-466.
2. Шмырин А.М. Трилинейная окрестностная модель процесса формирования температуры смотки горячекатаной полосы / А.М. Шмырин, А.Г. Ярцев, В.В. Сёмина // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2016. – № 2 (Т. 21) – С. 463-469.
3. Блюмин С.Л. Применение математического моделирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении плавательного бассейна / С.Л. Блюмин, В.В. Правильникова // Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. – 2013. – № 4. – С. 108-111.
4. Ананьев Б.А. Системы вентиляции и кондиционирования / Б.А. Ананьев. – М.: Евроклимат, 2001. – 567 с.
5. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха / А.Г. Сотников. – СПб.: «Береста», 2013. – Т. 1. – 423 с.
6. Инженерные системы зданий и сооружений. Теплогазоснабжение и вентиляция: учебник для вузов / под ред. Е.М. Авдолимова. – М.: Академия, 2014. – 320 с.
7. Шмырин А.М. Окрестностные системы: идентификация и оценка состояния / А.М. Шмырин, Н.Н. Карабутов. – Липецк: ЛЭГИ, 2005. – 132 с.
8. Блюмин С.Л., Шмырин А.М. Окрестностные системы / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин. – Липецк, ЛЭГИ, 2005. – 132 с.

Липецкий государственный технический университет  
Воронежский государственный технический университет

## MATHEMATICAL MODELING OF VENTILATION SYSTEMS FOR PRODUCTION FACILITIES

A.M. Shmyrin<sup>1</sup>, C.L. Podval'ny<sup>2</sup>, O.A. Meshcheryakova<sup>3</sup>, V.V. Syemina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: amsh@lipetsk.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: spodvalny@yandex.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: omes-48@mail.ru

<sup>4</sup>Assistant Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: pravilnik@mail.ru

In the production of building materials such as cement, the operation of dust-free ventilation systems is not effective enough. Dustiness of air in working areas at various stages of production can exceed the maximum permissible concentrations by many times. Optimization of the room ventilation system with the help of neighborhood modeling is considered in this paper. It allows to clean the incoming air, remove excess heat, moisture, dust, harmful gases and vapors entering the air of work premises during the technological process, maintain the air humidity in the room required by technological parameters, and also to clean the polluted and dusty air before it is released into the atmosphere. The model is built for the workshop, in which there are three rotary cement kilns, a clinker warehouse. The proposed model has a hierarchical structure, the output values of higher-level models are used as parameters of lower-level models. The task is to identify the models of a complex system under conditions of parametric coupling of models that describe the incompleteness of the initial data

Key words: mathematical modeling, neighborhood systems, ventilation systems

## References

1. Shmyrin A.M., Trofimov E.P., Syemina V.V. "Parametric identification of the neighborhood model of the air exchange process in the production room", Bulletin of Tambov State University, 2017, vol. 23, no.3, pp. 460-466.
2. Shmyrin A.M., Yartsev A.G., Syemina V.V. "Trilinear neighborhood model of the temperature formation process for hot-rolled strip grinding", Bulletin of Tambov State University, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 463-469.
3. Blyumin S.L., Pravil'nikova V.V. "Application of mathematical modeling in ventilation and air conditioning systems in the swimming pool area", Ecology of the Central Black Earth Region of the Russian Federation, 2013, vol. 4, pp. 108-111.
4. Anan'ev B.A. "Ventilation and air-conditioning systems" ("Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya"), Moscow, Evroklimat, 2001, 567 p.
5. Sotnikov A.G. "Design and calculation of ventilation and air conditioning systems" ("Proyektirovanie i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha"), Saint Petersburg, "Beresta", 2013, vol.1, 423 p.
6. Avdolimov E. M. "Engineering systems of buildings and structures. Heat and gas supply and ventilation: textbook for universities" ("Inzhenernyye sistemy zdaniy i sooruzheniy. Teplogazosnabzheniye i ventilyatsiya: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, Akademiya, 2014, 320 p.
7. Shmyrin A.M., Karabutov N.N. "Neighborhood systems: identification and state assessment" ("Okrestnostnye sistemy: identifikatsiya i otsenka sostoyaniya"), Lipetsk: LEGI, 2005, 132 p.
8. Blyumin S.L., Shmyrin A.M. "Neighborhood systems" ("Okrestnostnye sistemy"), Lipetsk, LEGI, 2005, 132 p.

## СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОСТАДИЙНЫХ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

© 2017 С.А. Олейникова

Одной из ключевых задач при анализе функционирования многостадийных обслуживающих комплексов является оценка времени выполнения заявки. Взаимная зависимость между работами, а также стохастический характер их длительности не позволяет гарантировать необходимую точность при получении соответствующих оценок искомой случайной величины. Имитация процесса обслуживания позволит не только оценить числовые характеристики такой величины, но и собрать подробные сведения о законе ее распределения, рассчитать риски задержки обслуживания и решить целый ряд других необходимых задач. Исследование специфики решаемой задачи позволило выдвинуть ряд требований, предъявляемых к системе, предназначенной для моделирования многостадийного обслуживания. Анализ существующих систем имитационного моделирования, в частности таких, как Anylogic, обусловил необходимость разработки собственной такой системы. С учетом специфики функционирования исследуемых комплексов, а также на основании требований, предъявляемых к системе, была разработана ее структура и определены назначения основных подсистем. Таким образом, разработана система имитационного моделирования, предназначенная для моделирования процесса функционирования многостадийных обслуживающих комплексов и обеспечивающая возможность сбора и анализа статистических данных о случайной величине, описывающей длительность проекта

Ключевые слова: система имитационного моделирования, многостадийный обслуживающий комплекс, закон распределения, числовые характеристики

### Введение

Исследование процесса функционирования многостадийных обслуживающих стохастических систем сопряжено с целым рядом сложностей. В первую очередь они вызваны случайным характером величины, описывающей длительности выполнения отдельных работ. Эта особенность наряду со сложной зависимостью между работами обуславливает необходимость поиска новых подходов, позволяющих получить полное описание случайной величины, определяющей время обслуживания, с требуемой точностью [1, 2]. В настоящее время наиболее распространенным подходом для решения данной задачи является метод PERT. Однако исследования показывают, что расчетные формулы этого метода не всегда точны [3]. В частности, если отдельные работы необходимо описать асимметричными случайными величинами и случайные величины, описывающие множество работ, лежащих на критическом пути, будут обладать одинаковым знаком асимметрии, то итоговая погрешность может быть недопустимо высокой [3]. В связи с этим возникает необходимость в моделировании процесса обслуживания в таких системах с целью получения выборки, на основании которой можно получить исчерпывающую информацию о времени выполнения заявки.

Анализ специфики исследуемых обслуживающих комплексов, а также существующих готовых сред имитационного моделирования обусловил необходимость в собственной разработке подобной системы.

В работы приведены требования к разрабатываемой системе, определена ее структура, а также приведен пример ее функционирования.

### 1. Постановка задачи и ее особенности

Рассматривается функционирование многостадийного обслуживающего комплекса, состоящего из нескольких центров обслуживания. На вход поступает поток заявок, требующих для своего обслуживания выполнения множества последовательно-параллельных работ. Каждая работа закреплена за определенным центром. Длительность обслуживания является случайной величиной. Ставится задача разработки приложения, позволяющего моделировать процесс функционирования такого комплекса. На выходе система должна сформировать выборку, каждый элемент которой представляет собой длительность обслуживания заявки. Кроме того, система должна быть снабжена инструментарием, позволяющим автоматически выполнять необходимый статистический анализ выборки. В частности, необходимо знать статистические оценки случайной величины, описывающей длительность обслуживания (математическое ожидание, дисперсия, асимметрия, эксцесс и

т.д.). Система должна обеспечивать возможность автоматического построения гистограммы по выборке, а также проверке гипотез о законе распределения полученной выборки разными критериями. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность импорта данных из базы данных и экспорта данных в базу или в Excel.

Таким образом, для имитации моделирования многостадийного обслуживающего комплекса и анализа полученных результатов необходима система, отвечающая следующим требованиям:

- ориентация системы на моделирование обслуживания взаимно-зависимых работ заявки со случайной длительностью выполнения (при наличии нескольких центров обслуживания, а также возможных ограничений на ресурсы);

- обеспечение достаточного функционала для проведения разнообразных экспериментов, связанных с анализом характеристик заявки, а также исследованием рисков, возникающих из-за возможности его несвоевременного завершения;

- минимизация сложности разработки с точки зрения конечного пользователя.

Перечисленные выше условия требуют обеспечения следующих возможностей:

- задания заявки наиболее простым для пользователя способом (в данном случае это будет графический способ, позволяющий задать заявку в виде связанного графа, ребра которого обозначают отдельные работы);

- импорта исходных данных из базы данных и экспорта результатов моделирования в нее;

- экспорта результатов моделирования в Excel.

Проанализируем существующие системы имитационного моделирования с точки зрения предъявляемых требований [4, 5, 6]. В настоящее время для моделирования систем используются такие программные продукты, как Anylogic, Arena, Simulink, GPSS и ряд других. Система GPSS не имеет встроенного графического редактора, не позволяет осуществлять взаимодействие с внешними файлами (такими, как Excel, база данных и т.д.), следовательно, абсолютно не подходит для решения данной задачи. Программный комплекс Arena предназначен для построения сложных алгоритмов имитации на основании агентного подхода. Анимации процесса моделирования в Arena уделяется большое внимание. Однако данная

система была реализована в первую очередь для исследования бизнес-процессов для различных коммерческих организаций. Еще одним программным средством, предназначенным для построения имитационных, а также аналитических моделей для динамических систем, является специализированная система Simulink. Она входит в состав многофункционального математического пакета MatLab. В отличие от Arena, Simulink имеет встроенный объектно-ориентированный язык и обширную библиотеку системных функций. Однако встроенный язык не является в полной мере языком высокого уровня, что создаёт дополнительные трудности при описании алгоритмов различных элементов. Кроме того, изначальная ориентация пакета в первую очередь на аналитический подход не позволяет в достаточной мере использовать все преимущества имитационного исследования. Все эти недостатки устранены в системе Anylogic. Это программное средство, предназначенное для создания имитационных моделей любой сложности. К несомненным достоинствам данного продукта следует отнести удобный графический редактор, позволяющий быстро создавать модели для широкого спектра задач, возможность расширения моделей средствами Java, возможность экспорта и импорта данных из базы данных и ряд других. Тем не менее, в виду отсутствия ориентации системы на исследуемую предметную область, потребуется надстройка, которая будет создаваться фактически «с нуля». В частности, необходимо полностью реализовывать графическую часть, математическую модель, собирать статистику, реализовывать проверку гипотез и т.д.

Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод о целесообразности разработки собственного программного продукта, специализирующегося в моделировании многостадийных обслуживающих комплексов и отвечающего всем вышеперечисленным требованиям.

## **2. Структура разрабатываемой системы**

Исходя из целей проектирования, а также требований, предъявляемых к системе, были сформулированы принципы, положенные в основу разрабатываемой СИМ. Они заключаются в возможности задания плана графика графическим способом, задания взаимной зависимости работ путем

перемещения их по графическому полю, отсутствии специализированного языка как излишнего средства, возможности импорта и экспорта данных, а также предоставлении пользователю расширенной основы для проведения экспериментов. Исходя из этого, была сформирована структура системы, общий вид которой представлен на рис. 1.

Рассмотрим более подробно функционирование некоторых подсистем. Одной из главных подпрограмм математической модели является подпрограмма, позволяющая генерировать случайные числа, распределенные по закону бета. В качестве основы для этого взят метод Йонка, основанный на исключении.

За формирование структуры модели отвечают, в первую очередь, подсистемы взаимодействия с пользователем и работы с графикой. На основании требований к графической части выделены следующие действия пользователя, реакции на которые реализованы в виде подпрограмм системы:

- выделение работы/ события;
- удаление работы/события;
- добавление работы/ события;
- перемещение по холсту работы/ события;
- соединение работ.

Алгоритмы подсистемы подробно описаны в [7]. Одной из важнейших подсистем является подсистема прогона модели. Ее функционирование основано на принципе особых состояний. В [8] выделены все события, приводящие систему в особые состояния, и описана реакция на каждое из этих событий. Остальные системы более подробно рассмотрены в [7].

Таким образом, разработана структура системы моделирования, отвечающая всем вышеперечисленным требованиям и обеспечивающая возможность имитации процесса функционирования исследуемых комплексов со случайной длительностью выполнения работ.

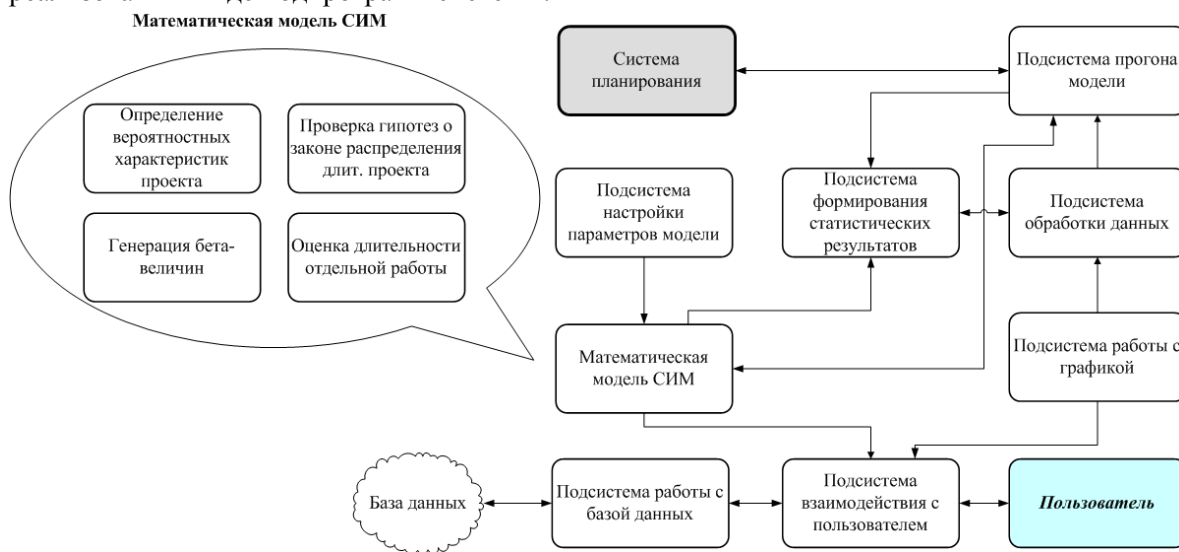


Рис. 1. Структура системы имитационного моделирования

### 3. Результаты работы системы

Рассмотрим процесс функционирования разработанной системы имитационного моделирования на следующем примере. Без ограничения общности, пусть заявка не требует использования ресурсов. Сама заявка задана следующим сетевым графиком (рис. 2).

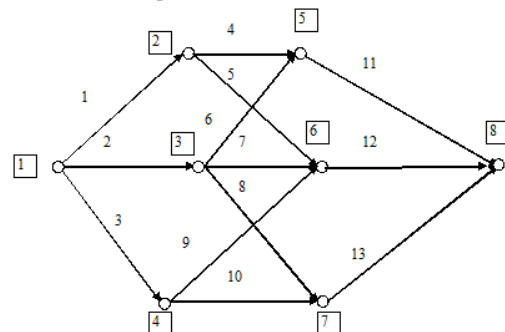


Рис. 2. Пример заявки в виде сетевого графика

На данном рисунке веса ребер обозначают идентификаторы работ.

Характеристики длительности работ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики длительности работ проекта

| № работы | min | max | Мат. ож. |
|----------|-----|-----|----------|
| 1        | 5   | 10  | 9        |
| 2        | 3   | 6   | 4        |
| 3        | 6   | 8   | 7        |
| 4        | 4   | 7   | 6        |
| 5        | 4   | 7   | 5        |
| 6        | 2   | 5   | 3        |
| 7        | 4   | 8   | 6        |
| 8        | 4   | 6   | 5        |
| 9        | 6   | 8   | 7        |
| 10       | 2   | 6   | 4        |
| 11       | 9   | 13  | 12       |
| 12       | 2   | 6   | 3        |
| 13       | 5   | 7   | 6        |

Проанализируем введенные значения, а потом сравним ожидаемые результаты с полученной выборкой. Рассчитаем временные характеристики работ (табл. 2).

Таблица 2

Временные характеристики работ

| № работы | Мат. ож. | Tip | Tip | R |
|----------|----------|-----|-----|---|
| 1        | 9        | 0   | 0   | 0 |
| 2        | 4        | 0   | 8   | 8 |

Продолжение табл. 2

|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
| 3  | 7  | 0  | 7  | 7  |
| 4  | 6  | 9  | 9  | 0  |
| 5  | 5  | 9  | 15 | 6  |
| 6  | 3  | 4  | 12 | 8  |
| 7  | 6  | 4  | 18 | 14 |
| 8  | 5  | 4  | 16 | 12 |
| 9  | 7  | 7  | 17 | 10 |
| 10 | 4  | 7  | 17 | 10 |
| 11 | 12 | 15 | 15 | 0  |
| 12 | 3  | 14 | 24 | 10 |
| 13 | 6  | 11 | 20 | 10 |

Критическое время составляет 27 единиц. Из рассчитанных значений видно, что у проекта один ярко выраженный критический путь.

Зададим в качестве числа прогонов 10000 и запустим модель с помощью подменю «Прогон». После завершения процесса моделирования пользователю открывается форма с результатами.

На первой вкладке приведены выборочные значения случайной величины, описывающей длительность проекта. Как можно видеть из табл. 2, расчетное время ожидаемой длительности проекта совпадает со временем, полученным в результате моделирования (27.0030). Однако асимметрия  $-0.58$  говорит о возможном несоответствии случайной величины, описывающей длительность проекта, нормальному закону распределения. Проанализируем полученную гистограмму этой величины (рис. 3).

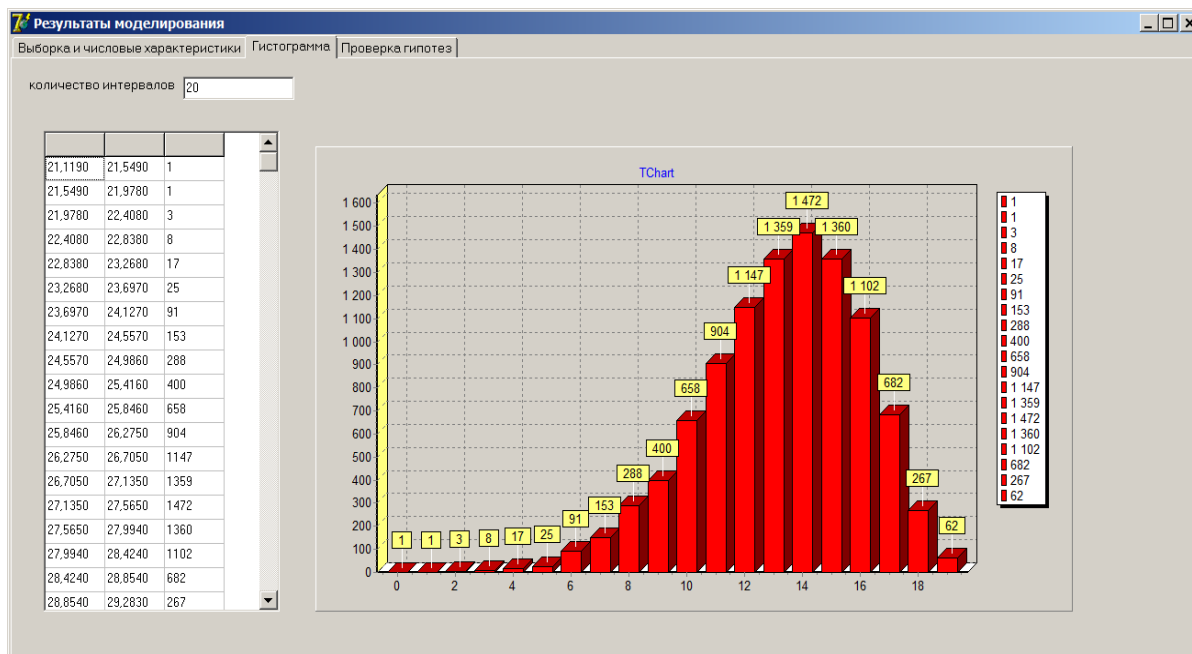


Рис. 3. Гистограмма проекта



Как можно видеть из гистограммы, длительность обладает весьма выраженной асимметрией. Все это свидетельствует о целесообразности использования разработанной системы, поскольку существующие методы предлагают оценивать исследуемую случайную величину нормальным (т.е. симметричным) распределением [2].

### Выводы

Целью работы являлась реализация системы, позволяющей осуществлять моделирование процесса функционирования многостадийных обслуживающих комплексов со случайной длительностью выполнения отдельных работ. В результате можно сделать следующие выводы:

1. Анализ специфики функционирования исследуемого комплекса позволил сформулировать требования, предъявляемые к системе имитационного моделирования.
2. Анализ существующих систем имитационного моделирования с точки зрения предъявляемых требований обусловил необходимость собственной разработки программного продукта.
3. На основании предъявляемых требований, а также с учетом специфики исследуемых комплексов была разработана структура системы имитационного моделирования.

4. Представленный пример работы системы, а также другие результаты ее функционирования подтверждают целесообразность ее разработки.

### Литература

1. Бурков В.Н. Теория активных систем: Состояние и перспективы / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. – М.: Синтег, 1999. – 128 с.
2. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические сетевые модели планирования и управления разработками: монография / Д.И. Голенко-Гинзбург. – Воронеж: «Научная книга», 2010. – 284 с.
3. Олейникова С.А. Критический анализ метода PERT решения задачи управления проектами со случайной длительностью выполнения работ / С.А. Олейникова // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – № 1(51). – С. 20-24.
4. Сирота А.А. Компьютерное моделирование сложных систем / А.А. Сирота. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2006. – 248 с.
5. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 275 с.
6. Аверилл М.Л. Имитационное моделирование / М.Л. Аверилл, В.Д. Кельтон. – СПб.: Питер, 2004. – 846 с.
7. Олейникова С.А. Математические модели и методы оптимизации функционирования сложных обслуживающих систем со стохастическими параметрами: дис. ... д-р техн. наук. – Воронеж, 2016. – 364 с.
8. Олейникова С.А. Реализация процесса имитации выполнения проектов со случайной длительностью отдельных работ / С.А. Олейникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 4. – С. 51-55.

Воронежский государственный технический университет

## SPECIALIZED SIMULATION SYSTEM FOR IMITATION OF FUNCTIONING OF MULTISTAGE SERVICE COMPLEXES

S.A. Oleynikova

Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

One of the key tasks in analyzing the functioning of multi-stage service complexes is evaluation of the execution time of an application. The mutual dependence between operations, as well as the stochastic nature of their duration, does not allow to guarantee the necessary accuracy in obtaining the corresponding estimates of the desired random variable. Simulation of the service process will allow not only to estimate the numerical characteristics of such a value, but also to gather detailed information about its distribution law, to calculate the risks of service delays and to solve a number of other necessary tasks. The study of the specifics of the problem solved made it possible to put forward a number of requirements for a system designed for modeling multi-stage maintenance. Analysis of existing simulation systems, Anylogic in particular, necessitated development of our own such system. Taking into account the specifics of the functioning of the complexes under investigation, and also on the basis of the requirements for the system, the system's structure was developed and the assignments of the main subsystems were determined.

Thus, a simulation system designed to simulate the process of functioning of multi-stage service complexes, providing the ability to collect and analyze statistical data on a random variable describing the duration of the project

Key words: simulation system, multi-stage service complex, distribution law, numeric characteristics

### References

1. Burkov V.N., Novikov D.A. "Theory of active systems: State and prospects" ("Teoriya aktivnykh sistem: Sostoyanie i perspektivy"), Moscow, Sinteg, 1999, 128 p.
2. Golenko-Ginzburg D.I. "Stochastic network models for planning and managing developments. Monography" ("Stokhasticheskie setevye modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami. Monografiya"), Voronezh, 2010, 284 p.
3. Oleynikova S.A. "Critical analysis of the PERT method for solving the project management task with a random duration of operation execution", Control Systems and Information Technology, 2013, no. 1(51), pp. 20-24.
4. Sirota A.A. "Computer modeling of complex systems" ("Komp'yuternoe modelirovanie slozhnykh sistem"), Voronezh, 2006, 248 p.
5. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. "Modeling of systems" ("Modelirovanie sistem"), Moscow, Vysshaya Shkola, 2001, 275 p.
6. Averill M.L., Kel'ton V.D. "Simulation modeling" ("Imitatsionnoe modelirovanie"), Saint-Petersburg, Piter, 2004, 846 p.
7. Oleynikova S.A. "Mathematical models and methods for optimizing the functioning of complex service systems with stochastic parameters. Dr. tech. sci. diss." ("Matematicheskie modeli i metody optimizatsii funktsionirovaniya slozhnykh obsluzhivaushchikh sistem so stokhasticheskimi parametrami. Diss. dokt. tekhn. nauk"), Voronezh State Technical University, Voronezh, 2016, 364 p.
8. Oleynikova S.A. "Implementation of imitation projects execution with a random duration of separate operations", The Bulletin of Voronezh State Technical University, 2015, vol.11, no 4, pp. 51-55.

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2017 Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев

В настоящее время искусственные нейронные сети являются важным расширением понятия вычисления. Нейронные сети или выпускаются в составе специализированных устройств, или достаточно дороги, а зачастую и то и другое. На их разработку тратится значительное время, за которое программные реализации на самых последних компьютерах оказываются лишь на порядок менее производительными, что делает использование нейропроцессоров нерентабельным. Функциональные возможности различных программных продуктов в разной степени обладают схожими возможностями, некоторые из них имеют большое количество инструментов, которые мало подходят для первоначального знакомства с нейронными сетями, а также имеют высокую стоимость.

В статье предложена модель библиотеки классов для конструирования нейронных сетей. Библиотека содержит классы, позволяющие производить создание, настройку, обучение и тестирование нейронных сетей. Модульная структура библиотеки позволяет разработчику вносить изменения с целью расширения функциональности, не опасаясь нарушения работы остальных модулей. Значительное внимание уделено описанию разработки программного обеспечения для конструирования нейронных сетей на основе данной библиотеки, приводится обзор существующих программных продуктов, обладающих схожей функциональностью

Ключевые слова: линейный нейрон, персептрон, многослойная нейронная сеть, алгоритм обратного распространения ошибки

### Введение

В результате бурного развития информационных технологий нейронные сети проникли практически во все сферы жизнедеятельности человека [1, 2, 3]. Однако работа с нейронными сетями требует большого количества вычислительных ресурсов, и по мере увеличения размерности сети растут и требования к вычислительной системе. Большое число корпораций работает над совершенствованием нейросетевых алгоритмов и созданием принципиально новых аппаратных комплексов. Так, например, для повышения вычислительных мощностей компьютеров часть нагрузки с центрального процессора переносится на графический ускоритель. Кроме того, современные графические адаптеры позволяют производить вычисления в параллельном режиме, что значительно увеличивает их эффективность [8].

В рамках данной работы создано программное обеспечение, которое позволяет создавать нейронные сети различных типов и размерности, производить их обучение, тестирование, получать необходимые результаты. Это дает возможность решать большое количество практических задач таких, как задачи регрессии, классификации, распознавания образов и др.

### Обзор современных программных средств создания и моделирования искусственных нейронных сетей

Программные продукты создания, обучения и тестирования нейронных сетей условно можно разделить на несколько типов:

- надстройки для пакетов прикладных вычислений;
- специализированные нейросетевые пакеты;
- универсальные нейросетевые пакеты.

Примерами являются [4]:

- StatisticaNeuralNetworks – набор расширений, входящих в состав пакета прикладных вычислений Statistica;
- MatlabNeuralNetwork – набор расширений, входящих в состав пакета прикладных вычислений Matlab;
- ExcelNeuralPackage – набор скриптов и библиотек для электронных таблиц Excel, реализующих некоторые возможности по реализации нейронных сетей.

Ко второму типу относятся программные продукты, решающие определенный, узкоспециализированный набор задач. К таким продуктам относятся:

- Глаз – программа, предназначенная для выполнения обработки аэрокосмической информации;
- NeuroshellTrader – программа, предназначенная для создания нейронных сетей и анализа рынков.

Универсальные программные пакеты имеют более специфическую направленность и функциональность, которые предназначены для работы с нейронными сетями [5].

---

Ганцева Екатерина Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: caladze@yandex.ru  
 Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvf@list.ru  
 Гребенникова Наталия Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: g-naty@yandex.ru  
 Болдырев Денис Сергеевич – ВГТУ, магистр, e-mail: denis\_boldyrev@hotmail.com

| № п/п | Название нейропакета | Достоинства                                                            | Недостатки                                              |
|-------|----------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1     | Neural10             | Является бесплатным                                                    | Позволяет создавать только один тип сети                |
| 2     | NeuroSolutions       | Поддерживает большое количество вариантов ввода и обработки информации | Высокая стоимость, отсутствие русскоязычного интерфейса |
| 3     | QwikNet32            |                                                                        | Реализует лишь один тип сети                            |
| 4     | MemBrain             | Бесплатен для образовательных целей, наличие мощного инструментария    | Отсутствие русскоязычного интерфейса и справки          |
| 5     | NeuroPro             | Имеет русскоязычный интерфейс и справку                                | Малоудобный интерфейс                                   |
| 6     | Deductor 5.2         | Бесплатная версия, русскоязычный интерфейс                             | Перегруженная функциональность                          |

Наиболее популярными программными продуктами являются: Neural10, NeuroSolutions, QwikNet32, MemBrain, NeuroPro, Deductor 5.2.

Проанализировав функциональные возможности различных программных продуктов, можно прийти к выводу, что все они в разной степени обладают схожими возможностями. Однако некоторые из них имеют большое количество инструментов, которые мало подходят для первоначального знакомства с нейронными сетями, а также имеют высокую стоимость. Другие же программные продукты слишком ограничены в наборе функций, например, позволяют реализовать сети лишь определенной структуры.

Таким образом, разработка современного программного продукта конструирования нейронных сетей, простого в освоении нейросетевых техник, с наглядным и понятным интерфейсом, свободно распространяемого и с открытым исходным кодом, является актуальной задачей [6].

#### **Функциональные требования к разрабатываемому конструктору нейронных сетей**

Конструктор нейронных сетей должен обладать следующими функциональными возможностями:

- создавать различные типы нейронных сетей (линейный нейрон, персептрон, многослойные сети прямого распространения);
- настройки параметров каждого слоя для многослойных сетей;
- настройки параметров обучения, поддержки классических нейросетевых моделей и алгоритмов обучения;
- сохранения параметров программы в файле настроек; загрузка параметров из файла;

- отображения результатов работы нейронной сети в удобном графическом виде;

- удобной работой с входными данными (пользователь должен иметь возможность загружать готовые входные данные из файла, либо записывать эти данные вручную);

- масштабирования данных с целью освобождения пользователя от дополнительной работы по подготовке входных или выходных данных;

- русскоязычный интерфейс пользователя должен отвечать принципу «usability», быть наглядным, а также интуитивно понятным, что позволит пользователю сосредоточить внимание на разработке и изучении нейронных сетей;

- тестировать нейронные сети;

- доступность, т.е. программное обеспечение должно быть в свободном доступе с открытым исходным кодом, что позволит привлечь большее количество пользователей и разработчиков.

Для разработки программного продукта конструирования нейронных сетей использована интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio 2017.

В качестве языка программирования использован объектно-ориентированный язык C#, предназначенный для разработки приложений для платформы Microsoft .NET Framework [7].

#### **Состав, структура и функции программного средства**

Созданная программа NeuralNetConstructor предназначена для построения нейронных сетей и предоставляет возможность решать задачи регрессии, классификации и распознавания образов.

На рис. 1 представлена Use case-диаграмма конструктора нейронных сетей, на которой приведены основные функции программного

обеспечения. Для его функционирования пользователю необходимо задать настройки, к которым относятся тип сети и ее конкретные параметры, а также подготовить входные данные. Входные данные могут быть загружены из файла или заданы пользователем вручную на этапе настройки параметров. В дальнейшем

процесс обучения полностью скрыт от пользователя. Выходными данными (результатом обучения) являются значения весовых коэффициентов. Эти данные можно сохранить в файл для дальнейшего использования в других проектах или для тестирования.

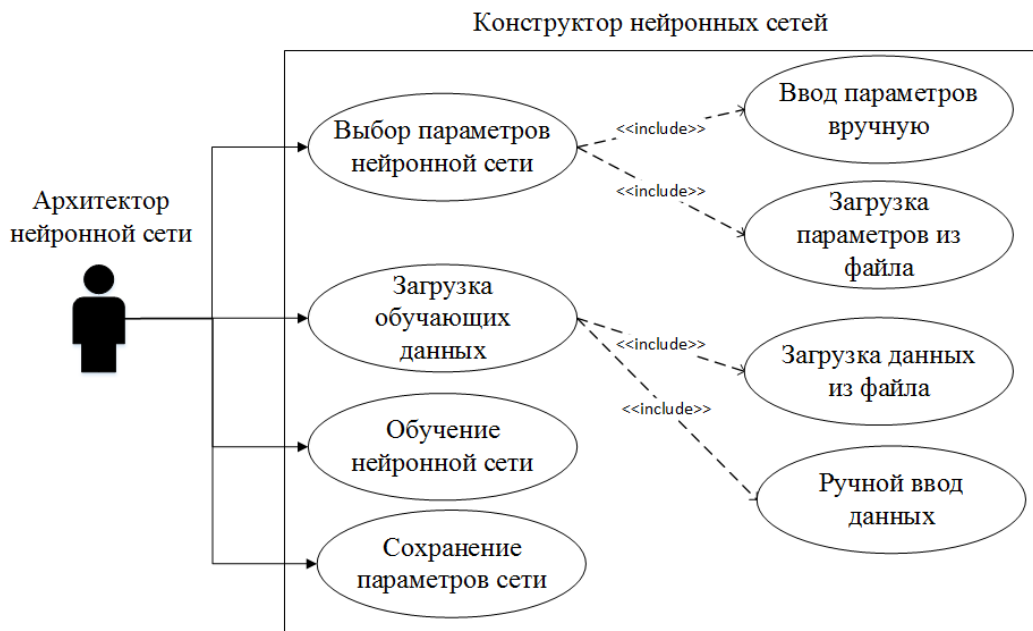


Рис. 1. Use case-диаграмма «Конструктора нейронных сетей»

На рис. 2 приведена модульная структура разработанного программного обеспечения.

Последовательность действий пользователя в приложении представлена на рис. 3. После ввода всех необходимых параметров происходит автоматическое создание нейронной сети. Скрывая от пользователя процесс создания сети, программа, обладая удобным интерфейсом, позволяет пользователю быстро приступить к работе с нейросетью и не тратить время на изучение документации и встроенного языка программирования. Кроме того, такой подход позволяет избежать пользователю ошибок, что значительно экономит время проектирования нейронных сетей.

Конструктор нейронных сетей предоставляет возможность задания параметров для каждого слоя многослойных сетей: число нейронов, тип активационной функции, диапазон изменения весовых коэффициентов, а также коэффициентов целевой функции. Кроме того, можно масштабировать входные и выходные данные, что позволяет пользователю создавать более гибкие модели сетей. Для нелинейного нейрона (персептрона) список параметров схож с многослойными сетями.



Рис. 2. Модульная структура приложения

При решении задач регрессии с помощью моделей многослойных сетей и персептрона предполагается, что имеется много входов и только один выход [9]. Для задач классифика-

ции и распознавания образов имеется много входов и много выходов.

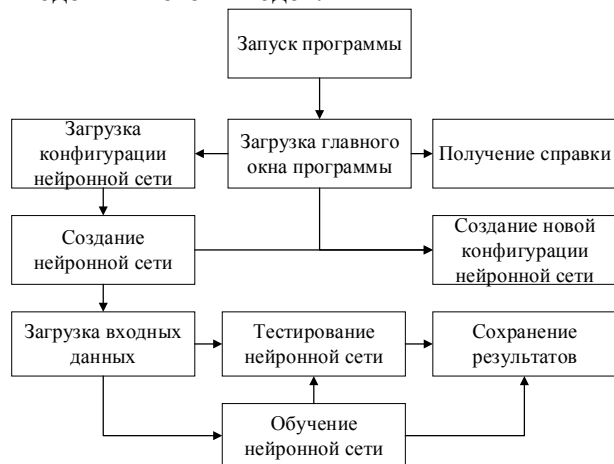


Рис. 3. Последовательность действий пользователя

Для линейного нейрона список параметров значительно уже, однако не стоит считать, что линейный нейрон имеет малые вычислительные способности.

Линейный нейрон позволяет решать задачи регрессии, однако в большинстве случаев он предназначен для фильтрации сигналов путем корректировки весовых коэффициентов с помощью минимизации среднеквадратической ошибки.

Для линейного нейрона можно задавать размер входа, скорость обучения и количество обучающих примеров. Так как на выходе отсутствует нелинейная активационная функция необязательно нормировать входные и выходные данные.

Помимо специализированных особенностей программы, которые влияют на качество работы алгоритмов, было реализовано множество функций, которые предназначены для комфортной работы пользователя [10].

Удобство работы пользователя обеспечивает возможность загрузки и ручного ввода данных, а также графическое представление результатов работы. Пользователь может в режиме реального времени наблюдать результат работы программы на графиках, что позволяет быстро принимать решение о работоспособности созданной модели.

Разработанная библиотека «Neuron.dll» содержит три основных класса: Layer, Perceptron, LinearNeuron.

Процесс создания линейного нейрона происходит в классе LinearNeuronForm. При этом, первым делом, при загрузке формы создается объект класса LinearNeuron из библиотеки «Neuron.dll». В качестве параметра конструктору передается число входов нейрона, затем вычисляется ошибка. Ошибка вычисляется как

разность между эталонным и текущим выходом сети. Далее ошибка передается в качестве параметра в метод, корректирующий весовые коэффициенты. Обучение является итеративным процессом, поэтому данная операция будет выполняться до тех пор, пока выход сети не будет удовлетворять заданной точности. Кроме выхода сети, на каждой итерации обучения вычисляется среднеквадратическая ошибка и текущая ошибка. Эти данные используются для построения графиков. Построение точек графиков происходит на каждой итерации обучения. После завершения обучения сформированный массив весовых коэффициентов сохраняется в классе AppSetting.

Для сохранения настроек конфигурации нейронной сети проводится сериализация класса AppSettings, в результате которой создается xml-файл на диске. Логично предположить, что для загрузки настроек необходимо произвести обратную операцию под названием десериализация. В общем смысле процесс проектирования нейросети для линейного и нелинейного нейрона является одинаковым. На рис. 4 можно видеть порядок действий при создании многослойных сетей.

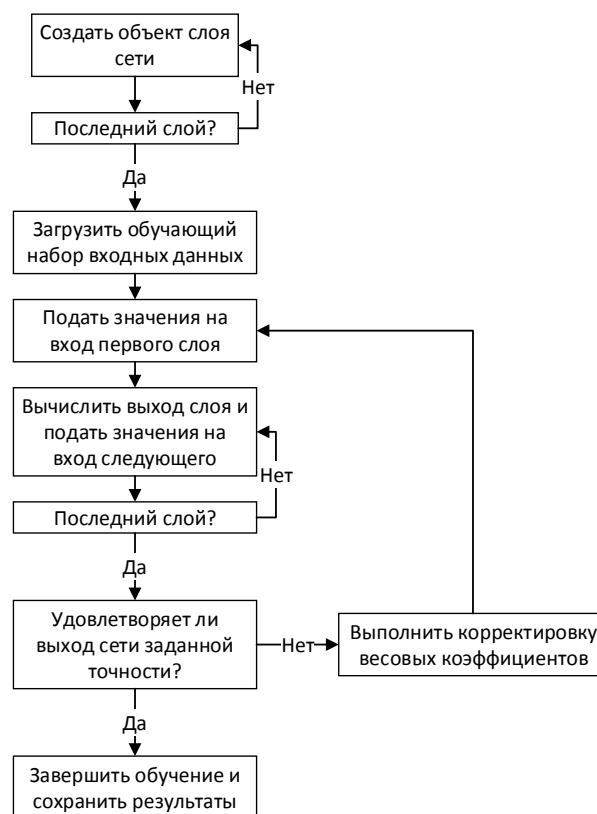


Рис. 4. Создание многослойной сети

Для тестирования уже обученной сети необходимо загрузить тестовые наборы данных, создать объект нейрона или многослойной

сети и подать данные на вход, используя уже настроенные весовые коэффициенты, находящиеся в классе AppSettings.

На рис. 5 представлен процесс тестирования обученной нейронной сети.



Рис. 5. Тестирование обученной сети

### Реализация интерфейсных возможностей программного средства

При запуске программы на экране пользователя появляется главная форма «Конструктор нейронных сетей», представленная на рис. 6.

На данной форме можно задать тип сети, установить параметры слоя для многослойных сетей, установить скорость обучения, число входных наборов и точность обучения.

После задания всех параметров необходимо выбрать действие «Создать» для создания нейросети. В зависимости от параметров, которые были указаны ранее, создаются различные по функциональности формы.

Для управления обучением линейного нейрона используется форма «Линейный нейрон», показанная на рис. 7. В рабочей области формы «Линейный нейрон» расположены две таблицы, в которые загружаются данные для обучения и тестирования.

The screenshot shows a software window titled 'Конструктор нейронных сетей' (Neural Network Constructor). It contains several sections for configuring a neural network:

- Тип нейронной сети** (Neural Network Type): A dropdown menu set to 'Многослойный персептрон' (Multilayer perceptron).
- Тип задачи** (Task Type): A dropdown menu set to 'Прогнозирование' (Forecasting).
- Число слоев** (Number of layers): A text input set to 3.
- Число входов** (Number of inputs): A text input set to 5.
- Параметры обучения** (Training Parameters):
  - Скорость обучения** (Learning rate): 0,54
  - Кол-во эпох** (Number of epochs): 30000
  - Точность обучения** (Training accuracy): 0,01
- Параметры слоя** (Layer Parameters):
  - Слой** (Layer): A dropdown menu set to 'Слой 1' (Layer 1).
  - Число нейронов** (Number of neurons): 2
  - Диапазон изменения начальных значений весовых коэффициентов** (Range of initial weight coefficient values): Two text inputs set to 0,1 and 0,3.
  - Функция активации** (Activation function): A dropdown menu set to 'Гиперболический тангенс' (Hyperbolic tangent).
  - Параметры функции активации** (Activation function parameters):
    - Крутизна сигмоиды** (Sigmoid slope): 0
    - Параметры гиперболического тангенса** (Hyperbolic tangent parameters): Two text inputs set to 1 and 1.

Buttons at the bottom include 'Задать' (Set), 'Применить' (Apply), 'Создать' (Create), and 'Выход' (Exit).

Рис. 6. Главная форма «Конструктор нейронных сетей»

Наличие возможности визуального доступа к данным позволяет изменять их в динамическом режиме. Здесь же на форме отображаются графики для визуального представления результатов работы процессов обучения и тестирования.

Ценным функциональным качеством программы является возможность обучения и тестирования многослойных сетей. Для настройки многослойных сетей используется форма, показанная на рис. 8.

На данной форме расположены идентичные элементы управления, за исключением элементов, которые позволяют установкой флажка сообщить программе о том, что необходимо произвести модификацию входных (выходных) данных – их масштабирование.

В отличие от нейронных сетей, предназначенных для решения задач регрессии, в которых, как правило, имеется много входов и один выход, в нейронных сетях задач классификации присутствует много входов и много выходов. Так как число выходов может быть очень большим, и отсутствует необходимость построения графиков для каждого выхода сети, было принято решение предоставить пользователю в качестве оценки обучения итоговый график «Оценка обучения сети», по которому он может судить о правильности хода этого процесса.

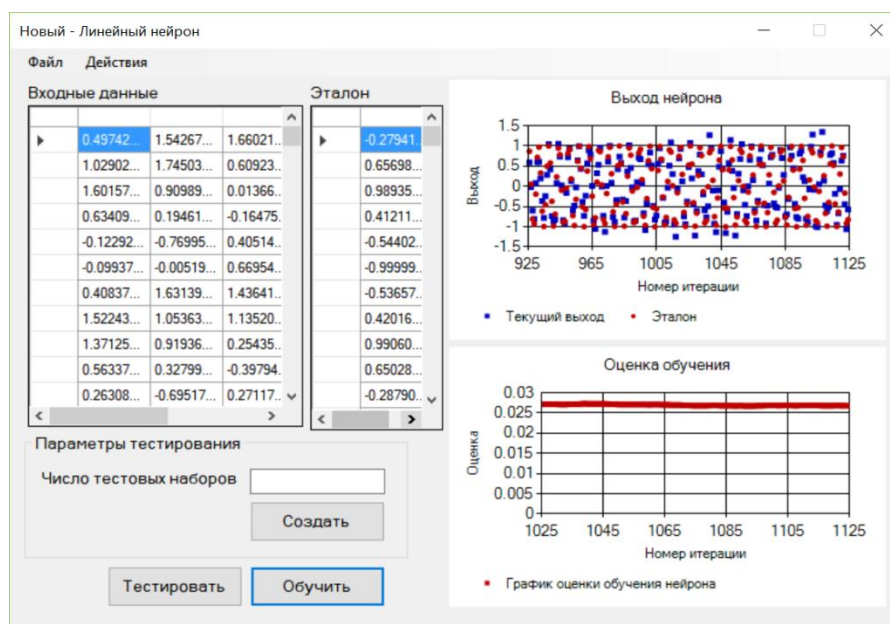


Рис. 7. Форма «Линейный нейрон»

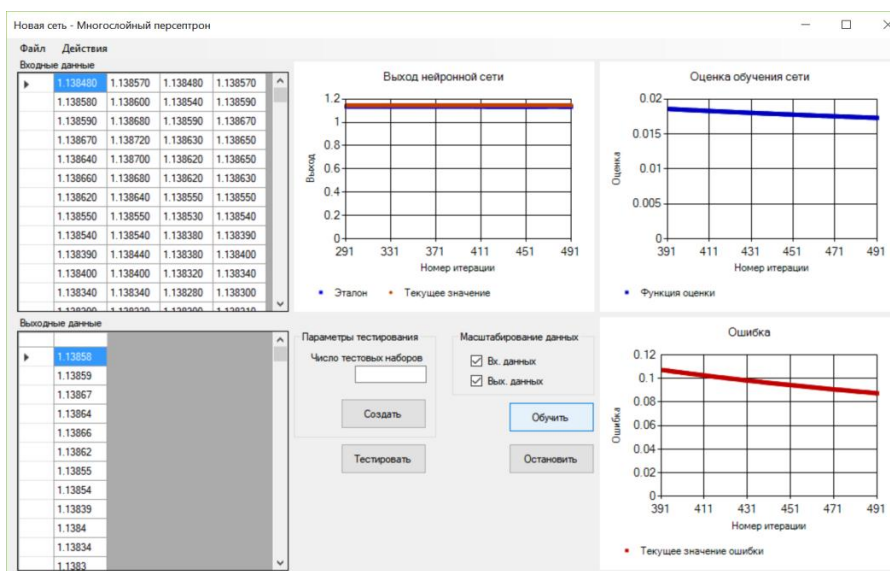


Рис. 8. Формы «Многослойный персептрон»

Разработанное приложение будет полезно как для тех, кто только начинает изучать нейронные сети, так и для тех, кому необходимо построение нейросетевой модели для обработки большого объема данных.

#### Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. - 2-е изд., испр.; пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. - 1104 с.
2. Калинин А.В. Технология нейросетевых распределённых вычислений: монография / А.В. Калинин, С.Л. Подвальный. - Воронеж: ВГТУ, - 2004. - 121с.
3. Калинин А.В. Методы решения плохо обусловленных систем линейных уравнений на основе распределённых нейросетевых вычислений / А.В. Калинин, С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2004. - № 3 (15).- С. 22-26.
4. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. - 2-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия-Телеком, 2002. - 382 с.
5. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект / Л.Н. Ясницкий. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 176 с.
6. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан; пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2001. - 287 с.
7. Троелсен Э. Язык программирования C# и платформа .NET 4.5 / Э. Троелсен; 6-е изд. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. - 1312 с.
8. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. к. т. н. В. Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 496 с.



9. Ясницкий Л.Н. Искусственный интеллект. Элективный курс: учеб. пособ. / Л.Н. Ясницкий. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с.

10. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учебное пособие по курсу «Микропроцессоры» / П.Г. Круг. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 176 с.

Воронежский государственный технический университет

## PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE NEURAL NETWORK DESIGNER

**E.A. Gantseva<sup>1</sup>, V.F. Barabanov<sup>2</sup>, N.I. Grebennikova<sup>3</sup>, D.S. Boldyrev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: caladze@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: bvf@list.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: g-naty@yandex.ru

<sup>4</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: denis\_boldyrev@hotmail.com

At present, artificial neural networks are an important extension of the concept of computation. Neural networks are either manufactured as part of specialized devices, or rather expensive, and often both. They demand a considerable amount of time to develop, while the software implementations on the latest computers are only an order of magnitude less productive, which makes the use of neuroprocessors unprofitable. The functionality of various software products have similar capabilities to varying degrees, some of them have a large number of tools that are not suitable for initial acquaintance with neural networks, and also have a high cost.

The article suggests a model of the class library for constructing neural networks. The library contains classes that allow to create, configure, train, and test neural networks. The modular structure of the library allows the developer to make changes in order to expand the functionality, without fear of disrupting the work of other modules. Considerable attention is paid to the description of software development for the construction of neural networks based on this library; the overview of existing software products with similar functionality is given

Key words: linear neuron, perceptron, multilayer neural network, back propagation error algorithm

## References

1. Haykin S. "Neural networks" Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2006, 1104 p.
2. Kalinin A.V., Podval'ny S.L. "The technology of neural network distributed computing: monograph" ("Tekhnologiya neyrosetevykh raspredelennykh vychisleniy: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2004, 121 p.
3. Kalinin A.V., Podval'ny S.L. "Methods for solving ill-conditioned systems of linear equations on the basis of distributed neural network calculations", Automation and Remote Control, 2004, no. 3 (15), pp. 22-26.
4. Kruglov V. V., Borisov V. V. "Artificial neural networks. Theory and Practice, 2nd ed., Stereotype" ("Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika, 2-e izd., stereotip"), Moscow, Hotline – Telecom (Goryachaya liniya – Telekom), 2002, 382 p.
5. Yasnitskiy L. N. "Introduction to the Artificial Intelligence" ("Vvedenie v iskusstvennyy intellekt"), Moscow, Akademiya, 2008, 176 p.
6. Callan R. "Neural networks", Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2001, 287 p.
7. Troelsen A. "C# and the .NET Platform", Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2013, 1312 p.
8. Medvedev V. S., Potemkin V. G. "Neural networks. MATLAB 6" ("Neyronnye seti. MATLAB 6"), Moscow, DIALOG-MIFI, 2002, 496 p.
9. Yasnitskiy L. N. "Artificial Intelligence. Elective course. Textbook" ("Iskusstvennyy intellekt. Elektivnyy kurs: ucheb. posob."), Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2011, 240 p.
10. Kруг P. G. "Neural networks and neurocomputers: A manual on the course "Microprocessors"" ("Neyronnye seti i neyrokompyutery: Uchebnoe posobie po kursu «Mikroprotsessory»"), Moscow, MEI, 2002, 176 p.

## **РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ АДАПТАЦИИ ФРАКТАЛА КАНТОРА**

© 2017 М.А. Цуканов, О.А. Божкова

В статье рассматриваются вопросы технологической координации и оперативного управления сложными производственными системами. В рамках оперативного управления производством были выделены подзадачи диспетчеризации производства, мониторинга нарушения плана в виду возникновения недетерминированных событий (простоев, поломок), требующих создания корректирующих действий относительно запланированного состояния технологического процесса. Приведены примеры таких производств, описана система взаимосвязей и её основные характеристики, представлена декомпозиция выполнения производственного плана на примере металлургического производства. Сталеплавильное производство отличается сложной системой связей, представляющей трудности для планирования технологического процесса. В статье описана декомпозиция мониторинга производственного плана, отдельно выделен этап оценки производственных издержек выполненного расписания. Авторы выделяют ряд ограничений, которые затрудняют задачу составления расписания сложных производственных систем и предлагают использование фрактализации в процессе построения и корректировки производственного расписания. В качестве механизма построения расписания предлагается адаптация алгоритма построения пыли Кантора. Предлагаемый алгоритм формирования и корректировки производственного расписания позволяет компенсировать влияние недетерминированных событий на ход производственного процесса в режиме диспетчеризации. Реализация алгоритма позволит сократить непроизводственные издержки энергозатрат в ходе получения продукции, а также упростит работу диспетчера в процессе принятия решений в различных ситуациях

Ключевые слова: оперативное управление, производственное расписание, технологическая координация, фрактал Кантора

### **Введение**

В настоящее время вопросы планирования являются востребованными для каждого предприятия. От эффективного планирования и согласованности производственных заданий зависит качество продукции и конкурентоспособность предприятия на рынке. Для разработки производственных программ используют инструмент оперативного управления, который позволяет решать такие вопросы, как контроль хода технологического процесса и выявление отклонений от принятого плана, регулирование хода производства для минимизации последствий в результате произошедших незапланированных событий. Как правило, на предприятиях оперативное управление производством выполняется на основе годового или квартального плана изготовления продукции.

### **Проблемы оперативного управления в производственном секторе**

Существенно усложняются задачи оперативного управления для производств,

которые реализуют широкую номенклатуру выпускаемой продукции, многообразие оборудования, многостадийность технологических процессов, многовариантность технологических маршрутов, что приводит к сложным перекрестным материально-транспортным связям.

Примерами сложных производственных систем могут являться предприятия различных отраслей: пищевого, фармацевтического, химического, металлургического, в частности Оскольский электрометаллургический комбинат, Магнитогорский металлургический комбинат, Новокузнецкий металлургический комбинат, Белорусский металлургический завод.

При производстве продукция проходит несколько технологических этапов на различных агрегатах, подвергаясь внешним воздействиям и обработкам.

Мониторинг выполнения расписания в темпе производства решается с использованием аппарата диспетчеризации.

Вопросы диспетчеризации в сложных производственных системах рассматриваются в работах различных авторов как в России [1, 2], так и за рубежом [6, 7].

Для диспетчеризации используются подходы на основе имитационного

---

Цуканов Михаил Александрович – СТИ НИТУ «МИСиС», канд. техн. наук, доцент, e-mail: tsukanov\_m\_a@mail.ru  
Божкова Олеся Александровна – СТИ НИТУ «МИСиС», магистрант, e-mail: lesyabozhkova@yandex.ru

моделирования теории графов и семантических сетей.

Использование сетей Петри позволяет получить информацию о том, как поведет себя динамическая система, рассматриваемая при моделировании. С помощью теории графов возможно представление любой производственной структуры в виде геометрической схемы, которая представляет собой систему технологических линий, связывающих участвующие в производственном процессе технологические агрегаты. Применение семантических сетей позволяет представить знания о рассматриваемом производстве на основе отношений между технологическими маршрутами, номенклатурой производства и реализующим их оборудованием. Важно отметить, что, несмотря на достоинства данных методов, ни один из них не позволяет учесть незапланированные, иначе говоря, недетерминированные производственные события, например, поломки и простои, которые могут произойти в любой момент времени вне зависимости от применяемого алгоритма или математического метода.

Рассмотрим процесс диспетчеризации металлургического производства (рис. 1). Выполнение производственного плана включает в себя следующие этапы. Поступление перечня заданий на выплавку металлопродукции и составление плана производства, на его основе далее происходит составление расписания, которое включает в себя маршрут подготовки заданной марки стали и перечень технологических агрегатов с указанным временем обработки, т.е. список работ по выплавке сортамента стали.

При ходе реального процесса выполнения задания могут произойти поломки оборудования, которые приводят к непредвиденным производственным простоям.

В данной ситуации необходимо произвести корректировку расписания. При реализации структурной или параметрической корректировки расписание продолжает своё выполнение вновь до наступления недетерминированного события. Если расписание успешно выполнено, предлагается оценить производственные издержки, к которым относят расход электроэнергии, время переналадки оборудования, затраты на разогрев стали, а также непредвиденные простои.

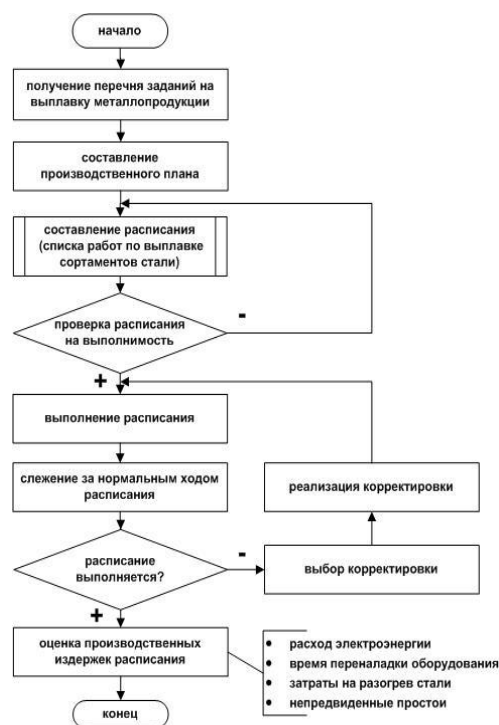


Рис. 1. Декомпозиция мониторинга производственного плана

### Признаки детерминированности в производственных схемах

Рассмотренные ранее примеры производств характеризуются наличием периодического процесса с повторяющейся траекторией. Кроме того, ни один технологический процесс не является линейным, устойчивым и полностью контролируемым и защищенным от случайных событий. Такие системы характеризуются свойствами детерминированного хаоса. Для эффективного оперативного управления таким комплексом необходим алгоритм, который позволит отслеживать связь технологических агрегатов в рамках производственного процесса, преодолевать его нелинейность, неустойчивость и непредсказуемость поведения (зависимость от начальных условий) системы в реалиях диспетчеризации.

Рассмотрим металлургическое производство как сложную систему взаимосвязей производственных мощностей предприятия, которая представляет трудности для процесса планирования производства.

На производстве имеется целый ряд ограничений, которые могут повлиять на выполнение составленного расписания, поэтому необходимо произвести проверку расписания на возможность его выполнения.

Эти факторы подробно описывает в своей работе М.А. Цуканов [3]:

- фактическое время обслуживания заказа с учетом простоя и переналадки от нормативного

$$A = D_{\phi_k} - D_{N_L}, \quad (1)$$

где  $D_{N_L}$  - нормативное время обработки заказа на  $l$ -м агрегате согласно технологической инструкции,  $D_{\phi_k}$  - фактическая длительность технологической операции;

- время простоя оборудования по каждому виду оборудования

$$\theta_{Lk} \leq D_{cm}, \quad (2)$$

где  $D_{cm}$  - максимально допустимое время простоя, регламентируемое производственным процессом,  $\theta_{Lk} \leq D_{cm}$  - простой технологического агрегата;

- продолжительность смены

$$\sum_L^{L_{cm}} \sum_k^{K_{cm}} D_{\phi lk} \leq D_{cm}, \quad (3)$$

где  $D_{cm}$  - продолжительность смены,  $L_{cm}$  - количество задействованных в текущую смену групп агрегатов,  $K_{cm}$  - количество задействованных в текущую смену однотипных агрегатов;

- энергозатраты

$$\omega_{A_{Lk}} \leq \Omega_L, \quad (4)$$

где  $\omega_{A_{Lk}}$  - текущая энергоемкость технологической установки  $A_{Lk}$ ,  $\Omega_L$  - предельная норма энергозатрат для технологического агрегата  $l$ -й группы [3].

### Использование фрактализации в построении и корректировке производственного расписания

Для компенсации случайных событий в производственном расписании авторами предлагается применить подход, основанный на применении фрактализации. Фрактал представляет собой структуру, которая обладает свойством самоподобия, при котором каждая малая часть повторяет более крупную [5]. Были проанализированы различные виды фракталов: алгебраические, геометрические и стохастические. В качестве основы для построения расписания авторами выбрана пыль Кантора, поскольку именно этот вид фракталов позволяет производить

формализацию задачи планирования. В качестве примера рассматривается возможность адаптации к задаче составления расписания сталеплавильного цеха на примере ЭСПЦ АО «ОЭМК».

В условиях приведенного производства реализуется широкая номенклатура марок стали (более 100), выплавляемая по четырем технологическим маршрутам, последовательно выполняющих технологические операции на производственных агрегатах цеха: ДСП-УПА-МНЛЗ, ДСП-УПА-АКОС-МНЛЗ, ДСП-АКОС-УЦВС-МНЛЗ; ДСП-УЦВС-АКОС-МНЛЗ. В состав электросталеплавильного цеха входят четыре дуговые сталеплавильные печи (ДСП), две установки продувки аргоном (УПА), три установки циркуляционного вакуумирования стали (УЦВС), три агрегата комплексной обработки стали (АКОС), пять машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), пять стенов разогрева сталь-ковшей (СРСК) и четыре разливочных крана.

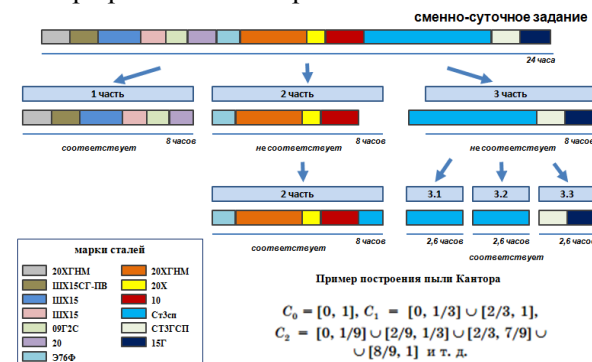


Рис. 2. Расписание сталеплавильного производства на основе фрактала Кантора

На рис. 2 иллюстрируется процесс декомпозиции сменно-суточного задания с использованием принципов пыли Кантора. Согласно правилу составления фракталов Кантора, все заказы разбиваются на три группы. Каждая такая группа содержит 1/3 часть всех заказов смены. На следующем этапе проверяется общая длительность всех трех разбиений на соответствие времени сменно-суточного интервала. Если время работы превышает сменно-суточную норму, то необходимо детализировать каждый из рассматриваемых интервалов еще на три части и повторить процедуру проверки до тех пор, пока не будет построен оптимальный фрактал.

В рамках решаемой задачи авторами разработан алгоритм формирования и корректировки расписания, представленный на рис. 3. Он позволяет реализовать принцип

компенсирования элементов детерминированного хаоса в системе производства в процессе оперативного управления.

На первом этапе алгоритм предлагает выборку из системы перечня заданий на смену. Каждому конкретному заказу соответствует определенный технологический маршрут с указанным временем начала и окончания всех технологических операций.

Далее проверяется ограничение простоев. В реальных условиях возможны несоответствия, которые влияют на ход производства и выполнения плана, в частности на простои. Это поломки оборудования, брак, нарушения состава исходных компонентов, нормального протекания технологических процессов, аварии технологических и подъемно-транспортных агрегатов, срывы в поставке сырья, сбои в подаче электроэнергии и энергоносителей, авторитарные решения руководства.

Для максимального использования оборудования необходимо, чтобы размерность фрактала  $d_i \rightarrow 1$ . Однако на практике такое соотношение редко наблюдается. С учетом принципов фрактального моделирования и эргономики необходимо определить компромисс, так называемое «золотое сечение», путем экспериментальных методов. Размерность  $d$  является критерием оптимальности системы. Для того, чтобы обеспечить максимальную серийность на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ), между разливкой на МНЛЗ одна марка стали должна выполняться непрерывно. Серийность разливки металла – один из факторов, влияющих на показатели расхода металлошихты, огнеупорных материалов и стабильность производства в целом. Поэтому в рамках программ повышения операционной эффективности ведется работа по увеличению серийности плавки.

При значительных отклонениях в ходе производственного процесса требуется вносить коррективы в поведение системы в целом и отдельных её элементов. Для этого производится корректировка плана. В зависимости от степени рассогласованности хода производства может понадобиться параметрическая, структурно-параметрическая или полная корректировка расписания. Параметрическая коррекция подразумевает частичную перестройку расписания, т.е. изменение производственного расписания по

времени выполнения отдельных технологических операций. При структурно-параметрической корректировке происходит изменение структуры и полная перестройка производственного расписания, т.е. его формирование вновь.

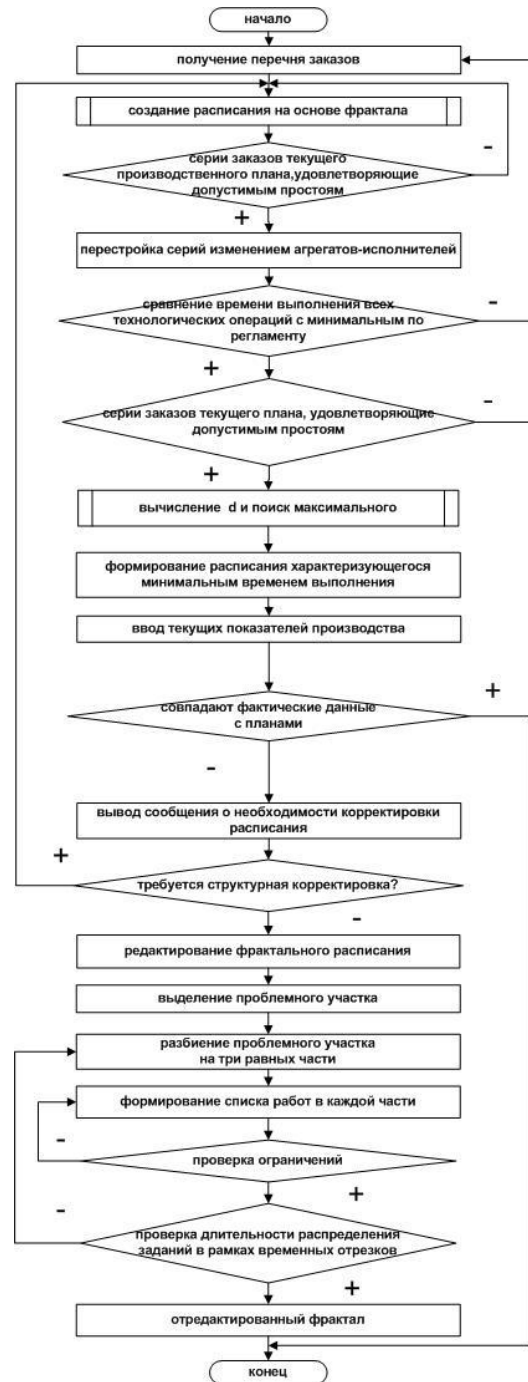


Рис. 3. Алгоритм формирования и корректировки производственного расписания

Причинами таких корректировок могут служить внеплановые заказы, нарушение технологии, отключение подачи электроэнергии и другие, в том числе

субъективные причины. Результаты проверки реализуемости расписания выводятся в виде сообщения о необходимости корректировки расписания.

Если не требуется структурная корректировка, то на следующем этапе происходит частичное редактирование фрактального расписания. Для этого выделяется проблемный участок и разбивается на три равных части. В каждой из них формируется список работ. Затем каждая часть проверяется на соответствие длительности распределения заданий и ограничения. К таким ограничениям относят отклонение фактического времени выполнения операции с учетом текущей производственной ситуации на конкретном этапе обслуживания заказа от нормативного. Стоит отметить, что причиной нарастающей рассогласованности планового расписания и фактического графика работы производства может быть переназначение номенклатуры производимой продукции, отклонение фактических производственных показателей от заданных, изменение состава и параметров плановых простоев оборудования с учетом текущего состояния организационно-технологической системы, изменение ограничений материально-технического характера, изменение ритмичности поставки материалов и отгрузки готовой продукции, изменение состава оборудования [4].

В результате выполнения алгоритма получаем отредактированный фрактал, который представляет собой расписание с учетом удовлетворения всех ограничений в текущей производственной ситуации.

#### **Оценка эффективности алгоритма формирования и корректировки производственного расписания на основе фрактала Кантора**

Применение разработанного алгоритма сделает возможным сокращение удельного расхода электроэнергии. Алгоритм формирования и корректировки производственного расписания сталеплавильного цеха позволит скорректировать уже существующий график с целью сокращения штрафов за опоздание с выплавкой стали и минимизации потерь. Например, система с реализованным алгоритмом предложит учесть некоторые

заказы как сверхсложные и выполнить их в первую очередь, перестроив расписание.

Алгоритм будет предлагать наиболее рациональные варианты корректировки расписания диспетчеру, подсказывая, как поступить в той или иной критической ситуации.

#### **Заключение**

Представленный алгоритм создания и корректировки расписания на основе фрактала Кантора позволит решить подзадачу диспетчеризации производства и создания корректирующих действий относительно запланированного состояния. Эффектом от предлагаемой разработки станет сокращение временных издержек при корректировке на построение нового производственного расписания.

#### **Литература**

1. Медведев С.Н. Разработка автоматизированной системы для решения задач планирования и диспетчеризации производства на основе мультиагентного моделирования / С.Н. Медведев, К.А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 6. – С. 163.
2. Тебеньков Е.С. Система оперативной диспетчеризации производств / Е.С. Тебеньков, А.Л. Гольдштейн // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2010. – № 4. – С. 169-172.
3. Цуканов М.А. Технологическая координация и управление сложноструктурированными производствами на основе мультиагентных технологий : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Цуканов М.А.- Старый Оскол, 2012.- 169 с.: ил.
4. Цуканов М.А. Построение и корректировка производственного расписания на основе фрактала Кантора / М.А. Цуканов, О.А. Божкова // Современные сложные системы управления [Текст] : НТКС'2017: материалы XII международной научно-практической конференции. – Издательство Липецкого государственного технического университета, 2017. – Ч. 1. – С. 283-287.
5. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
6. Vlasov S.A. Simulation Models in Computer-Aided Design and Control Systems for Steel-Making Industry // IFAC Proceedings Volumes. Volume 20, Issue 8, August 1987, p. 417-422.
7. Wei-Hua Gui, Chun-Hua Yang, Xiao-Fang Chen, Ya-lin Wang. Modeling and Optimization Problems and Challenges Arising in Nonferrous Metallurgical Processes // IFAC Proceedings Volumes. Volume 15, Issue 7, August 1989, p. 135-139.

## DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE ALGORITHM DESIGN COMPILING SCHEDULE OF STEELMAKING BASED ON ADAPTATION OF THE FRACTAL CANTOR

**M.A. Tsukanov<sup>1</sup>, O.A. Bozhkova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Ugarov Stary Oskol Technological Institute National University of Science and Technology "MISiS", Stary Oskol, Russian Federation,  
e-mail: tsukanov\_m\_a@mail.ru

<sup>2</sup>MA, Ugarov Stary Oskol Technological Institute National University of Science and Technology "MISiS", Stary Oskol, Russian Federation,  
e-mail: lesyabozhkova@yandex.ru

The article deals with the issues of technological coordination and operational management of complex production systems. Within the operational management of production, sub-tasks of dispatching production, monitoring of plan violations were identified taking into account the occurrence of nondeterministic events (downtime, breakdowns) requiring corrective actions to be taken with respect to the planned state of the technological process. Examples of such productions are given, the system of interrelations and its main characteristics are described, decomposition of the production plan execution is shown on the example of metallurgical production. Steelmaking is characterized by a complex system of connections, which makes it difficult to plan the technological process. The article describes the decomposition of monitoring the production plan; the stage of assessing the production costs of the completed schedule is shown separately. The authors identify a number of limitations that make it difficult to compile a timetable for complex production systems and suggest to use fractalization in the process of constructing and adjusting the production schedule. As a mechanism for constructing the schedule, an adaptation of the Cantor dust algorithm is proposed. The proposed algorithm for the formation and adjustment of production schedules makes it possible to compensate for the influence of nondeterministic events on the course of the production process in dispatch mode. The implementation of the algorithm will reduce the non-production costs of energy consumption during the realization of products, as well as simplify the dispatcher's work in the decision-making process in various situations

Key words: operational control, manufacture schedule, technological coordination, Cantor fractal

### References

1. Medvedev S.N., Aksenov K. A. "Development of an automated system for solving the problems of planning and dispatching production on the basis of multiagent modeling", Modern problems of science and education, 2013, no. 6, pp. 163.
2. Teben'kov E.S., Goldstein A.L. "The system of operational dispatching of production", Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems, 2010, no. 4, pp. 169-172.
3. Tsukanov M.A. "Technological coordination and management of complex-structured manufactures on the basis of multi-agent technologies" ("Tekhnologicheskaya koordinatsiya i upravleniye slozhnostrukturirovannymi proizvodstvami na osnove mul'tiagentnykh tekhnologiy"), Dr. tech. sci. diss., Stary Oskol, 2012, 169 p.
4. Tsukanov M.A., Bozhkova O.A. "Construction and adjustment of the production schedule based on the Cantor fractal", Modern complex management systems : HTCS'2017 25-27.10.2017 in 2 parts. Part 1, Publisher of the Lipetsk State Technical University, 2017, pp. 283-287.
5. Feder E. "Fractals", Russ. ed., Moscow, Mir, 1991, 254 p.
6. Vlasov S.A. "Simulation Models in Computer-Aided Design and Control Systems for Steel-Making Industry", IFAC Proceedings Volumes, 1987, vol. 20, issue 8, pp. 417-422.
7. Wei-Hua Gui, Chun-Hua Yang, Xiao-Fang Chen, Ya-lin Wang. "Modeling and Optimization Problems and Challenges Arising in Nonferrous Metallurgical Processes", IFAC Proceedings Volumes, 1989, vol. 15, issue 7, pp. 135-139.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНСТРУКТОРА НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2017 Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев

В работе «Программная реализация конструктора нейронных сетей» описан разработанный современный программный продукт конструирования нейронных сетей, который прост в освоении, имеет наглядный и понятный интерфейс, является свободно распространяемым, с открытым исходным кодом. Созданное программное приложение позволяет пользователю освоить технологии построения нейронных сетей и решать широкий спектр практических задач, к которым, в частности, можно отнести задачи регрессии и классификации образов. В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований с использованием созданного программного приложения конструирования нейронных сетей, а также рекомендации по выбору параметров конструирования сети для повышения качества и скорости обучения нейронных сетей. В связи с тем, что обучение нейронных сетей является весьма долгим процессом и требует большого количества тестовых данных, был создан тестовый набор данных для модуля функции синуса объёмом 30000 отсчётов, и на этом примере продемонстрировано влияние различных настраиваемых параметров конструирования сети на скорость её обучения. Проведённые исследования позволили выработать рекомендации по выбору архитектуры и настройке значений параметров конструирования нейросети, которыми следует воспользоваться при работе с программным приложением «Конструктор нейронных сетей»

Ключевые слова: линейный нейрон, персептрон, многослойная сеть, обучение, тестирование

### Назначение и условия применения программы

Разработанное программное приложение «Конструктор нейронных сетей» предназначено для конструирования, решения практических задач и исследования различных типов многослойных нейронных сетей. В процессе разработки была построена библиотека классов Neuron.dll, основные классы которой содержат методы и свойства, обеспечивающие параллельное выполнение задач для увеличения скорости работы реализованных алгоритмов, что требует применения платформы .NET Framework, начиная с версии 4.5 [7].

Структура программного обеспечения «Конструктор нейронных сетей» представлена двумя модулями: исполняемым файлом «КонструкторНейросетей.exe» и библиотекой классов «Neuron.dll».

Ядром программы является библиотека классов «Neuron.dll», содержащая набор классов, необходимых для создания нейронных сетей, которые, в свою очередь, содержат необходимые для этого методы и свойства.

### Настройка параметров конструирования и создание новой сети

В главном окне программного приложения (рис. 1), помимо строки меню, расположена рабочая область для указания параметров настройки создаваемой сети.

Рис. 1. Главная форма «Конструктор нейронных сетей»

В процессе создания новой сети можно выделить следующие основные этапы:

- 1) выбор типа сети;
- 2) выбор типа решаемой задачи;
- 3) определение числа входов и слоёв для многослойной сети (для линейного и нелинейного нейрона задается только число входов);

Ганцева Екатерина Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: caladze@yandex.ru  
 Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvfv@list.ru  
 Гребенникова Наталия Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: g-naty@yandex.ru  
 Болдырев Денис Сергеевич – ВГТУ, магистр, e-mail: denis\_boldyrev@hotmail.com



4) ввод параметров каждого слоя для многослойной сети (для одного нейрона данный шаг необходимо пропустить);

5) ввод скорости обучения, размера обучающего множества и точности обучения.

После ввода всех необходимых данных выполняется решение задачи выбранного типа с отображением промежуточных и итоговых результатов в новой форме.

### **Создание одного нейрона**

Базовым элементом сети является линейный (нелинейный) нейрон, обладающий множеством входов и одним выходом и используемый в решении задач регрессии и классификации [1, 2, 3].

При построении нейронной сети в «Конструкторе» для создания линейного нейрона в рабочей области главной формы из раскрывающегося списка «Тип нейронной сети» необходимо выбрать значение «Линейный нейрон». Далее задаются число входов нейрона, скорость обучения – значение из интервала (0;1). Действия пользователя контролируются, например, если пользователь неверно указал значение параметра, появляется предупреждающее сообщение об ошибке. Задаваемое число эпох определяет размер обучающего множества. Точность обучения используется в критерии останова обучения, её значение меньше единицы и в идеале должно стремиться к нулю. Однако следует обоснованно задавать значение данного параметра, так как при указании высокой точности процесс обучения может занять довольно длительный период времени.

Для нелинейного нейрона (персептрона) можно выбрать функцию активации и настроить её параметры. Для этого следует воспользоваться раскрывающимся списком «Функция активации» полями ввода соответствующих функции параметров.

После того, как все параметры будут заданы, следует приступить к созданию сети (кнопка «Создать» или пункт меню Файл -> Создать). После создания сети на экране отображается новая форма визуализации процесса обучения. Для обучения сети следует подготовить входные данные, загружаемые из заранее заполненного файла, или же введенные пользователем вручную в таблицы «Входные данные» и «Эталон».

Загрузка данных из файла происходит при выполнении команды главного меню Действия -> Загрузить обучающий набор. Для загрузки эталонов необходимо выполнить Действия -> Загрузить набор эталонов. После загрузки

ки/ввода данных следует запустить процесс обучения (кнопка «Обучить»). Отслеживать процесс обучения пользователь может по графикам. На первом графике «Выход нейрона» пользователю демонстрируются реальный и желаемый выходы. На втором графике «Оценка обучения сети» приводятся значения целевого функционала, на который накладывается условие минимизации при обучении сети. На третьем графике «Ошибка» показана разница между текущим выходом и эталоном на текущей итерации. Внизу формы показывается счётчик времени обучения. Обучение заканчивается при достижении заданной точности.

Пользователь может вмешиваться в процесс обучения, принудительно остановив его, нажав на кнопку «Остановить». Результаты обучения можно сохранить в файле, выполнив команду Файл -> Сохранить.

После завершения обучения можно протестировать полученные результаты на тестовых наборах исходных данных, задав необходимое значение в поле «Число тестовых наборов» и выполнив тестирование (кнопка «Тестировать»). Результаты проведённого тестирования отображаются на экране в виде графиков.

Кроме того, для нелинейного нейрона предусмотрен ряд дополнительных возможностей, таких как масштабирование входных и выходных данных (флажок в пункте «Масштабирование данных»). В дальнейшем этот процесс полностью скрыт от пользователя, что помогает избежать ошибок.

### **Создание многослойной сети**

С помощью приложения «Конструктор нейронных сетей» можно создавать многослойные сети для решения двух типов задач: регрессии и классификации образов.

При создании сети для решения задач классификации образов необходимо указать тип сети «Многослойный персептрон» и тип задачи «Классификация образов». Для решения задач регрессии – тип задачи «Прогнозирование». Дальнейшая настройка параметров сети происходит одинаковым образом.

После указания типа нейронной сети и типа решаемой задачи следует задать число слоев и число входов, выполнить действия, нажав кнопку «Задать».

Далее задаются параметры для каждого слоя сети при выборе необходимого слоя из раскрывающегося списка. Имеется возможность задавать число нейронов, диапазон изменения начальных значений весовых коэффициентов, а также тип активационной функции.

Для некоторых активационных функций можно задавать коэффициенты, значения которых по умолчанию равны единице. Если какие-либо заданные значения некорректны, пользователь получит соответствующее сообщение об ошибке.

После задания параметров каждого слоя необходимо инициировать действие нажатием на кнопку «Применить».

Затем следует указать скорость обучения, число обучающих наборов, точность обучения, инициировать создание сети (кнопка «Создать»). В зависимости от типа решаемой задачи открывается специфичная новая форма, хотя обе формы схожи по внешнему виду.

Настройки сконструированной сети можно сохранить в файл или загрузить из сохраненного ранее файла, выполнив соответствующую команду меню «Файл». При открытии формы создается новая таблица для входных данных. Число столбцов таблицы равно числу входов, а число строк равно числу обучающих наборов данных. Для таблицы эталонов число столбцов равно числу нейронов в выходном слое. Пользователь может записать входные данные в таблицу вручную, а также загрузить наборы данных из файла.

Процесс обучения начинается (после нажатия на кнопку «Обучить») и длится до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность, или пока пользователь не примет решение прервать процесс, воспользовавшись кнопкой «Остановить». После завершения процесса обучения можно протестировать результат работы сети. Для этого необходимо загрузить обучающий набор входов и эталонов. В строке «Число тестовых наборов» необходимо указать число итераций и нажать на кнопку «Создать». Тестирование начинается после выполнения действия «Тестировать». Если результаты тестирования удовлетворительны, то пользователь может сохранить их в файл, команда Файл -> Сохранить.

#### **Общие рекомендации по настройке параметров конструктора нейронных сетей**

Обучение нейронных сетей является ресурсоёмким процессом, поэтому необходимо очень тщательно подходить к выбору архитектуры сети и настройки её параметров [8]. Кроме того, огромную роль играет аппаратное обеспечение компьютера, на котором выполняется приложение «Конструктор нейронных сетей». К примеру, на многоядерных процессорах обучение будет выполняться гораздо быстрее.

При настройке значений параметров сети первым делом необходимо правильно задать количество слоев и количество нейронов в них. Многослойная сеть является мощным вычислительным механизмом, поэтому для большинства задач требуется порядка десяти нейронов в каждом слое. Если создавать более 3 слоев сети, то это приведёт к существенному замедлению обучения. Для подобных сетей существуют более продвинутое методы глубинного обучения. Значение параметра скорости обучения берётся из интервала  $[0;1]$ . При высоких значениях параметра, например, 0.9, скорость обучения будет достаточно высокой, однако возрастает риск попасть в локальный минимум, и на данном этапе может произойти так называемый «паралич» сети, когда желаемая точность станет недостижимой. При слишком малых значениях скорости обучения будет существенно замедляться, поэтому рекомендуется начинать с высоких значений этого параметра и постепенно снижать его, если это будет действительно оправданно.

Более подробно следует описать выбор параметра – количества нейронов в слоях сети. Как было отмечено ранее, их число не должно быть слишком большим, так как это замедляет процесс обучения [4, 6]. Кроме того, может возникнуть «переобучение» сети, в результате которого происходит некорректная интерпретация выходного сигнала. Данная ситуация возможна в случае, если сеть будет обладать чрезмерно большими вычислительными ресурсами.

Так как для обучения сети необходимо последовательно подавать на вход обучающие данные и сравнивать реальный выход сети с его желаемым аналогом, необходимо соблюдать некоторые правила формирования обучающих данных. Во-первых, для лучшего обучения сети объём данных должен быть большим. Естественно, чем больше таких данных, тем лучших результатов можно добиться в процессе обучения. Во-вторых, следует учитывать, что значения выхода активационной функции, как правило, расположены на отрезке  $[0;1]$  или  $[-1;1]$ , поэтому необходимо подготовить корректные входные и выходные данные. Разработанное приложение выполняет масштабирование входных и выходных данных на основе Softmax-шкалирования.

#### **Результаты экспериментальных исследований**

Обучение нейронных сетей является трудоёмким процессом и требует большого коли-

чества исходных данных. Причём для решения конкретной задачи требуются специфические данные, что может кардинально влиять на выбор архитектуры сети и её параметров [9].

Для проведения вычислительного эксперимента был создан тестовый набор данных модуля функции синуса в количестве 30000 отсчетов, на котором исследовалось влияние

различных параметров настройки сети на скорость её обучения. Исследования проводились на сетях с тремя слоями, пятью входами и одним выходом. Значения весовых коэффициентов брались из отрезка [0.3; 0.5]. Значение параметра активационной функции полагалось равным 1. Результаты тестирования приведены в таблице.

| № п/п | Тип активационной функции                                         | Число нейронов в слое | Скорость обучения | Время обучения  | Среднеквадратическая ошибка | Текущая ошибка |
|-------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|
| 1     | Сигмоидальная – сигмоидальная – сигмоидальная                     | 5 - 5 - 1             | 0.9               | 6 мин. 51 сек.  | 0.017                       | 0.069          |
| 2     | Гиперболический тангенс – гиперболический тангенс – сигмоидальная | 5 - 5 - 1             | 0.9               | 7 мин. 59 сек.  | 0.064                       | 0.031          |
| 3     | Сигмоидальная – сигмоидальная – сигмоидальная                     | 5 - 5 - 1             | 0.1               | 7 мин. 37 сек.  | 0.062                       | 0.256          |
| 4     | Гиперболический тангенс – гиперболический тангенс – сигмоидальная | 5 - 5 - 1             | 0.1               | 6 мин. 57 сек.  | 0.117                       | 0.184          |
| 5     | Сигмоидальная – сигмоидальная – сигмоидальная                     | 50 - 50 - 1           | 0.9               | 12 мин. 2 сек.  | 0.231                       | 0.363          |
| 6     | Гиперболический тангенс – гиперболический тангенс – сигмоидальная | 50 - 50 - 1           | 0.9               | 11 мин. 44 сек. | 0.344                       | 0.363          |
| 7     | Сигмоидальная – сигмоидальная – сигмоидальная                     | 50 - 50 - 1           | 0.1               | 11 мин. 43 сек. | 0.457                       | 0.363          |
| 8     | Гиперболический тангенс – гиперболический тангенс – сигмоидальная | 50 - 50 - 1           | 0.1               | 16 мин. 19 сек. | 0.571                       | 0.363          |

На рис. 2 показан результат обучения первой нейронной сети, имеющей по 5 нейронов в скрытых слоях и сигмоидальную функцию активации. Во всех экспериментах скорость обучения полагалась равной 0.9. Этот параметр является безразмерным и влияет на величину шага корректировки значений весовых коэффициентов [1].

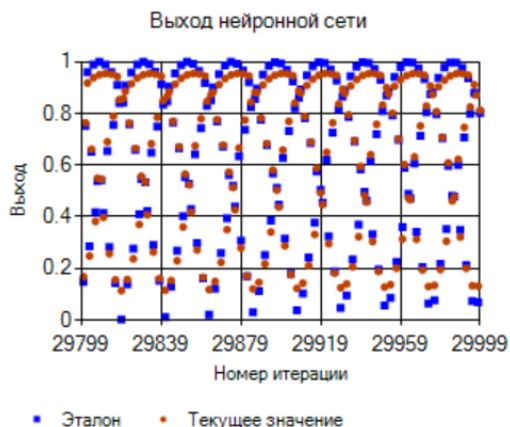


Рис. 2. Результат обучения нейронной сети № 1

Из рис. 2 видно, что значения выходов сети близко расположены к эталонным значениям. Для получения более точных значений потребуется либо изменить число нейронов и скорость обучения, либо повторить обучение на текущих примерах до получения значений выходов сети с заданной точностью.

На рис. 3 приведен результат обучения второй нейронной сети. В данном случае активационная функция для скрытых слоев изменена на гиперболический тангенс.

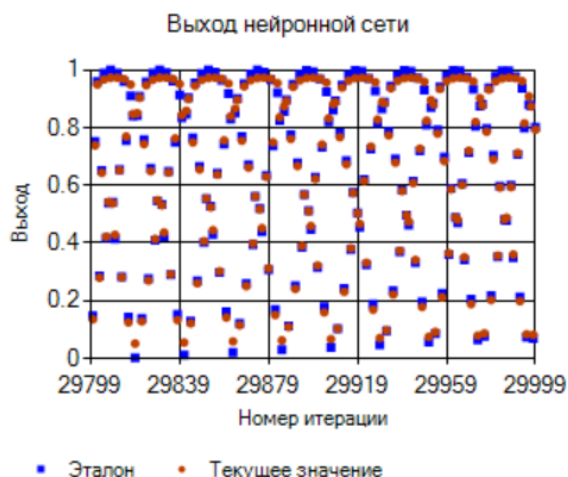


Рис. 3. Результат обучения нейронной сети № 2

Сравнив результаты, представленные на рис. 2 и рис. 3, видно, что для второй сети результаты обучения более точны. Если сравнивать значения целевой функции, то здесь во втором случае значение целевой функции будет больше, чем в первом, но при более высокой точности. Поэтому можно предположить, что во втором случае обучение идет медленнее, и это связано с вычислением значений гиперболического тангенса, более затратного по арифметическим операциям. Однако обучение происходит точнее.

На рис. 4 показан результат обучения третьей нейронной сети. В данном случае скорость обучения была снижена до значения 0.1. Активационной функцией для всех слоев выбрана сигмоидальная функция.

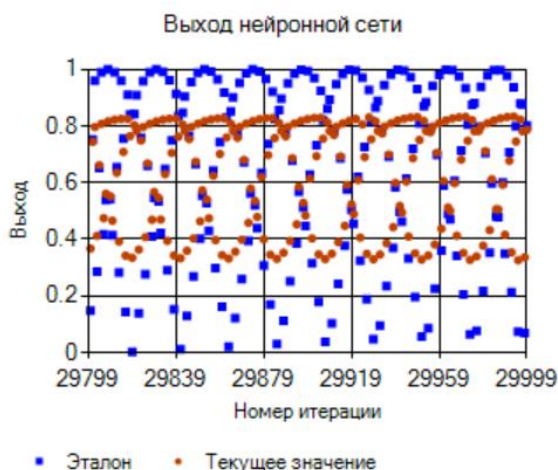


Рис. 4. Результат обучения нейронной сети № 3

На рис. 4 можно увидеть, что выходы сети имеют большую ошибку по отношению к целевым выходам, в отличие от второй нейросети. Можно сделать естественный вывод, что при уменьшении скорости обучения время обуче-

ния увеличивается. Но уменьшение скорости необходимо, например, в случае достижения целевой функции локального минимума. Преодолеть локальный минимум помогает снижение скорости обучения.

На рис. 5 приведён результат обучения четвертой нейронной сети, подобной предыдущей, с различием в типе активационной функции скрытых слоёв. В четвертой сети выбрана функция гиперболического тангенса в качестве активационной.

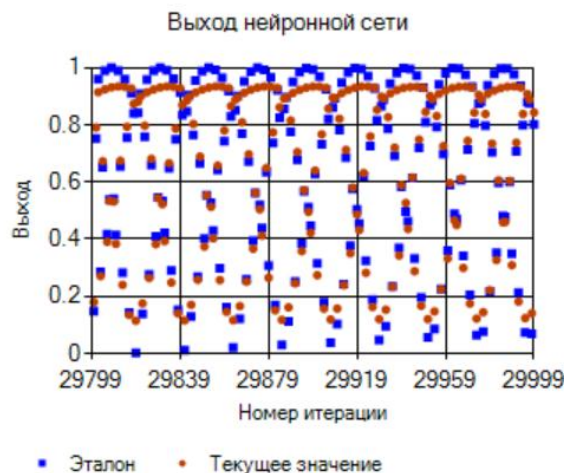


Рис. 5. Результат обучения нейронной сети № 4

Как и следовало ожидать, наличие разных типов активационных функций улучшает обучаемость сети. Однако для достижения требуемой точности при малых значениях скорости обучения требуется большее количество итераций обучения [10].

В следующих примерах число нейронов в скрытых слоях было увеличено до 50. Ошибка обучения для последующих опытов является одинаковой. Один из результатов обучения приведён на рис. 6.

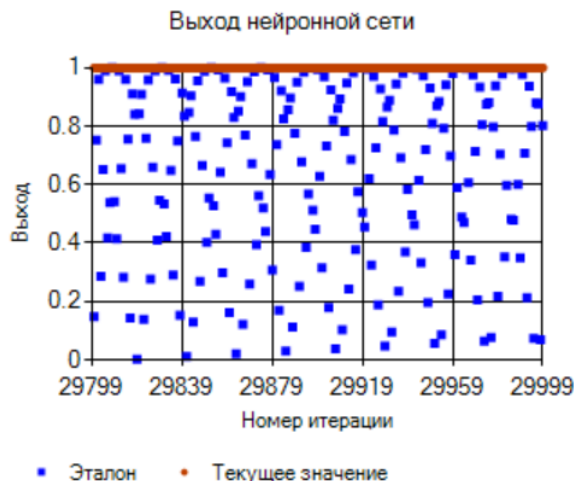


Рис. 6. Результат обучения нейронных сетей № 5 – 8

Рис. 6 показывает, что значение выхода сети близко к единице, что объясняется поступлением на вход нейрона значений, примерно равных единице. Увеличение числа нейронов заметно снижает скорость обучения. В данных примерах такое количество нейронов является избыточным. Высока вероятность, что сеть переобучится, если подавать ей обучающий набор до тех пор, пока не будет достигнута точность.

Проанализировав результаты, сведённые в таблицу, можно сделать вывод, что число нейронов в слоях заметно влияет на время обучения. Соответственно, чем больше нейронов, тем больше вычислительная мощность сети и тем большее время требуется на её обучение. Уменьшение значения скорости обучения также заметно увеличивает время обучения. Однако уменьшение значения этого параметра порой оправданно, так как оно позволяет обходить локальные минимумы целевой функции. Комбинирование различных типов активационных функций может улучшить качество обучения, не влияя на его скорость, в связи с тем, что каждая функция вносит больше возмущения и оказывает влияние на качество обучения.

Таким образом, при построении нейронных сетей следует очень аккуратно выбирать её архитектуру и настраивать параметры. В самом начале стоит задать небольшое количество нейронов и слоёв сети и достаточно высокую скорость обучения. Затем следует провести анализ изменения целевой функции. Если её значения уменьшаются с высокой скоростью, можно предположить, что архитектура выбрана правильно. Если же значения функции актива-

ции колеблются около некоторого значения и требуемая точность не достигнута, то рекомендуется либо увеличить число нейронов в слоях сети, либо уменьшить скорость обучения [1, 6].

Разработанное приложение позволит пользователю грамотно конструировать нейронные сети, настраивать их параметры и в итоге решать поставленные практические задачи.

#### Литература

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. - 2-е изд., испр.; пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. - 1104 с.
2. Калинин А.В. Технология нейросетевых распределённых вычислений: монография / А.В. Калинин, С.Л. Подвальный. - Воронеж: ВГТУ, 2004. - 121 с.
3. Калинин А.В. Методы решения плохо обусловленных систем линейных уравнений на основе распределённых нейросетевых вычислений / А.В. Калинин, С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2004. - № 3 (15). - С. 22-26.
4. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. - 2-е изд., стереотип. - М.: Горячая линия-Телеком, 2002. - 382 с.
5. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект / Л.Н. Ясницкий. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 176 с.
6. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. - пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2001. - 287 с.
7. Троелсен Э. Язык программирования C# и платформа .NET 4.5 / Э. Троелсен. - 6-е изд.; пер. с англ. - М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2013. - 1312 с.
8. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. - 496 с.
9. Ясницкий Л.Н. Искусственный интеллект. Электронный курс: учеб. пособие / Л.Н. Ясницкий. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 240 с.
10. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учебное пособие по курсу «Микропроцессоры» / П.Г. Круг. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - 176 с.

Воронежский государственный технический университет

## EXPERIMENT RESULTS ANALYSIS USING THE NEURAL NETWORKS DESIGNER

**E.A. Gantseva<sup>1</sup>, V.F. Barabanov<sup>2</sup>, N.I. Grebennikova<sup>3</sup>, D.S. Boldyrev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: caladze@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: bvf@list.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: g-naty@yandex.ru

<sup>4</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: denis\_boldyrev@hotmail.com

In the work "Software implementation of the neural network designer", a developed modern software product for neural network design is described, which is easy to learn, has a clear and intuitive interface, is freely distributed, open source. The created software application allows the user to master the technologies for building neural networks and solve a wide range of practical problems, which include, in particular, the problems of regression and classification of images. The article presents the results of experimental studies using the created software application for neural networks design, as well as recommendations on the choice of network design parameters for improving the quality and speed of training neural networks. Due to the fact that training neural networks is a very long process and requires a large amount of test data, a test set of data for a sine function module with a volume of 30,000 readings was created, and this example demonstrates the effect of various configurable parameters of the network design on the speed of its training. The conducted researches made it possible to develop recommendations on the choice of architecture and adjustment of the values of the neural network design parameters, which should be used when working with the "Neural Networks Designer" software application

Key words: linear neuron, perceptron, multilayer networks, training, testing

## References

1. Haykin S. "Neural networks" Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2006, 1104 p.
2. Kalinin A.V., Podval'nyy S.L. "The technology of neural network distributed computing: monograph" ("Tekhnologiya neyrosetevykh raspredelyonnykh vychisleniy: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2004, 121 p.
3. Kalinin A.V., Podval'nyy S.L. "Methods for solving ill-conditioned systems of linear equations on the basis of distributed neural network calculations", Automation and Remote Control, 2004, no. 3 (15), pp. 22-26.
4. Kruglov V. V., Borisov V. V. "Artificial neural networks. Theory and Practice, 2nd ed., Stereotype" ("Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika, 2-e izd., stereotip"), Moscow, Hotline – Telecom (Goryachaya liniya – Telekom), 2002, 382 p.
5. Yasnitskiy L. N. "Introduction to the Artificial Intelligence" ("Vvedenie v iskusstvennyy intellekt"), Moscow, Akademiya, 2008, 176 p.
6. Callan R. "Neural networks", Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2001, 287 p.
7. Troelsen A. "C# and the .NET Platform", Russ. ed., Moscow, Vil'yams, 2013, 1312 p.
8. Medvedev V. S., Potemkin V. G. "Neural networks. MATLAB 6" ("Neyronnye seti. MATLAB 6"), Moscow, DIALOG-MIFI, 2002, 496 p.
9. Yasnitskiy L. N. "Artificial Intelligence. Elective course. Textbook" ("Iskusstvennyy intellekt. Elektivnyy kurs: ucheb. posob."), Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2011, 240 p.
10. Krug P. G. "Neural networks and neurocomputers: A manual on the course "Microprocessors"" ("Neyronnye seti i neyrokomp'yutery: Uchebnoe posobie po kursu «Mikroprotsessory»"), Moscow, MEI, 2002, 176 p.

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ БАЙЕСОВСКОЙ СЕТИ ПРОЦЕССА ТЕСТИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

© 2017 Т.В. Азарнова, Н.Г. Аснина, Д.К. Проскурин, П.В. Полухин

В статье изложены результаты исследования, направленного на разработку адаптивной модели управления процессом тестирования надежности и отказоустойчивости информационных систем, основными компонентами которых являются веб-приложения. Модель управления процессом тестирования строится на основе применения инструментов фаззинга и аппарата динамических байесовских сетей. Все этапы процесса тестирования веб-приложений методом фаззинга формализуются в виде задач обучения структуры, параметров и реализации вероятностного вывода для динамических байесовских сетей. В данной статье основное внимание сосредоточено на вопросах обучения структуры динамических байесовских сетей. Структура байесовской сети может определяться на основе причинной модели исследуемой проблемной области, которая строится в соответствии с представлением экспертов, имеющих большой опыт в области тестирования рассматриваемых уязвимостей приложений. Но более эффективные результаты могут быть достигнуты за счет использования специальных алгоритмов обучения структуры сети на основании статистических данных, этот метод способен гибко настраиваться на структурные изменения во внешней среде моделируемого процесса. Применяемый в работе алгоритм обучения базируется на предположении о Марковском покрытии и методологии поиска на основе принципа восхождения

Ключевые слова: байесовская сеть, тестирование, надежность информационной системы, обучение структуры, Марковское покрытие, метод восхождения

### Введение

Процесс тестирования отказоустойчивости и надежности программных компонент информационных систем представляет собой сложный недетерминированный процесс [1, 4]. Этапы тестирования включают анализ приложений от момента генерации данных до определения модуля, фрагмента кода или параметров, не прошедших верификацию. На каждом этапе присутствует неопределенность и дальнейшая стратегия и тактика тестирования зависит от результатов текущего этапа. Сложность декомпозиции подпроцессов тестирования приводит к повышению вероятности ложных срабатываний. Не имеющая механизмов ситуационной адаптации тестовая система становится статичной и не может точно диагностировать первопричину сбоя или ошибки внутри приложения, а реализованные в ней функциональные алгоритмы не могут подстроиться к условиям и особенностям возникновения новых ошибок. С позиции системного подхода для достижения требуемых результатов тестирования и определенной степени их достоверности необходима некоторая двунаправленная связь между элементами (модулями)

процесса тестирования с целью управления тестовой последовательностью.

Эффективным методом организации двунаправленной связи является функциональное моделирование процессов тестирования, на вход каждого подпроцесса тестирования, и механизмы самого тестирования, и механизмы управления и взаимодействия между подпроцессами и управляющей системой. Для организации процесса тестирования веб-приложений необходимы инструменты функционального моделирования, способные отражать стохастический характер подпроцессов. Анализ различных методов моделирования, удовлетворяющих данным требованиям, показывает, что одним из эффективных апробированных комплексных методов моделирования сложных стохастических процессов и реализации нестандартных эмпирических направлений анализа являются динамические байесовские сети. В качестве узлов байесовской сети могут выступать два типа модулей. Первый тип предназначен для случайной генерации тестов, второй для анализа результатов данных тестов [4]. Сочетание данных модулей позволяет дать оценку, насколько эффективен тот или иной набор тестовых данных для оценки надежности определенного приложения. Применительно к процессам тестирования использование математического аппарата байесовских сетей позволяет определить связи между структурными компонентами тестирования с помощью механизмов обучения, а применение байесовских оценок на основе вероятностного вывода реализует эффективные численные методы, позволяющие

---

Азарнова Татьяна Васильевна – ВГУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: ivdas92@mail.ru  
Аснина Наталия Георгиевна – ВГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: andrey050569@yandex.ru  
Проскурин Дмитрий Константинович – ВГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru  
Полухин Павел Валерьевич – ВГУ, канд. техн. наук, докторант, e-mail: alfa\_force@mail.ru



оценить динамику трансформации ошибок в течение некоторого временного интервала. Это позволяет отслеживать состояние жизнеспособности информационной системы, в состав которой входит тестируемое приложение.

В данной работе рассматривается проблема моделирования процесса тестирования информационных систем средствами динамических байесовских сетей. Исследуются вопросы формирования структуры, семантики данного процесса и разработки соответствующего алгоритмического обеспечения.

### Построение Байесовской сети процесса тестирования веб-приложений

Построение сложных инструментов тестирования, адаптированных к постоянным изменениям как самой среды тестирования, так и условий возникновения программных ошибок, является достаточно сложной процедурой. Это требует детального описания алгоритмов выполнения каждого шага тестирования определенной группы программных ошибок и выявления связей между взаимодействующими структурными подпроцессами. Процесс тестирования принято декомпозировать на три основных подпроцесса: порождение тестовых сценариев, выполнение набора тестов, мониторинг событий (исключения и ошибки). Однако, ограничиваясь только этими компонентами, сложно эффективно управлять процессом тестирования. Процесс имеет многомодульную архитектуру, а детектирование программных ошибок требует определения связей на основе экспериментальных данных. Для понимания генезиса возникновения программных ошибок и определения того, какие модули должны осуществлять взаимодействие, необходимо системное моделирование данных процессов. Моделирование процессов тестирования является перспективным направлением развития механизмов анализа программных продуктов, способных устанавливать взаимосвязи между отдельными структурными компонентами процесса тестирования, определять дальнейшее развитие программно-инструментальной среды тестирования. От эффективности применяемых методов моделирования и соответствующих им численных методов обработки данных напрямую зависит достоверность результатов тестирования и возможность прогнозирования тенденций изменения надежности и отказоустойчивости информационной системы в соответствии с изменениями во внешней инфраструктуре. Байесовские сети предоставляют достаточно мощные функциональные возмож-

ности по моделированию структуры стохастических процессов и алгоритмы численных методов анализа ретроспективного, текущего периода и прогнозирования вероятностей обнаружения новых уязвимостей на основании свидетельств в данном и ретроспективном периодах [2].

Байесовская сеть представляет собой направленный граф без циклов [6], узлы (вершины) которой моделируются как случайные переменные  $X, i = 1, \dots, n$  с доменами значений  $D_n, i \in D_n$ . Дуги, ведущие от вершины  $X$  к вершине  $Y$ , означают что  $X \in Parents(Y)$ , т.е.  $X$  является родительской вершиной для  $Y$ . Вершинам  $X_i$  ставится в соответствие условное распределение вероятностей  $P(X_i | Parents(X_i))$ . Полное совместное распределение вероятностей для байесовской сети имеет следующий вид

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Parents(X_i)).$$

При проведении исследований узлы сети, как правило, представляются в виде совокупности трех множеств  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$  – множество скрытых переменных,  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$  – множество переменных наблюдения,  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_k\}$  – множество переменных свидетельства.

Для построения структуры байесовской сети на практике применяется два подхода [5]. Первый подход (причинная модель) подразумевает определение структуры сети на основе экспертных знаний. Применительно к моделированию с помощью динамических байесовских сетей процесса тестирования такой подход означает, что и узлы процесса тестирования и порядок их взаимодействия определяются экспертами, исходя из их опыта в области проведения тестирования приложений. Данный подход обладает рядом преимуществ и недостатков. К преимуществам можно отнести прозрачность топологии сети, отсутствие переобучения сети, взаимодействие модулей имеет четкую иерархическую структуру, исключаящую коллизии и нарушение порядка выполнения модулей. К недостаткам относится отсутствие возможности динамического изменения структуры сети. Второй подход основывается на использовании алгоритмов обучения структуры сети на базе алгоритмов «жадного поиска». Данный подход хорошо адаптируется к изменению среды тестирования и динамике появления программных ошибок на протяжении некоторого временного отрезка жизненного цикла приложений.

В рамках построения структуры байесовской сети процесса тестирования в работе рассматривается применение гибридного алгоритма



обучения на основе метода восхождения [2, 3]. Алгоритм восхождения создает модель, делая на каждом шаге максимально возможное усовершенствование целевой функции оценки качества. Структура байесовской сети инициализируется случайным образом, последовательно анализируются оценки соответствия структуры связей при различных изменениях состава дуг сети и выбирается вариант, дающий максимальное значение функции, оценивающей соответствие. Данный процесс продолжается до тех пор, пока изменение дуг сети, больше не приводит к увеличению оценки. Алгоритм может привести к задержке в зоне локального максимума, для преодоления данного ограничения, при определении структуры байесовской сети управления процессом тестирования информационных систем в работе предлагается использовать гибридный алгоритм минимаксного восхождения (max-min hill climbing). Стратегия данного алгоритма основывается на синтезе двух алгоритмов. Первый – минимаксный предок-потомок (ММРС), производит обучение сети на основе метода локального обнаружения. Второй, алгоритм восхождения использует «жадную» байесовскую оценку для определения ориентации дуг байесовской сети. Поиск начинается с пустого графа, добавление, удаление или изменения направления дуг (ребер) выбирается так, чтобы это приводило к увеличению оценки, после чего поиск повторяется рекурсивным образом. При этом алгоритм инициализирует множество узлов-кандидатов в родители как для множества родительских, так и для множества дочерних узлов, так как не всегда четко можно определить родительские и дочерние узлы. В основе поиска методом восхождения лежит процесс вычисления метрики Байеса-Дирихле [5]. Данная метрика позволяет получить апостериорное распределение структуры сети в неявном виде. Предполагается, что вектор параметров каждой переменной байесовской сети при фиксированном значении родителей имеет функцию Дирихле

$$p(Q_{i,j}^G) = \frac{\Gamma(\sum_{s=1}^{r_i} \alpha_{i,j,s})}{\prod_{s=1}^{r_i} \Gamma(\alpha_{i,j,s})} \cdot 1_{\{Q_{i,j,1}^G, \dots, Q_{i,j,r_i-1}^G > 0; \sum_{k=1}^{r_i-1} Q_{i,j,k}^G < 1\}} \prod_{k=1}^{r_i} (Q_{i,j,k}^G)^{\alpha_{i,j,k}-1},$$

где  $\alpha_{i,j,k} > 0$  – параметр распределения Дирихле,  $Q_{i,j}^G = (Q_{i,j,1}^G, \dots, Q_{i,j,r_i-1}^G)$  – вектор параметров, который соответствует одной переменной и одному значению ее родителя,  $Q_{i,j,r_i}^G = 1 - \sum_{k=1}^{r_i-1} Q_{i,j,k}^G > 0$ .

Исходя из условия глобальной независимости переменных байесовской сети, справед-

ливо следующее равенство

$$p(Q^G|G) = \prod_{i=1}^n p(Q_i^G|G).$$

Свойство локальной независимости определяет, что вектора значений переменных байесовской сети, связанные с каждым значением родителей одной из переменных, не зависят друг от друга, и выполняется следующее соотношение

$$p(Q_i^G|G) = \prod_{j=1}^{q_i} p(Q_{i,j}^G|G).$$

В соответствии с изложенными выше соотношениями, распределение Дирихле можно переписать в следующем виде

$$p(Q^G|G) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma(\sum_{k=1}^{r_i} \alpha_{i,j,k})}{\prod_{k=1}^{r_i} \Gamma(\alpha_{i,j,k})} \prod_{k=1}^{r_i} (Q_{i,j,k}^G)^{\alpha_{i,j,k}-1}.$$

Из определения плотности распределения, получаем выражение, характеризующие апостериорное распределение вероятности для байесовской сети

$$P(D|G) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \frac{\Gamma(\sum_{k=1}^{r_i} \alpha_{i,j,s})}{\Gamma(\sum_{s=1}^{r_i} N_{i,j,s} + \alpha_{i,j,s})} \cdot \prod_{s=1}^{r_i} \frac{\Gamma(N_{i,j,s} + \alpha_{i,j,s})}{\Gamma(\alpha_{i,j,s})}.$$

Из формулы Байеса получаем,  $P(G|D) = \frac{P(D|G)P(G)}{P(D)}$ , от структуры сети зависит лишь числитель и, следовательно:

$$P(G|D) \propto P(D|G)P(G),$$

априорная вероятность  $P(G)$  будет идентична для всех структур байесовских сетей.

Учитывая выражение, описывающее апостериорную вероятность сети, можно записать выражение для метрики Байеса-Дирихле в логарифмической форме:

$$\ln P(D|G) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \ln \frac{\Gamma(\sum_{k=1}^{r_i} \alpha_{i,j,s})}{\Gamma(\sum_{s=1}^{r_i} N_{i,j,s} + \alpha_{i,j,s})} + \sum_{s=1}^{r_i} \frac{\Gamma(N_{i,j,s} + \alpha_{i,j,s})}{\Gamma(\alpha_{i,j,s})}.$$

Для получения эквивалентной метрики Байеса-Дирихле необходимо определить положительную меру на  $\{1, \dots, r_1\} \times \dots \times \{1, \dots, r_n\}$

$$\alpha(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{\prod_{i=1}^n r_i}.$$

Исходя из данного выражения, мера эквивалентная метрике Байеса-Дирихле может быть описана следующим выражением:

$$\ln P(D|G) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \ln \frac{\Gamma\left(\frac{1}{q_i}\right)}{\Gamma\left(\sum_{s=1}^{r_i} N_{i,j,s} + \frac{1}{q_i}\right)} + \sum_{s=1}^{r_i} \frac{\Gamma\left(N_{i,j,s} + \frac{1}{q_i r_i}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{q_i r_i}\right)}.$$

Минимаксный алгоритм предок-потомок служит для построения структуры байесовской сети. Сущность данного алгоритма заключается в нахождении множества СРС (родителей и потомков), содержащего всех предков и потомков для некоторого узла X. Данный алгоритм обладает характерными признаками эвристического анализа и позволяет определить все входящие и исходящие узлы для переменной X, без определения направленности данных связей. Применяя на практике данный алгоритм для каждого из узлов, можно определить все узлы сети без учета их ориентации, тем самым определить базовую структуру байесовской сети. Алгоритм представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Структура минимаксного алгоритма предок-потомок

| Алгоритм                   | Этапы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Минимаксный предок-потомок | <p><b>ММРС</b></p> <p>1. Входные данные:<br/>D, СРС, t – переменная для которой производится вычисление</p> <p>2. Инициализация<br/>СРС = ∅</p> <p>3. Итерация<br/>Пока можно добавить в СРС<br/>(f, assoc<sub>f</sub>) =<br/>MaxMinHeuristic(t, СРС)<br/>если assoc<sub>f</sub> ≠ 0 то<br/>СРС = СРС ∪ t</p> <p>4. Проверка условной независимости переменной t и узлом из СРС<br/>Пока x есть в множестве СРС<br/>if ∃ s ⊂ СРС и Ind(x, t s) then<br/>СРС = СРС \ {x}</p> <p>5. Возврат множества СРС</p> |
|                            | <p><b>MaxMinHeuristic</b></p> <p>1. Входные данные:<br/>t – анализируемая переменная,<br/>СРС – Подмножество множества СРС</p> <p>2. Поиск максимального значение<br/>assoc<sub>f</sub> = max<sub>x</sub> MinAssoc(x, t СРС)<br/>f = argmax<sub>x</sub> MinAssoc(x, t СРС)</p> <p>3. Возврат f и assoc<sub>f</sub><br/>MinAssoc</p> <p>1. Входные данные<br/>t, x – анализируемые переменные<br/>СРС – Подмножество множества СРС</p> <p>2. Итерация<br/>пока s ⊂ СРС</p>                                   |

Продолжение табл. 1

|  |                                                                                                                                               |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>p = χ<sup>2</sup>(t, x s)<br/>если p &gt; α, то<br/>assoc = 0<br/>если -log(p) &lt; assoc, то<br/>assoc = -log(p)<br/>3. Возврат assoc</p> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Остановимся на основных аспектах приведенного в табл. 1 алгоритма ММРС. Изначально множество кандидатов родителей и потомков для вершины t представляет собой пустое множество, после чего на каждом шаге создается пара, сформированная на основе f и значения связи с переменной t, при заданном СРС. Затем все переменные из СРС проверяются относительно каждого подмножества s ⊂ СРС. Если существует подмножество s ⊂ СРС, такое что выполняется критерий условной независимости Ind(x, t|s), переменная удаляется из СРС. При наличии переменной t и множества переменных СРС, алгоритм ММРС создает выборку по x, которая максимизирует зависимость с t для всех переменных, которые не содержатся в данный момент в СРС. Зависимость, вычисленная для каждой из переменных, представляет собой минимально допустимое значение для всех подмножеств s ⊂ СРС. Процедура MinAssoc (t, x, СРС) осуществляет проверку статистических критериев независимости (критерий Пирсона). Если вероятность p (вероятность ложного утверждения об условной независимости) Ind(x, t|s), меньше некоторого порогового значения α, то переменные x и t читаются независимыми относительно множества s ⊂ СРС, а значения связи между x и t равно нулю, в противном случае значение связи вычисляется как -log(p). Алгоритм ММРС на каждом шаге первого этапа добавляет в СРС переменную, которая максимизирует минимальную связь с t (находится путем вычисления тестов для каждого возможного подмножества s ⊂ СРС). Первая фаза завершается, когда все оставшиеся переменные независимы от t, в частности, такая ситуация достигается в том случае, когда минимаксная ассоциация достигает нулевого значения. Вторая фаза необходима, так как переменные в СРС могут быть вставлены не в хронологическом порядке, в частности, если переменная x, будет считаться независимой на основе алгоритма при наличии переменной y, однако будет добавлена в СРС раньше чем y, то необходимо, чтобы Ind(x, t|y) было вычислено позже.

Для проверки гипотез о независимости для каждой из переменных в работе используется

критерий Пирсона ( $\chi^2$  критерий):

$$\chi^2 = \sum_{a,b,c} \frac{(N_{a,b,c} - E_{a,b,c})^2}{E_{a,b,c}},$$

где  $E_{a,b,c}$  – ожидаемое число выборок, где  $x=a$ ,  $y=b$ ,  $z=c$ , оно определяется следующим образом:

$$E_{a,b,c} = \frac{N_{ac}N_{bc}}{N_c},$$

где  $N_{a,b,c}$  – частота появления данных, где  $x=a$ ,  $y=b$ ,  $z=c$ .

Для построения связей между узлами сети и определения их направлений в рамках алгоритма ММНС используется алгоритм «жадного» поиска на основе алгоритма восхождения [5]. Данный алгоритм в целом представляет собой цикл, в котором постоянно происходит перемещение в направлении возрастания. Критерием остановки является достижение некоторого пика, ни одно из соседних состояний не имеет более высокого значения. Этапы данного алгоритма представлены ниже.

1. Применение алгоритма ММРС для построения структуры сети

- Итерация

Цикл для каждой переменной  $t$

$$PC_t = \text{MMPC}(t, D)$$

- Вычисление

Применение алгоритма восхождения с использованием операций добавления, удаления и изменения направленности связей между узлами сети

2. Вычисление графа с максимальным значением оценки на основе подхода Байеса-Дирихле

Подход к определению направленности байесовской сети базируется на алгоритме восхождения с использованием эквивалентной метрики Байеса-Дирихле, данная метрика реализует концепцию применения оценочной функции. Для определения сети с максимальным значением оценочной функции используются операторы добавления, удаления и изменения направленности связей, которые непосредственно влияют на значение данной функции, а критерием остановки алгоритма восхождения является достижения пика оценочной функции. Этапы алгоритма минимаксный предок потомок представлены на рис. 1-3. Обозначения к рисункам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Обозначения к рис. 1-3

| Название узла | Характеристика                                                                                                                            |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A             | Механизм генерации наборов тестовых данных                                                                                                |
| B             | Дополнительные методы преобразования тестовых данных                                                                                      |
| C             | Механизмы выполнения и анализа результатов тестирования                                                                                   |
| D, E, F       | Оценка последствий нарушения устойчивости приложений применительно к тому или иному набору тестов, определение степени критичности ошибки |

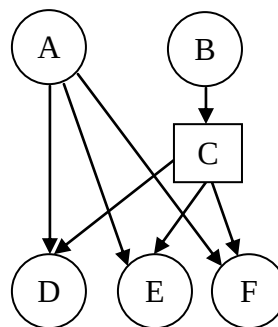


Рис. 1. Исходная сеть

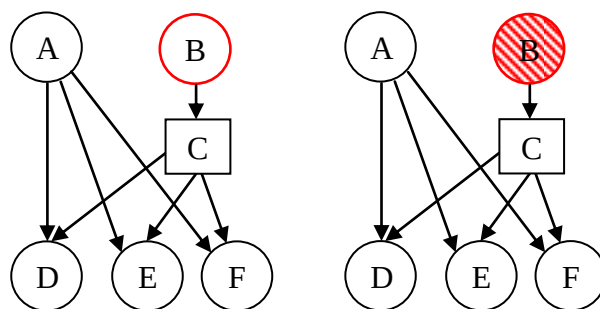


Рис. 2. Шаг 1 алгоритма. а) Выбран узел B, A и D удалены –  $\text{Ind}(C; A|\{\}), \text{Ind}(C; D|\{\})$ . б)  $\text{CPC}=\{B\}$

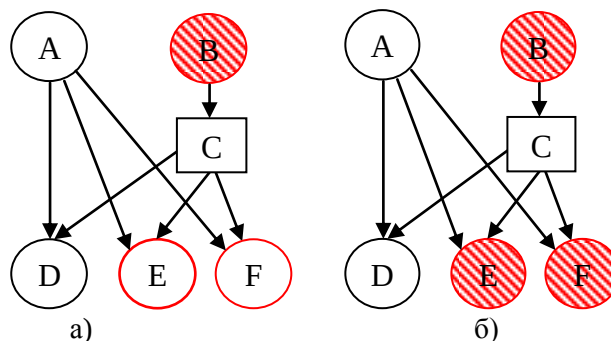


Рис. 3. Шаг 2 алгоритма. а) выбран узел E, F. б)  $\text{CPC}=\{B, E, F\}$

Для реализации предложенной схемы обучения структур байесовских сетей управления процессом тестирования конкретных уязвимостей веб-приложений в рамках исследования разработано соответствующее алгоритмическое и программное обеспечение.

### Выводы

1. Повышение сложности внутренней структуры информационных систем и внешней инфраструктуры их функционирования требует применения новых подходов к тестированию и моделированию процессов управления тестированием.

2. Одной из гибких, постоянно развивающихся, но на текущий момент обладающей недостаточно проработанными механизмами автоматизированного интеллектуального управления является технология тестирования методом фаззинга.

3. Процессы тестирования методом фаззинга носят стохастический характер, для моделирования инструментов управления данными процессами необходимо использовать модели и методы, хорошо отражающие специфику стохастических процессов.

4. Применение динамических байесовских сетей для моделирования процесса управления тестированием позволяет сформировать единую вычислительную структуру, воспроизводящую функциональную модель процесса тестирования, логико-вероятностную структуру информации и методологическую базу обнаружения уязвимостей, и реализующую стохастические интеллектуальные механизмы обучения, логического вывода и прогнозирования в процедурах тестирования.

5. Применение гибридных алгоритмов обучения структуры байесовских сетей процесса тестирования, позволяет повысить статисти-

ческую обоснованность причинных связей между подпроцессами.

6. Вычисление оценок на основе метрики Байеса-Дирихле позволяет значительно снизить время обработки оценочных значений для каждого графа-кандидата, а также своевременно определить пороговое значение, служащее критерием завершения процедуры обучения структуры.

### Литература

1. Азарнова Т.В. Расширение функциональных возможностей фаззинга веб-приложений на основе динамических сетей Байеса / Т.В. Азарнова, П.В. Полухин // Научно-техническая информация. Серия 2. Информ. процессы и системы. - 2014. - № 9. - С. 12-19.

2. Азарнова Т.В. Управление процессом тестирования веб-приложений методом фаззинга на основе динамических байесовских сетей / Т.В. Азарнова, С.А. Баркалов, П.В. Полухин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. - 2017. - Т. 17. - № 2. - С. 51-64.

3. Масленников Е.Д. Предсказания на основе байесовских сетей доверия: алгоритм и программная реализация / Е.Д. Масленников, В.Б. Сулимов // Вычислительные методы и программирование. - 2010. - № 11. - С. 94-107.

4. Микаэльян С.В. Методы фильтрации на основе многоточечной аппроксимации плотности вероятности оценки в задаче определения параметров движения цели при помощи измерителя с нелинейной характеристикой / С.В. Микаэльян // Наука и Образование. - 2011. - № 10. - С. 2-14.

5. Полухин П.В. Интеграция динамических байесовских сетей в процесс тестирования веб-приложений для выявления уязвимостей межсайтингового скриптинга / П.В. Полухин // Научное обозрение. - 2014. - № 9. - С. 414-422.

6. Торопова А.В. Подходы к диагностике согласованности данных в байесовских сетях доверия / А.В. Торопова // Труды СПИИРАН, 2015. - № 43. - С. 156-178.

7. Тулупьев А.Л. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах / А.Л. Тулупьев, А.В. Сироткин, С.И. Николенко. - СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2009. - 400 с.

Воронежский государственный университет

Воронежский государственный технический университет

## BAYESIAN NETWORK STRUCTURE FORMATION OF INFORMATION SYSTEMS RELIABILITY TESTING PROCESS

**T.V. Azarnova<sup>1</sup>, N.G. Asnina<sup>2</sup>, D.K. Proskurin<sup>3</sup>, P.V. Polukhin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: ivdas92@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: andrey050569@yandex.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

<sup>4</sup>Doctoral candidate, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: alfa\_force@mail.ru

The article describes the results of a study aimed to develop an adaptive model for managing the process of testing the reliability and fault tolerance of information systems, the main components of which are web applications. The testing process control model is built on the basis of the application of fuzzing methods and the apparatus of dynamic Bayesian networks. All stages of the web applications testing process by fuzzing are made in the form of learning tasks for the structure, parameters, and implementation of the probability output for dynamic Bayesian networks. This article focuses on the training the structure of dynamic Bayesian networks. The structure of the Bayesian network can be determined on the basis of the causal model of the investigated problem area, which is constructed in accordance with the conception of experts with extensive experience in testing the application vulnerabilities in question. But more effective results can be achieved through the use of special algorithms for learning the structure of the network based on statistical data. This method is able to flexibly adjust to structural changes in the external environment of the simulated process. The learning algorithm used in the work is based on the assumption of the Markov cover and the search methodology based on the principle of ascent

**Key words:** Bayesian network, testing, information system reliability, structure training, Markov cover, ascent method

## References

1. Azarnova T.V., Polukhin P.V. "Expanding the functional capabilities of fuzzing of web applications based on dynamic Bayes networks", Scientific and Technical Information Processing. Series 2. Information processes and systems, 2014, no. 9, pp. 12-19.
2. Azarnova T.V., Barkalov S.A., Polukhin P.V. "Managing the process of testing web applications by fuzzing based on dynamic Bayesian networks", Bulletin of South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control and Radioelectronics, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 51-64.
3. Maslennikov E.D., Sulimov V.B. "Predictions based on Bayesian networks of confidence: algorithm and software implementation", Numerical methods and programming, 2010, no. 11, pp. 94-107.
4. Mikael'yan S.V. "Filtering methods based on multipoint approximation of the probability density of estimation in the problem of determining the parameters of target motion using a gauge with a nonlinear characteristic", Nauka i Obrazovanie, 2011, no. 10, pp. 2-14.
5. Polukhin P.V. "Integration of dynamic Bayesian networks into the process of testing web applications for detection of vulnerabilities of cross-site scripting", Scientific Review, 2014, no. 9, pp. 414-422.
6. Toropova A.V. "Approaches to the diagnosis of data consistency in Bayesian networks of trust", Proceedings of SPIIRAS, 2015, no. 43, pp. 156-178.
7. Tulup'ev A.L., Sirotkin A.V., Nikolenko S.I. "Bayesian networks of confidence: logical-probabilistic inference in acyclic directed graphs" ("Bayesovskiye seti doveriya: logiko-veroyatnostnyy vyvod v atsiklicheskikh napravlennykh grafakh"), St. Petersburg, Publishing house of S.-Petersburg University, 2009, 400 p.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ КОЛЬЦЕВОЙ ГЕОМЕТРИИ

© 2017 Т.С. Тимошинова, И.Э. Свиридов, Д.П. Шматов

Развитие современной техники и технологий, расширение сфер применения электричества неразрывно связаны, в первую очередь, с поиском новых источников электрической энергии. В настоящее время весьма актуальным решением является использование термоэлектрических генераторных модулей, входящих в состав автономных источников тока. Рассмотрены существующие варианты использования термоэлектрических генераторных модулей. Также в работе приведены данные о современных разработках наноструктурных термоэлектрических материалов нового поколения, которые способны повысить мощностные и удельно-весовые характеристики термоэлектрических генераторных модулей. По результатам проведенного обзора и анализа современных подходов к разработке и созданию автономных термоэлектрических источников тока предложено схемное решение термоэлектрического генераторного модуля кольцевой геометрии. Перечислены основные системы, входящие в состав автономного источника тока. Составлена методика расчета газогорелочного устройства природного газа, которую можно использовать при разработке термоэлектрического генераторного модуля в составе автономного источника тока и проведена топологическая оптимизация конструкции с использованием компьютерного моделирования в программном комплексе ANSYS Fluent с применением Adjoint Solver, в ходе которой была минимизирована вероятность отрыва пламени от кратера газогорелочного устройства путем соблюдения допустимого скоростного режима газозооушной смеси

Ключевые слова: термоэлектрический генераторный модуль, термоэлектрическая батарея, эффект Зеебека, автономный источник тока, газогорелочное устройство, топологическая оптимизация

### Обзор современных подходов к разработке автономных источников тока

В настоящее время трудно представить какие-либо отрасли деятельности человека, энергетическое обеспечение которых не осуществлялось бы с помощью электрической энергии. Развитие современной техники и технологий, расширение сфер применения электричества неразрывно связано с поиском новых источников энергии, в первую очередь – электрической. Основное требование – увеличить объем ее выработки, но в последнее время на передний план выходят дополнительные условия: энергия должна вырабатываться экологически чистым путем, должна быть возобновляемая [1]. Наряду с этими условиями существует необходимость автономного энергообеспечения удаленных и труднодоступных объектов, включая объекты технологической связи и телеметрии, промышленные системы сбора и подготовки газа к транспорту и системы катодной защиты магистральных газопроводов и нефтепроводов.

Решение данного комплекса вопросов возможно посредством использования термоэлектрических генераторных модулей (ТЭГМ) и автономных термоэлектрических источников тока (АИТТ) на их основе. Весьма значимое положительное качество ТЭГМ – безмашинное преобразование тепловой энергии в электрическую, которая может быть использована для нужд в различных областях.

Основным элементом ТЭГМ является термоэлектрическая батарея (ТБ), по своей конструкции, они могут быть плоскими или цилиндрическими. Принцип работы ТЭГМ, основан на эффекте Зеебека, т.е. возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных полупроводниковых термоэлементов n- и p-типа, контакты между которыми находятся при различных температурах [1, 2].

Учитывая то, что за последние двадцать лет коэффициент полезного действия преобразования современных термоэлектрических материалов увеличился более чем в три раза, можно утверждать о практически безграничной широте применения ТЭГМ при наличии тепловой энергии.

Например, ТЭГМ могут применяться для повышения эффективности использования

---

Тимошинова Татьяна Сергеевна – ВГТУ, младший научный сотрудник, e-mail: rd-vgtu@mail.ru  
Свиридов Илья Эдуардович – ВГТУ, зав. лабораторией, e-mail: rd-vgtu@mail.ru  
Шматов Дмитрий Павлович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

теплоты отработавших газов дизеля - судового двигателя 6VDS48/42-AL2 (6ЧН 42/48) мощностью 2 650 кВт судна типа Ro-8 [3 ÷ 5]. Материал ТЭГМ р-типа – PbTe; n-типа – 75 % PbTe + 25 % SnTe. Эти сплавы имеют хорошие значения термоЭДС в рабочем диапазоне температур, который достигается за счет выхлопных газов ДВС и потока пресной воды. Возникающую ЭДС по специальным токоотводам направляют в полезную нагрузку общего электрического контура судна.

С целью достижения показателей КПД термоэлектрических генераторных модулей до 15 ÷ 20 % в мире активно ведутся разработки наноструктурных термоэлектрических материалов нового поколения и поиск новых конструктивных решений, которые способны повысить мощностные и удельно-весовые характеристики. Объектом такого исследования является гибкий термоэлектрический элемент на основе кремнеземной стеклоткани и теллурида висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) [6]. В ходе исследований определено, что плотность электронных состояний зависит от размерности системы. Это свидетельствует о том, что для низкоразмерных кристаллов следует ожидать резких скачкообразных увеличений коэффициента Зеебека, что приведет к увеличению КПД ТЭГМ, но в то же время накладывает и дополнительные ограничения на характеристический размер (диаметр квантовой проволоки/квантовой точки или ширину квантовой ямы).

В настоящее время активно ведутся работы по разработке с последующим изготовлением и проведением испытаний АИГТ на основе ТЭГМ кольцевой геометрии. Применение цилиндрической ТБ в ТЭГМ данного типа является наиболее перспективным конструктивным решением.

ТЭГМ, собранный на цилиндрических термобатареях, имеет более высокие удельные электрические характеристики, за счет снижения массы конструктивных элементов теплопередающей системы. Кроме того, цилиндрическая конструкция ТЭГМ позволяет обеспечить более высокое сопротивление электрической изоляции между термобатареями и обрамляющей металлоконструкцией. Также проектирование конструкций термобатарей кольцевой геометрии позволяет осуществить надежный контакт сборочных единиц для минимизации тепловых потерь.

Одно из принципиальных схемных решений ТЭГМ цилиндрической конструкции с

радиально-кольцевыми термобатареями представлено на рис. 1.

термобатареями

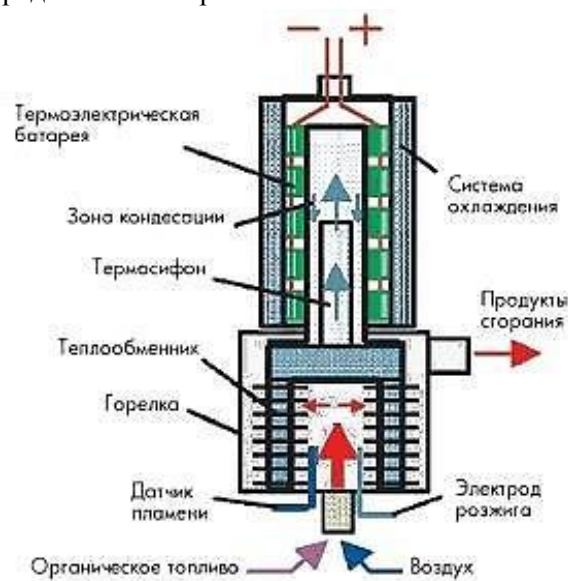


Рис. 1. Схематичное изображение ТЭГМ цилиндрической конструкции с радиально-кольцевыми термобатареями

Здесь первичным источником энергии разрабатываемого АИГТ является природный газ. Для сжигания природного газа целесообразно использовать инжекционную газовую горелку, обладающую способностью саморегулирования (сохранения коэффициента инжекции постоянным при изменении нагрузки горелки в определенных пределах) и не требующую устройств для принудительной подачи воздуха.

### Методика расчета газогорелочного устройства

В работах [7, 8] описаны методики по расчету геометрических параметров горелочного устройства. Основными элементами инжекционного горелочного устройства являются газовое сопло, конфузор, цилиндрический смеситель, диффузор и носик горелки (рис. 2).

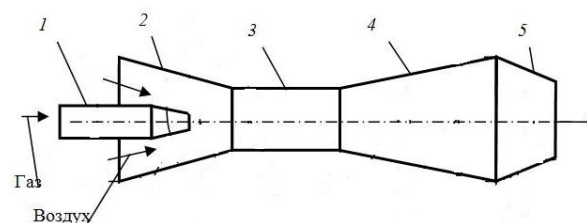


Рис. 2. Принципиальная схема инжекционной атмосферной газовой горелки: 1 – сопло; 2 – конфузор; 3 – смеситель; 4 – диффузор, 5 – носик горелки (кратер)

Для определения конструктивных размеров горелочного устройства необходимо задать исходные данные:

$V_2 = 1 \text{ м}^3 / \text{ч}$  – объемный расход природного газа;

$Q_H = 35.82 \text{ МДж} / \text{м}^3$  – низшая теплота сгорания природного газа;

$\gamma_2 = 0.7168 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность природного газа при  $0^\circ \text{C}$ ;

$\gamma_0 = 1.293 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность воздуха при  $0^\circ \text{C}$ ;

$L_0 = 9.5 \text{ м}^3 / \text{м}^3$  – теоретически необходимое количество воздуха на горение;

$P_2 = 0.05 \text{ МПа}$  – избыточное давление природного газа;

$P = 0.1 \text{ МПа}$  – атмосферное давление;

$K = 1.314$  – показатель адиабаты природного газа;

$T_2 = T_0 = 273 \text{ К}$  – температура газа и окружающего воздуха соответственно. Инжекционные горелки работают при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.05 - 1.15$ . Следуя [7], скорость истечения газа из сопла определяется по формуле:

$$w_c = 2.944 \varphi P_1 \sqrt{\frac{T_0}{\gamma_2 T_2 P_2} \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1.54} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1.77} \right)}, \quad (1)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  – абсолютное давление газа перед соплом и на выходе из сопла соответственно, равное атмосферному;

$\varphi = 0.9$  – коэффициент, учитывающий распределение скоростей потока газа по сечению сопла и сопротивление потоку, зависящий от формы сопла.

При таких исходных данных  $w_c = 306.3 \text{ м} / \text{с}$ . Относительно скорости истечения газа из сопла определяются основные конструктивные размеры:

$$f = \frac{V_2 10^6}{3600 \varepsilon w_c} = 1.295 \text{ мм}^2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент истечения, учитывающий сжатие струи, принимаемый в пределах  $0.7 \div 0.87$ .

Диаметр сопла  $d$  определяется по формуле

$$d = \sqrt{\frac{V_2 10^6}{0.785 w_c}} = 1.1 \text{ мм}. \quad (3)$$

Оптимальное соотношение площадей смесителя и газового сопла  $F_1$ , следуя [7], получим  $F_1 = f_c / f = 177.8$ . Тогда диаметр смесителя

$$d_c = d \sqrt{F_1} = 14.3 \text{ мм}. \quad (4)$$

Остальные конструктивные размеры инжекционных горелок, близкие к оптимальным, определяются из экспериментально найденных соотношений:  
– диаметр кратера:

$$d_3 = (1.05..1.1) d_c = 16 \text{ мм}; \quad (5)$$

– длина конфузора:

$$l_1 = (1.5..2.0) d_c = 14.5 \text{ мм} \quad (6)$$

при угле конусности  $30 \div 45^\circ$ ;

– длина смесителя:

$$l_c = (3..5) d_c = 57.3 \text{ мм}; \quad (7)$$

– угол расширения диффузора обычно берут в пределах  $6 \div 8^\circ$ ;

– длина диффузора:

$$l_d = l_c = 57.3 \text{ мм}. \quad (8)$$

Угол конусности кратера  $12 \div 15$ .

Правильность расчета проверяется по допустимым значениям выходной скорости газозооушной смеси из кратера:

$$w_3 = \frac{(1 + \alpha L_0) T_{cm} V_2 10^6}{0.785 d_3 T_0}. \quad (9)$$

В работе [9] указана рекомендуемая для природного газа допустимая скорость газозооушной смеси на выходе из горелки  $10 \div 20 \text{ м} / \text{с}$ . Данные ограничения необходимы, чтобы избежать возможности отрыва и погасания пламени. Из (9) получим  $w_3 = 15.3 \text{ м} / \text{с}$ .

Полученные конструктивные размеры горелочного устройства являются



приблизительными и требуют уточнения. Используя методы компьютерного моделирования (вычислительный эксперимент), переопределим скорость газовой смеси на выходе из кратера. В программном комплексе ANSYS Fluent было смоделировано течение природного газа и его смешение с эжектирующим окружающим воздухом, где в качестве расчетной области использовалась геометрия горелочного устройства, рассчитанного ранее (рис. 3).

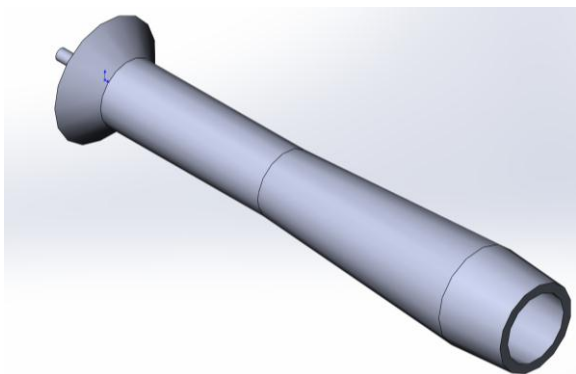


Рис. 3. Твёрдотельная модель горелочного устройства, рассчитанного по инженерной методике

Граничные условия также соответствуют исходным данным, использованным в инженерной методике для определения конструктивных размеров. В качестве модели турбулентности была выбрана  $k-\varepsilon$  Realizable с масштабируемой пристеночной функцией, позволяющая рассчитать заданное турбулентное течение с достаточной точностью. Константы модели заданы по умолчанию. По результатам вычислительного эксперимента были получены следующие данные:

- $w_c = 320.15 \text{ м/с}$  (рис. 4), (рис. 5) скорость истечения газа из сопла;
- максимальная скорость на выходе из кратера горелки  $w_3$  составила  $24.1 \text{ м/с}$  (рис. 6).

Завышенное значение скорости относительно допустимой на выходе из кратера ( $10 \div 20 \text{ м/с}$ ) говорит о необходимости оптимизации геометрии горелочного устройства.

Топологическую оптимизацию формы горелочного устройства можно провести с помощью ANSYS Fluent Adjoint Solver. Используя изначально полученное сошедшееся решение, Adjoint Solver вычисляет поля чувствительности геометрии заданной области, исходя из указанной целевой функции. Была проведена однокритериальная оптимизация

горелочного устройства, где в качестве целевой функции использовался поверхностный интеграл осредненный по массе полного давления на поверхности среза кратера. Оптимизация заключалась в минимизации полного давления для достижения допустимого скоростного режима. Так как в моделировании использовалась модель идеально несжимаемого газа, то оценить необходимую величину динамического давления можно по формуле Бернулли. В результате 6-ти итераций топологической оптимизации было получено снижение целевой функции, при которой максимальное значение скорости на срезе кратера горелки является допустимым  $w_3 = 15.4 \text{ м/с}$  (рис. 7).

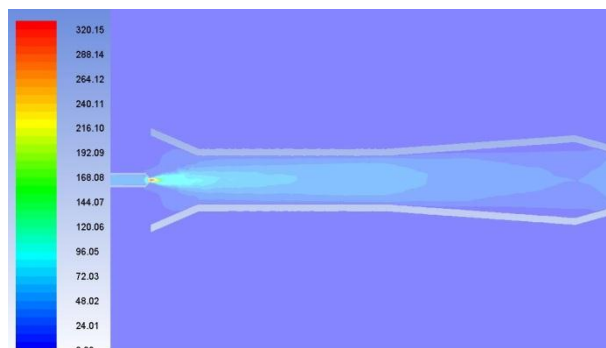


Рис. 4. Распределение поля скоростей газовой смеси в меридиональном сечении горелки

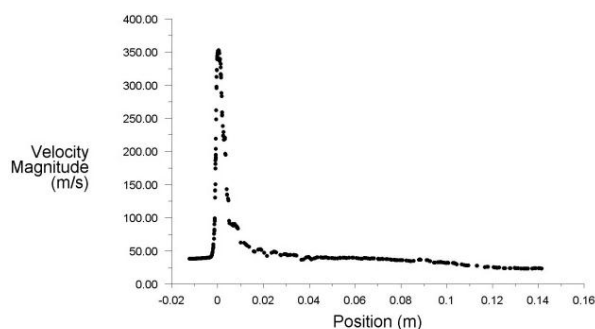


Рис. 5. Распределение скорости газовой смеси вдоль оси симметрии горелки

На рис. 8 представлена оптимизированная геометрия горелочного устройства, геометрию которой можно сохранить в формате STL.

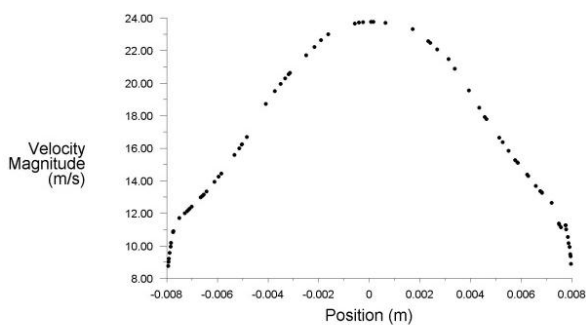


Рис. 6. Распределение скорости газовой смеси вдоль диаметра среза кратера горелки

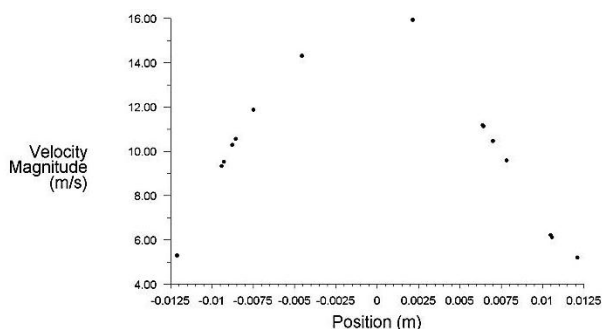


Рис. 7. Распределение скорости газовой смеси вдоль диаметра среза кратера горелки

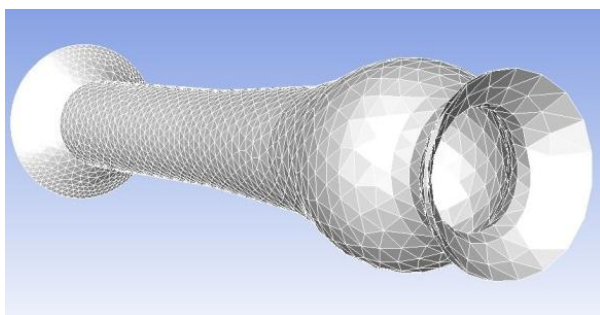


Рис. 8. Оптимизированная геометрия горелочного устройства

### Заключение

Представленный подход к расчету и оптимизации конструкции горелочного устройства возможно использовать при разработке ТЭГМ кольцевой геометрии для АИТТ с учетом расчета и моделирования горения природного газа. Помимо горелочного устройства АИТТ должен включать в себя следующие основные системы:

- система газораспределения, предназначенная для подключения к источнику природного газа и его распределения;
- автоматизированная система управления и измерения.

При этом ТЭГМ должен быть оборудован:

- ТБ кольцевой геометрии;
- системой нагрева, включая горелочное устройство;
- системой охлаждения

Планируется, что разрабатываемый АИТТ обеспечит отвод теплоты за счет использования замкнутого контура охлаждения с жидкостью, имеющей низкую температуру кипения. Это позволит эксплуатировать АИТТ в любых климатических зонах, в диапазоне температуры окружающей среды от минус 50 °С до плюс 40 °С. Работа такого АИТТ на основе ТЭГМ с кольцевой геометрией не будет воздействовать на экологию окружающей среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 (Договор № 03.G25.31.0246).

### Литература

1. Шостаковский П. Термоэлектрические источники альтернативного электропитания / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – СПб.: Издательство Файнстрит. – 2010. – № 12 (113) – С. 131–138.
2. Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств / А.И. Бурштейн. – М.: Физматгиз, 1962.
3. Виноградов С.В. Проектирование термоэлектрического генератора, работающего от теплоты выхлопных газов судовых дизелей / С.В. Виноградов, М.М. Горбачёв, К.Р. Халыков // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2010. – № 1 – С. 89–94.
4. Виноградов С.В. Применение термоэлектрических генераторов как средство утилизации сбросной теплоты судовых дизелей / С.В. Виноградов, К.Р. Халыков, Нгуен Конг Доан // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2011. – № 3 – С. 78–83.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
6. Беспалов Е.С. Разработка гибкого термоэлектрического модуля на основе кремнеземной стеклоткани и теллурида висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) / Е.С. Беспалов, А.Н. Головяшкин // Вестник ПГУ. – 2016. – № 2 (14) – С. 117–124.
7. Гусовский В.Л. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей / В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц, В.М. Тымчак. – М.: Металлургия, 1981.
8. Агеев М.А. Расчет газовых горелок / М.А. Агеев, Э.М. Атоян, Ю.В. Мусатов. – Саратов, 2006.
9. Горелочные устройства: отраслевой каталог. – М.: НИИЭИНФОРМЭнергомаш, 1982.

# OPTIMIZATION APPROACHES DETERMINATION IN THE DESIGN OF AN AUTONOMOUS CURRENT SOURCE BURNER DEVICE ON THE BASIS OF THE THERMOELECTRIC GENERATOR MODULE OF RING GEOMETRY

T.S. Timoshinova<sup>1</sup>, I.E. Sviridov<sup>2</sup>, D.P. Shmatov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: rd-vgtu@mail.ru

<sup>2</sup>Head of laboratory, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: rd-vgtu@mail.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: rd-vgtu@mail.ru

The development of modern equipment and technology, the expansion of the sphere of application of electricity is inextricably linked primarily with the search for new energy sources. At present, a very topical solution is the use of thermoelectric generator modules, which are part of autonomous current sources. Existing options for the use of thermoelectric generator modules are considered. Also, the article presents data on modern developments of nanostructured thermoelectric materials of a new generation that can increase the power and specific weight characteristics of thermoelectric generator modules. Based on the results of the review and analysis of modern approaches to the development and creation of autonomous thermoelectric current sources, a circuitry of the thermoelectric generator module of circular geometry was proposed. The main systems included in the autonomous current source are listed. A methodology for calculating a natural gas-fired device that can be used to design a thermoelectric generator module as a part of an autonomous current source was developed and topological optimization of the design was carried out using computer simulation in the ANSYS Fluent software complex using Adjoint Solver, during which the probability of flame separation from the gas-burning device's crater was minimized by observing the permissible speed regime of the gas-air mixture

Key words: thermobattery, thermoelectric generator, Seebeck effect, autonomous current sources, gas burner, topology optimization

## References

1. Shostakovskiy P. "Thermoelectric sources of alternative power supply" ("Termoelektricheskiye istochniki al'ternativnogo elektropitaniya"), Components and technologies, SPb, Publishing house FineStreet, 2010, no. 12 (113), pp.131-138.
2. Burshtein A.I. "The physical basis for calculation of semiconductor thermoelectric devices" ("Fizicheskiye osnovy rascheta poluprovodnikovyykh termoelektricheskikh ustroystv"), Moscow, Fizmatgiz, 1962.
3. Vinogradov S.V., Gorbachyev M.M., Halykov K.R. "Design of a thermoelectric generator operating on the heat of exhaust gases of marine diesel engines", The Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology, 2010, no. 1, pp. 89-94.
4. Vinogradov S.V., Halykov K.R., Nguyen Cong Doan "Application of thermoelectric generators as a means of utilization of waste heat of marine diesel engines", The Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine equipment and technology, 2011, no. 3, pp. 78-83.
5. Kutateladze S.S. "Fundamentals of heat transfer theory" ("Osnovy teorii teploobmena"), Moscow, Atomizdat, 1979, 416 p.
6. Bespalov E.S., Golovyashkin A.N. "Development of a flexible thermoelectric module based on silica fabric glass and bismuth telluride (Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>)", Bulletin of the PSU, 2016, no. 2 (14), pp. 117-124.
7. Gusovskiy V.L., Lifshits V.L., Tymchak A.E. "Burning devices of heating and thermal furnaces", Moscow, Metallurgiya, 1981.
8. Ageev M.A., Atonyan E.M., Musatov U.V. "Calculation of gas burners", Scientific and Technical Library of the SGTU, 2006.
9. "Burners: industrial catalog", Moscow, NIIEINFORMEnergomash, 1982.

## ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

© 2017 В.П. Поваров, М.Б. Бакиров, А.Д. Данилов

В статье рассмотрена система многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов ядерных установок, относящаяся к программно-аппаратным техническим комплексам обеспечения надежности и безопасности объектов повышенной опасности. Практический результат применения системы – возможность осуществления текущей диагностики технического состояния объекта контроля в части оценки целостности металла. Оценка напряженно-деформированного состояния разрушающегося элемента строится на базе трехмерной конечно-элементной модели, расчетное ядро которой калибруется по данным натурных измерений, полученных с дополнительно установленных в критических зонах контрольных датчиков. Программа для расчетно-экспериментального анализа нагруженности и живучести контролируемой критической зоны является центральным ядром системы непрерывного мониторинга. Накопленная за определенный промежуток времени база знаний по поведению мониторируемого оборудования в различных режимах эксплуатации и соответствующий комплексный анализ напряженно-деформированного состояния и поведения дефектности позволяют разработать эффективные компенсирующие мероприятия

Ключевые слова: мониторинг, критические элементы, диагностика, напряженно-деформируемое состояние, параметры нагружения, конечно-элементная модель, база знаний

### Введение

Система многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов ядерных установок относится к программно-аппаратным техническим комплексам обеспечения надежности и безопасности объектов повышенной опасности, в частности атомных электростанций (АЭС).

Накопленный опыт эксплуатации показывает, что существуют критические элементы (узлы, зоны, сварные соединения), склонные к повышенной повреждаемости в условиях действия высоких эксплуатационных нагрузок, в том числе непроектных, и негативного влияния окружающей среды. При наличии таких динамично развивающихся эксплуатационных повреждений в критических элементах АЭС в опасных с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации энергоблока зонах, главной задачей становится поиск коренных причин дефектообразования и исключение повторения подобных случаев в будущем. В такой ситуации возникает опасность нарушения целостности оборудования при работе энергоблока на мощности с появлением течи теплоносителя и перспективой развития исходного сквозного дефекта до критических размеров.

Именно в таких случаях в качестве эффективной компенсирующей меры предлагается использовать предлагаемое техническое решение, заключающееся в многопараметрическом непрерывном мониторинге эксплуатационной повреждаемости критических элементов оборудования.

### Постановка задачи

Анализ различных случаев повреждений показывает, что при этом, как правило, сказывается влияние всевозможных конструктивных особенностей оборудования, вариативности параметров термосилового нагружения, комплексности повреждающих факторов. Комплексная причина повреждений схематично может быть продемонстрирована модифицированной диаграммой Вена (The Venn diagram) (см. рис. 1). Но, несмотря на это, конечный наблюдаемый результат всегда один – образование и развитие эксплуатационной трещины, представляющей собой угрозу конструкционной целостности рассматриваемого элемента. Именно на такие трещины главным образом и должны быть ориентированы системы непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости как наиболее эффективные средства, позволяющие сделать процесс образования и роста дефектов в критической зоне контролируемым во времени. Главное преимущество подобных систем – их универсальность, благодаря чему они могут быть легко адаптированы для мониторинга практически любой проблемной зоны любого оборудования, включая трубопроводы.

Поваров Владимир Петрович – НВАЭС, канд. техн. наук, директор, e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru  
Бакиров Мурат Баязитович – ООО «НСУЦ “ЦМиР”», д-р техн. наук, генеральный директор, e-mail: info@expresstest.ru  
Данилов Александр Дмитриевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

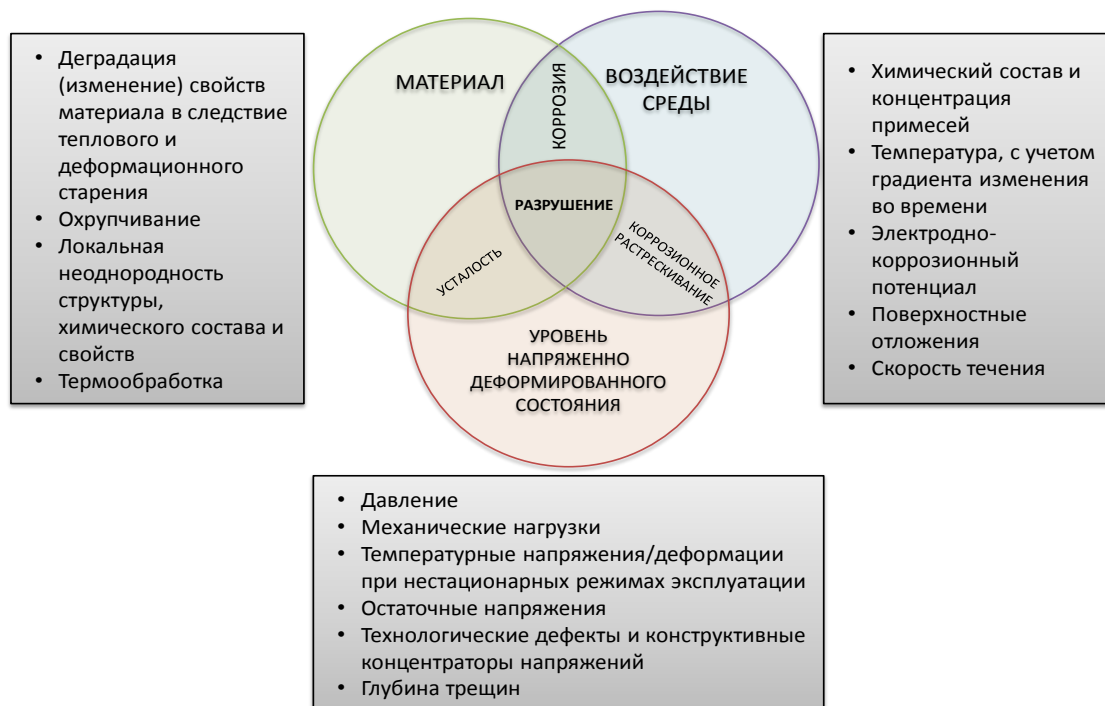


Рис. 1. Схема анализа механизмов эксплуатационных повреждений оборудования АЭС

### Система мониторинга

Практический результат применения системы мониторинга - возможность осуществления текущей диагностики технического состояния объекта контроля в части оценки целостности металла. Кроме этого, повышается точность определения напряжений в объекте контроля, так как точность конечно-элементного расчета по откалиброванной по данным фактических измерений деформации и перемещения выше точности расчета по аппроксимирующим формулам, следовательно, оценка напряженно-деформированного состояния более объективная, поскольку расчет строится на базе трехмерной конечно-элементной модели, расчетное ядро которой калибруется по данным натурных измерений.

При этом все датчики соединены каналами связи с модулем сбора и первичной обработки данных, связанных с блоком хранения и передачи данных с установленным на нем программным обеспечением, позволяющим осуществлять дистанционно в автоматическом ре-

жиме управление системой, включая сбор, хранение и передачу данных, отображение и экспресс-анализ контролируемых параметров в режиме реального времени. Расчетный модуль включает трехмерную конечно-элементную модель и выполнен с возможностью сопоставления данных мониторинга образования и развития дефектов эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции в режиме реального времени с текущим состоянием оборудования и эксплуатационными режимами его работы. Структурная схема предлагаемой системы многопараметрического непрерывного мониторинга представлена на рис. 2.

### Калибровка модели

Расчетное ядро трехмерной конечно-элементной модели выполнено с возможностью калибровки по данным измерений, полученных дополнительно с контрольных датчиков, установленных в критических зонах.



Рис. 2. Структурная схема системы многопараметрического непрерывного мониторинга



Рис. 3. Алгоритм калибровки трехмерной конечно-элементной модели



С учетом многофункциональности задач, выполняемых системой многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС, и с целью унификации отдельных конструктивных блоков в системе могут быть применены в качестве базы ее построения многоканальные микропроцессорные измерительные модули, в том числе и на шасси National Instruments, собранные в единый комплекс. Блок хранения и передачи данных представляет собой промышленный высокопроизводительный сервер, выполняющий функции хранения и резервирования данных. Через блок хранения и передачи данных при помощи программного обеспечения осуществляется дистанционное управление системой многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС, включая контроль параметров окружающей среды, периодическую проверку работоспособности подсистем и их измерительных каналов, а также сбор, хранение и передачу данных. Все данные мониторинга записываются в автоматическом режиме и затем по линии Internet передаются в удаленный аналитический центр для обработки и детального анализа.

Параллельно с получением диагностических данных, записываемых системой непрерывного мониторинга, также выполняется расчетно-экспериментальное обоснование прочности и долговечности критической зоны на базе трехмерной конечно-элементной расчетной модели. Программа для расчетно-экспериментального анализа нагруженности и живучести контролируемой критической зоны является центральным ядром системы непрерывного мониторинга. Трехмерная конечно-элементная расчетная модель содержит узлы в зонах размещения контрольных датчиков системы непрерывного мониторинга, в которых расчетные данные могут сравниваться с данными измеренных значений контролируемых параметров. Укрупненный алгоритм калибровки трехмерной конечно-элементной модели представлен на рис. 3.

Калибровка модели производится путем сравнения расчетных данных и измеренных параметров в различных эксплуатационных режимах работы и при различных уровнях нагружения объекта контроля. В качестве параметров нагружения объекта контроля берутся фактические данные по давлениям и температурам, регистрируемые штатными датчиками реакторной установки, также датчиками систе-

мы непрерывного мониторинга. Если удовлетворительное совпадение расчетных и измеренных параметров не получено, то выполняется доработка расчетной программы, уточнение геометрии объекта контроля, сгущение конечно-элементной сетки в определенных зонах, корректировка граничных условий и др. с целью совершенствования расчетного ядра. Как правило, после нескольких подобных итераций достигается совпадение расчетных и измеренных параметров, что свидетельствует о работоспособности конечно-элементной модели и адекватности моделирования процессов нагружения при прохождении различных эксплуатационных режимов.

После отладки и калибровки модели расчетное ядро включается в параллельную работу совместно со сбором данных мониторинга. Работа системы мониторинга позволяет в режиме реального времени оценивать место образования и кинетику развития эксплуатационных дефектов, а посредством расчетного анализа имеется возможность получать картину распределения напряжений в зоне мониторинга в любой момент времени на основе фактических параметров нагружения. В конечном итоге это позволяет оценить фактическую накопленную повреждаемость с учетом зафиксированных циклов эксплуатационного нагружения, а также дать обоснованный прогноз по долговечности и живучести объекта мониторинга. Таким образом, в процессе мониторинга собирается вся история нагружения. Помимо этого, все события, фиксируемые системой многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования АЭС, сопоставляются с эксплуатационными режимами, имеющими место в рассматриваемый момент времени, их характеристиками, технологическими особенностями. Это позволяет получить устойчивую обратную связь зависимости поведения дефектности металла от технологических факторов и параметров и установить причинно-следственные связи, отвечающие за образование и рост дефектов.

### **Заключение**

Накопленная за определенный промежуток времени база знаний по поведению monitored оборудования в различных режимах эксплуатации и соответствующий комплексный анализ напряженно-деформированного состояния и поведения дефектности позволяют разработать эффективные компенсирующие мероприятия, направленные

на снижение влияния основных повреждающих факторов и повышение долговечности объекта мониторинга.

#### Литература

1. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных станций / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, А.Ф. Громов, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2014. - № 3. - С. 15-24.
2. Анализ эксплуатационной нагруженности узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ-1000М при нестационарных термосиловых воздействиях / М.Б. Бакиров, А.С. Киселев, В.И. Левчук, В.П. Поваров, А.Ф. Громов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 6. - С. 111-117.
3. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла ответственного оборудования атомных

станций / М.Б. Бакиров, В.П. Поваров, А.Ф. Громов, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2014. - № 3. - С. 15-24.

4. Расчетно-экспериментальная оценка влияния термической стратификации на эксплуатационную нагруженность дыхательного трубопровода энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, О.В. Уразов, М.Б. Бакиров, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. - 2017. - № 1. - С. 5-16.

5. Данилов А.Д. Цифровые системы управления / А.Д. Данилов, В.Н. Головнев. - Воронеж: ВГЛТА, 2007. - 235 с.

6. Данилов А.Д. Микропроцессорные элементы и устройства локальной автоматики / А.Д. Данилов. - Воронеж: ВГЛТА, 2005. - 267 с.

7. Данилов А.Д. Технические средства автоматизации / А.Д. Данилов. - Воронеж: ВГЛТА, 2007. - 340 с.

8. Данилов А.Д. Математическое обеспечение распределенных вычислений гетерогенных динамических параметров систем в режиме реального времени / А.Д. Данилов, А.В. Пилич. - Воронеж: ВГТУ, 2015. - 160 с.

Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

ООО «Научно-сертификационный учебный центр материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники «Центр материаловедения и ресурса»», г. Жуковский  
Воронежский государственный технический университет

## PROGRAM-TECHNICAL COMPLEX OF CONTINUOUS MONITORING OF OPERATING DAMAGE TO EQUIPMENT OF NUCLEAR ENERGY INSTALLATIONS

**V.P. Povarov<sup>1</sup>, M.B. Bakirov<sup>2</sup>, A.D. Danilov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Director, The branch of JSC "Concern Rosenergoatom" "Novovoronezh nuclear power plant", Novovoronezh, Russian Federation,

e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Director, "Center of materials and resource", Moscow, Russian Federation,  
e-mail: info@expresstest.ru

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: danilov-ad@yandex.ru

The article deals with the system of multi-parameter continuous monitoring of operational damageability of critical elements of nuclear installations, which relates to software and hardware technical systems for ensuring the reliability and safety of high-risk facilities. The practical result of the application of the system is the possibility of realizing the current diagnostics of the technical condition of the control object with regard to the evaluation of the integrity of the metal. The evaluation of the stressed-deformed state of the collapsing element is based on a three-dimensional finite element model, the calculated core of which is calibrated according to the field measurements obtained from additional control sensors installed in critical areas. The program for calculation and experimental analysis of the loading and survivability of the controlled critical zone is the central core of the continuous monitoring system. Accumulated for a certain period of time, the knowledge base on the behavior of the monitored equipment in various operating modes and the corresponding complex analysis of the stress-strain state and the behavior of defectiveness make it possible to develop effective compensating measures

Key words: monitoring, critical elements, diagnostics, stress-strain state, loading parameters, finite element model, knowledge base

#### References

1. Bakirov M. B., Povarov V. P., Gromov A. F., Levchuk V.I. "Development of the technology of continuous acoustic-emission monitoring of the operational damageability of the metal of the critical equipment of nuclear power plants", *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*, 2014, no. 3, pp. 15-24.



2. Bakirov, M. B., Kiselev A. S., Levchuk V. I., Povarov V. P., Gromov A.F. "Analysis of the operational loading of the collector welding unit to the branch pipe of the steam generator PGV-1000M under non-stationary thermal-force impacts", The Bulletin of Voronezh State Technical University, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 111-117.
3. Bakirov M. B., Povarov V. P., Gromov A. F., Levchuk V. I. "Development of the technology of continuous acoustic-emission monitoring of the operational damageability of the metal of the critical equipment of nuclear power plants", Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika, 2014, no. 3, pp. 15-24.
4. Povarov V. P., Urazov O. V., Bakirov M. B., Levchuk V. I. "Calculation and experimental estimation of the effect of thermal stratification on the operational loading of the respiratory pipeline of the 5th unit of the Novovoronezh NPP", Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika, 2017, no. 1, pp. 5-16
5. Danilov A. D., Golovnev V. N. "Digital control system" ("Tsifrovye sistemy upravleniya"), Voronezh, Voronezh State Forestry Engineering University Named after G.F. Morozov, 2007, 235 p.
6. Danilov A. D. "Microprocessor elements and devices of local automatic" ("Mikroprotsessornye elementy i ustroystva lokal'noy avtomatiki"), Voronezh, Voronezh State Forestry Engineering University Named after G.F. Morozov, 2005, 267 p.
7. Danilov A. D. "Technical means of automation" ("Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii"), Voronezh, Voronezh State Forestry Engineering University Named after G.F. Morozov, 2007, 340 p.
8. Danilov A. D., Pileich A. V. "Software for distributed computing of heterogeneous dynamic parameters of the system in real time" ("Matematicheskoe obespecheniye raspredelennykh vychisleniy geterogennykh dinamicheskikh parametrov sistem v rezhime real'nogo vremeni"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2015, 160 p.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА УСИЛИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ АЦП

© 2017 В.С. Кононов, С.И. Рембеза

В работе описана техника калибровки усилителей различного типа, применяемых при создании аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Рассматриваемая техника предназначена для калибровки усилителей в режиме удаленного доступа при длительной эксплуатации АЦП в «жестких» условиях, когда из-за эффектов естественного старения полупроводникового материала и его деградации под воздействием внешней среды характеристики усилителей могут претерпевать значительные изменения. Предложенная техника калибровки основана на использовании аппаратных средств, обеспечивающих автоматическую калибровку напряжения смещения на входах усилителей и синфазного напряжения на их выходах. Отмечено, что применение этой техники в отличие от наиболее распространенной лазерной подгонки и электрического программирования плавких перемычек не приводит к снижению ресурса работоспособности АЦП и поэтому она востребована в первую очередь при создании конвейерных АЦП, которые преобладают в производстве современных преобразователей. Предложенные технические решения для построения аппаратных средств основаны на использовании набора защелок D- и SR-типов, генераторов одиночных импульсов, дешифраторов, программируемых токовых зеркал и делителей напряжения, которые позволяют эмулировать процесс калибровки путем автоматического изменения 4-разрядного кода, генерируемого внутри кристалла АЦП, а затем после подбора необходимых значений компенсационного тока смещения или коммутирующего напряжения зафиксировать этот код. Отмечено, что применение рассмотренных аппаратных средств не приводит к существенному увеличению площади кристалла АЦП

Ключевые слова: калибровка, усилитель, напряжение, смещение

### Введение

В АЦП используются несколько типов усилителей, в том числе буферные усилители, предварительные усилители в составе компараторов, разностные усилители сигналов «остатков» и другие усилители [1]. Как и большинство известных аналоговых устройств усилители обладают повышенной чувствительностью характеристик к технологии изготовления и режимам эксплуатации, особенно при эксплуатации в «жестких» условиях, когда из-за эффектов естественного старения полупроводникового материала и его деградации под воздействием внешней среды характеристики усилителей могут значительно измениться.

Для их стабилизации применяются различные аппаратные средства и специальные интерфейсы, которые позволяют осуществлять калибровку в условиях удаленного доступа [2 - 4].

Особый интерес представляет создание аппаратных средств для калибровки конвейерных АЦП, в которых используется наибольшее число усилителей по сравнению с другими типами АЦП и по этой причине требуется повышенное внимание к реализации таких средств

без значительного увеличения площади кристалла.

В данной статье описывается один из возможных подходов к созданию средств автоматической калибровки напряжения смещения и синфазного напряжения на выходе усилителя. Калибровка этих характеристик наиболее востребована при создании конвейерных АЦП.

### Описание техники калибровки

Для иллюстрации предлагаемого подхода воспользуемся блок-схемой двухкаскадного дифференциального усилителя, наиболее часто используемого при вычислении сигнала «остатка» (рис. 1).

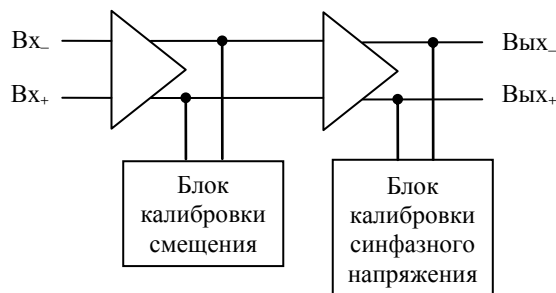


Рис. 1. Блок-схема двухкаскадного усилителя

Калибровка смещения осуществляется по схеме (рис. 2), которая позволяет зафиксировать знак смещения, а затем с помощью токового дешифратора обеспечивает подбор необходимой величины тока для компенсации этого смещения.

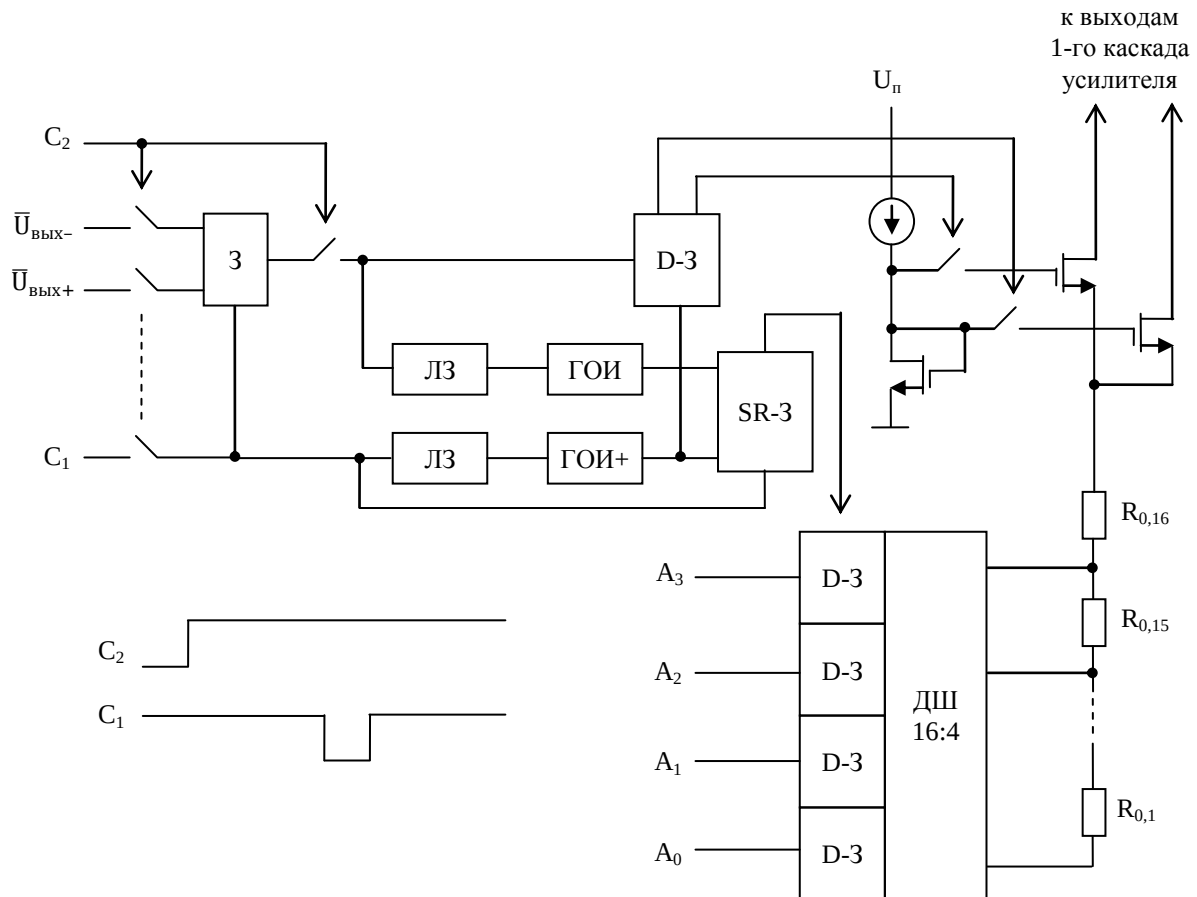


Рис. 2. Блок калибровки смещения:

3 – высокочувствительная защелка; ЛЗ – линия задержки; ГОИ, ГОИ+ – генераторы одиночных импульсов, срабатывающие по обоим фронтам входного сигнала (ГОИ) или только по переднему фронту (ГОИ+); D-3, SR-3 – тактируемые защелки D- и SR-типов; ДШ – токовый дешифратор;  $R_{0,1}$ – $R_{0,16}$  – токозадающие резисторы;  $A_0$ – $A_3$  – код калибровки;  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}+}$ ,  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}-}$  – средние значения напряжений на выходах усилителя;  $C_1$  – тактовый сигнал;  $C_2$  – сигнал выборки;  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания

Процесс калибровки смещения производится при  $C_2 \equiv 1$ . По импульсу  $C_1 \equiv 0$  высокочувствительная защелка 3 и верхняя защелка D-3 последовательно устанавливаются в состояния, определяемые средними напряжениями  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}+}$ ,  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}-}$  на выходах усилителя (рис. 1), при которых открывается один из двух транзисторов, подключенных к выходам первого каскада этого усилителя. В исходном состоянии напряжение на стоке открытого транзистора будет выше по сравнению с напряжением на стоке закрытого транзистора.

После этого через открытый транзистор пропускается компенсационный ток, который подбирается изменением кода  $\{A_0, A_1, A_2, A_3\}$ . В результате напряжение на стоке открытого транзистора будет постепенно снижаться, приводя к выравниванию  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}+}$ ,  $\bar{U}_{\text{ВЫХ}-}$ .

При смене знака разности этих напряжений защелки 3 и SR-3 переключатся, после чего защелки D-3 на входе токового дешифратора перейдут в режим хранения текущего кода,

фиксируя таким образом состояние дешифратора. На этом процесс калибровки смещения завершается.

Калибровка синфазного напряжения осуществляется по схеме (рис. 3), которая имеет некоторые отличия от схемы (рис. 2), но техника калибровки при этом сохраняется.

Как и в первом случае по импульсу  $C_1 \equiv 0$  при  $C_2 \equiv 1$  защелка 3 и левая защелка D-3 устанавливаются в состояния, определяемые синфазным напряжением  $U_{\text{сфф}}$  на выходе усилителя до калибровки и опорным напряжением  $U_{\text{сфоп}}$ , которому должно равняться синфазное напряжение после калибровки.

Так как выход упомянутой защелки соответствует старшему разряду кода  $\{A_0, A_1, A_2, A_3\}$ , то при  $A_3 \equiv 0$  напряжение на выходе схемы будет снижаться с ростом значения этого кода, а при  $A_3 \equiv 1$ , наоборот, повышаться.

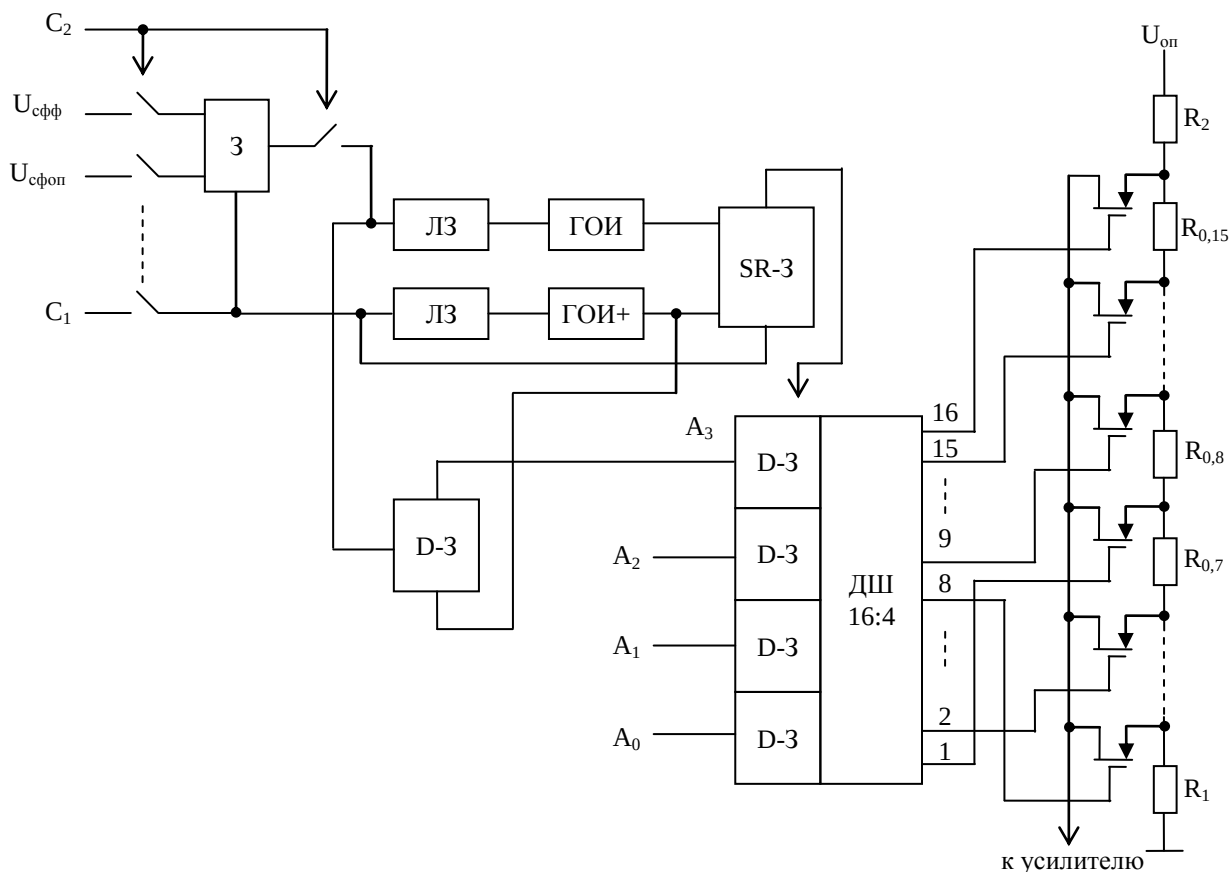


Рис. 3. Блок калибровки синфазного напряжения:  
 $R_{0,1}-R_{0,15}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  – делитель напряжения;  $U_{сфф}$ ,  $U_{сфоп}$  – фактическое и опорное синфазные напряжения;  $U_{оп}$  – опорное напряжение

В итоге  $U_{сфф}$  устремляется к  $U_{сфоп}$  и при смене знака разности этих напряжений защелки 3 и SR-3 переключаются, приводя к фиксации состояния ДШ и установлению равенства  $U_{сфф} = U_{сфоп}$ . Отметим, что в схеме (рис. 3) используется токовый дешифратор с подтягивающими активными нагрузками (на рисунке не показаны). Этим он отличается от аналогичного дешифратора на рис. 2.

Для упрощения анализа в схемах (рис. 2, 3) были использованы собственные высокочувствительные защелки. На практике, когда количество усилителей в конвейере АЦП может достигать нескольких десятков, рациональнее использовать одну общую защелку такого типа для калибровки всех усилителей. В этом случае схема включения защелки будет выглядеть, как показано на рис. 4.

Рассмотренный подход сохраняется и при калибровке смещения входных компараторов. Для этого опорные входы дифференциальных предусилителей, входящих в состав компараторов, подключаются к выходам схем, аналогичных схеме (рис. 3), а в схему (рис. 4) добавляются цепи выборки предусилителей.

Сам процесс калибровки мало чем отличается от процесса калибровки смещения усилителя (рис. 1) и поэтому не требует отдельного рассмотрения.

В заключение следует отметить, что, несмотря на кажущуюся сложность схем (рис. 2, 3), их интегрирование на кристалле АЦП не приводит к существенному увеличению занимаемой площади по сравнению с размещением элементов для лазерной подгонки и электрического пережигания плавких перемычек.

Использование рассмотренной техники калибровки направлено на сохранение максимально-возможного ресурса работоспособности микросхем и в этом заключается ее основное достоинство [5].

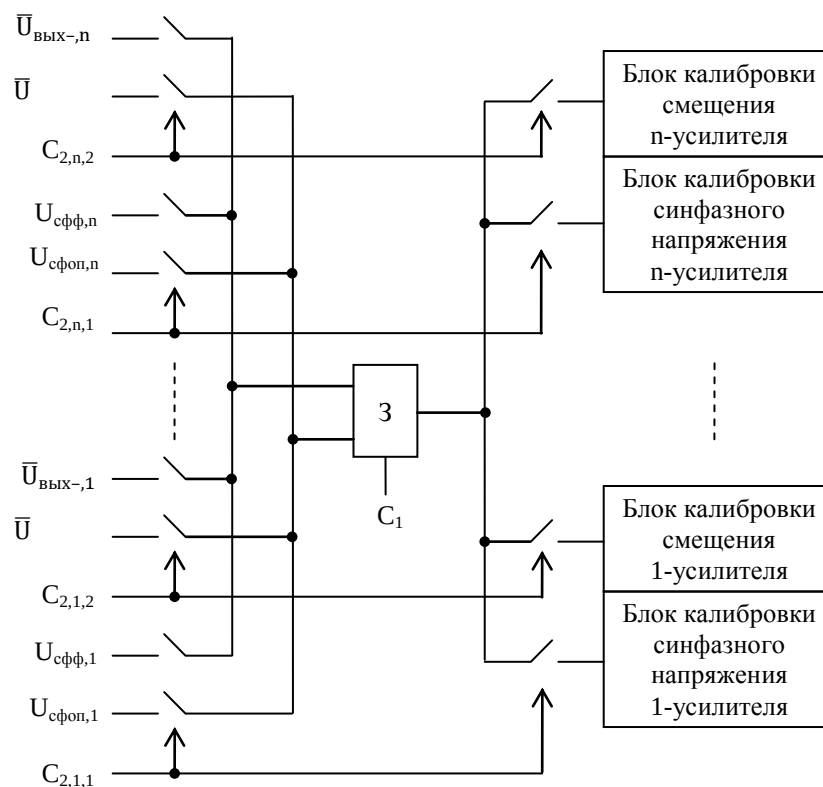


Рис. 4. Схема использования общей высокочувствительной защелки при калибровке  $n$  усилителей

### Выводы

1. Предложенные технические решения позволяют с помощью набора защелок D- и SR-типов, генераторов одиночных импульсов, дешифраторов и программируемых токовых зеркал и делителей напряжения эмулировать процесс калибровки путем автоматического изменения 4-разрядного кода, генерируемого внутри кристалла АЦП, а затем после подбора необходимых значений компенсационного тока смещения или коммутирующего напряжения зафиксировать этот код. В итоге обеспечивается автоматическая калибровка усилителей всех типов в составе АЦП, а их интегрирование на кристалле не приводит к существенному увеличению занимаемой площади.

2. Рассмотренная техника калибровки не снижает ресурс работоспособности микросхем в отличие от лазерной подгонки и электрического пережигания плавких перемычек.

3. Предложенная техника автоматической калибровки усилителей в составе КМОП-АЦП,

основанная на анализе специфики работы основных блоков с учетом воздействия различных производственных и эксплуатационных факторов, отличается высокой эффективностью и может быть реализована доступными схемотехническими средствами.

### Литература

1. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер; пер. с англ. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера. – 2007. – 1016 с.
2. Rudy van de Plassche. CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters / Rudy van de Plassche. – Kluwer academic publishers, 2003. – 588 p.
3. Hendrik van der Ploeg. Calibration Techniques in Nyquist A/D Converters / Hendrik van der Ploeg, Bram Nauta. – Springer, 2006. – 190 p.
4. Tseng C.-J. A 10-b 320-Ms/s Stage-Gain-Error Self-Calibration Pipeline ADC / C.-J. Tseng, H.-W. Chen, W.-T. Shen and en // IEEE J. Solid-State Circuits. – 2009. – Vol. 44. – № 11. – P. 3039-3050.
5. Кононов В. Импортзамещение АЦП и ЦАП: ограничения и возможности / В. Кононов, Д. Боднарь // Компоненты и технологии. – 2017. – № 8. – С. 24-26.

АО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж  
Воронежский государственный технический университет

# **AUTO-CALIBRATION OF AMPLIFIERS IN ADC**

**V.S. Kononov<sup>1</sup>, S.I. Rembeza<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD, engineer-constructor, Public Corporation "Special Design Engineering Department", Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: casandra1983@mail.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
tel: +7(473)243-76-95

The calibration technique of amplifiers of various types used in creating analog-to-digital converters (ADCs) is described in the article. The technique is designed to calibrate amplifiers in the remote access mode during long-term operation of the ADC under "hard" conditions, when due to the effects of natural aging of the semiconductor material and its degradation under the influence of the external environment, the characteristics of the amplifiers can undergo significant changes. The proposed calibration technique is based on the use of hardware that provides automatic calibration of bias voltage at the inputs of amplifiers and common-mode voltage at their outputs. It is noted that the application of this technique, unlike the most common laser fitting and electrical programming of fusible links, does not lead to a decrease in the service life of an ADC, and therefore it is in demand first of all for the creation of conveyor ADCs, which predominate in the production of modern converters. The proposed technical solutions for building hardware are based on the use of a set of D- and SR-type latches, single pulse generators, decoders, programmable current mirrors and voltage dividers, which allow to emulate the calibration process via automatically changing the 4-digit code generated inside the ADC crystal, and then, after selecting the necessary values of the compensation bias current or commutating voltage, fix this code. It is noted that the use of the discussed hardware does not lead to a significant increase in the area of the ADC crystal

Key words: calibration, amplifier, bias, voltage

## **References**

1. Kester W. "Analog-digital conversion", Rus.ed., Moscow, Technosphaera, 2007, 1016 p.
2. Rudy van de Plassche "CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters", Kluwer academic publishers, 2003, 588 p.
3. Hendrik van der Ploeg "Calibration Techniques in Nyquist A/D Converters", Bram Nauta, Springer, 2006, 190 p.
4. Tseng C.-J., Chen H.-W., Shen W.-T. "A 10-b 320-Ms/s Stage-Gain-Error Self-Calibration Pipeline ADC", IEEE J. Solid-State Circuits, 2009, vol. 44, no.11, pp. 3039-3050.
5. Kononov V., Bodnar' D. "Import replacement of ADC and DAC: limitations and possibilities", Components & Technologies, 2017, no.8, pp. 24-26.

## УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ОПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

© 2017 Н.Н. Кошелева, А.Б. Буслаев, С.И. Рембеза

В работе описывается устройство на основе микроконтроллера, обеспечивающее формирование текста, закодированного по азбуке Морзе. Предложенное устройство способно формировать одно-, двух-, трехбуквенный опознавательный сигнал. Цикл следования опознавательных сигналов – 15, 30 или 60 сек. Применение устройства позволяет реализовать формирование опознавательного сигнала на новой элементной базе при минимальных массогабаритных и энергетических показателях. Устройство содержит микропроцессорную систему, панель управления, выходные каскады ФОС (формирование опознавательного сигнала) и схему контроля ФОС. Формирование опознавательного сигнала осуществляется в микропроцессорной системе (МПС) в соответствии с программой, записанной в ее память. МПС может быть реализована на основе микроконтроллера, характерной особенностью структуры которого является размещение на одном кристалле с центральным процессором внутренней памяти и большого набора периферийных устройств (порты ввода-вывода данных, программируемые интервальные таймеры, АЦП, ЦАП). Применение предложенного устройства ФОС позволяет уменьшить количество функциональных узлов в устройстве, а также обеспечивает увеличение вероятности безотказной работы устройства. В работе приведена принципиальная схема ФОС на основе микроконтроллера, а также алгоритм работы микроконтроллера в плате ФОС

Ключевые слова: микроконтроллер, опознавательный сигнал, радиопривод, микропроцессорная система

### Введение

В настоящее время аэродромы оснащены новейшими летательными аппаратами (ЛА) и сложными радиотехническими комплексами, обеспечивающими выполнение авиацией всех видов задач в любых метеоусловиях. Особую роль в выполнении этих задач играют наземные средства радиотехнического обеспечения (РТО). Основу РТО составляет радиолокационная система посадки (РСП), радиотехническая система ближней навигации (РСБН), инструментальные системы посадки (ИСП), приводные радиостанции (ПРС), автоматические радиопеленгаторы (АРП) и светотехнические средства.

Сущность РТО состоит в формировании и своевременной выдаче на борт самолетов информации, необходимой экипажу для определения своего места в воздушном пространстве. Средства РТО решают две «глобальные» задачи: обеспечение самолетовождения и обеспечение посадки ЛА [1].

Организация самолетовождения во многом зависит от максимальной дальности перелетов, а также от точности определения места ЛА с помощью средств РТО.

Для обеспечения самолетовождения в РТО используются следующие системы [2]:

- система радиопривода на средних волнах;

- наземные радиопеленгаторы (КВ, УКВ, ДЦВ диапазонов);
- РСБН;
- светотехнические средства.

### Постановка задачи

К системе радиопривода относятся автоматизированная приводная аэродромная радиостанция ПАР-10МС [3], предназначенная для привода летательного аппарата в район аэродрома и размещается на дальнем радиоприводном маркерном пункте (ДПРМ) или ближнем приводном маркерном пункте (БПРМ).

Основной аппаратурой приводной радиостанции является два полуконспекта передатчиков, блок автоматики, промежуточный контур и антенно-согласующее устройство.

Плата формирования опознавательного сигнала (ФОС), входящая в блок передатчиков, предназначена для формирования одно-, двух- и трехбуквенного опознавательного сигнала, закодированного по азбуке Морзе из любых 32 букв русского или 26 букв латинского алфавита и выдаваемого за один цикл.

Цикл следования опознавательных сигналов 15, 30, или 60 с.

Опознавательный сигнал кода Морзе имеет следующие временные характеристики:

- длительность точки ( $t_{тч}$ ) составляет 200 мс;
- длительность тире ( $t_{тр}$ ) составляет 600 мс;
- длительность паузы между буквами ( $t_{пб}$ ) 600 мс;

Кошелева Наталья Николаевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vstu-ppr@yandex.ru

Буслаев Алексей Борисович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, e-mail: vstu-ppr@yandex.ru

Рембеза Станислав Иванович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: rembeza@yandex.ru

– длительность паузы между повторениями сигналов в одном цикле ( $t_{\text{ин}}$ ) составляет 1000мс.

Устройство ФОС содержит дешифратор кода набора и коммутатор адреса постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), схему управления коммутатором адреса ПЗУ, счетчик букв, интегральный программатор опознавательных сигналов (ОС), три микросхемы ПЗУ, формирователь последовательности кода Морзе, формирователь пауз, смеситель ОС и пауз, задающий генератор, делитель с постоянным коэффициентом деления (ДПКД), схему управления делителем, делитель с переменным коэффициентом деления (ДПрКД), формирователь импульсов запуска, схему контроля ФОС и выходные каскады ФОС.

Выбор букв опознавательного сигнала, длительность циклов и количество букв в ОС производятся на панели управления с помощью переключателей. Сигнал с заданной частотой поступает на ДПКД с двумя коэффициентами деления. Вновь образуемые два сигнала используются для формирования значения времени цикла ДПрКД и в качестве тактовой частоты управляющей формирователем последовательности кода Морзе, формирователем пауз, смесителем ОС и пауз, а также формирователем импульсов запуска. Набор формируемых ОС и соответствующие этим буквам двоичные коды, количество элементарных посылок записаны в трех микросхемах ПЗУ. По команде со схемы управления коммутатором адреса ПЗУ, дешифратор кода набора и коммутатор адреса ПЗУ осуществляет выбор адреса ПЗУ, с которого ОС поступает на формирователь последовательности кода Морзе, с выхода которого ОС поступает на смеситель ОС и пауз, а затем в выходные каскады ФОС и далее на выход.

Недостаток данного устройства заключается в том, что для реализации заданной последовательности ОС, с определенным циклом повторения, используется более 10 функциональных узлов каждый из которых выполняет отдельную задачу, что приводит к уменьшению вероятности безотказной работы устройства.

### Реализация задачи

Целью работы является разработка устройства формирования опознавательных сигналов на основе микроконтроллера семейства AVR. Применение микроконтроллера позволяет осуществлять обработку информации программным способом при минимальных массогабаритных и энергетических показателях [4].

Следовательно, разработка ФОС на основе микроконтроллера является актуальным решением.

На рис. 1 показана структурная схема ФОС на основе микропроцессорной системы.

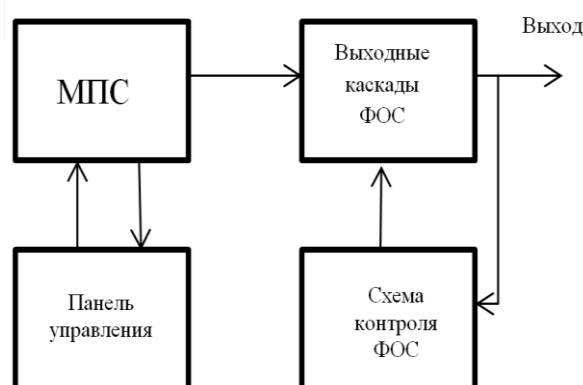


Рис. 1. Структурная схема устройства ФОС на основе микропроцессорной системы

Устройство содержит микропроцессорную систему, панель управления, выходные каскады ФОС и схему контроля ФОС. Формирование опознавательного сигнала осуществляется в микропроцессорной системе (МПС) в соответствии с программой, записанной в ее память. МПС может быть реализована на основе микроконтроллера, характерной особенностью структуры которого является размещение на одном кристалле с центральным процессором внутренней памяти и большого набора периферийных устройств (порты ввода-вывода данных, программируемые интервальные таймеры, АЦП, ЦАП) [5].

На рис. 2 представлена принципиальная схема ФОС на основе МК семейства AVR ATmega16.



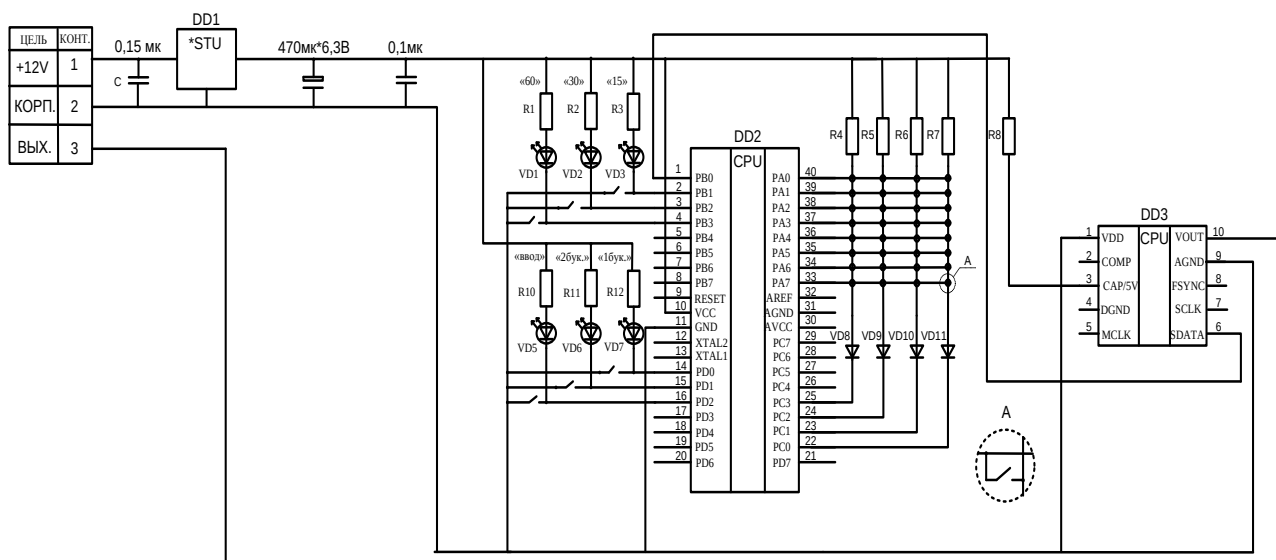


Рис. 2. Принципиальная схема ФОС на основе МК семейства AVR ATmega16

Оператор на панели управления выбирает цикл следования ОС, количество букв в ОС, а также кодовые посылки. МПС опрашивает панель управления и записывает во внутреннюю память количество букв, цикл следования и кодовые посылки, и в зависимости от положения органов управления на панели управления формирует на выходе ОС с заданными параметрами. Далее ОС поступает на выходные каскады устройства ФОС, где он усиливается и проходит на выход устройства.

Для включения устройства в режим работы ФОС необходимо нажать кнопку «ввод» (линия PD.2). При отжатой кнопке устройство работает как датчик кода Морзе. После этого выбирается количество букв в кодовой посылке (линии PD.0 и PD.1) и цикл следования опознавательных сигналов (линии PB.1 - PB.3).

При передаче тире и точки, МК формирует на выходе (линия PB.0) логическую единицу в течение времени, которое определяет скорость передачи кодовых посылок. Длительность тире выбирается в три раза больше длительности точки. С выхода МК кодовая посылка поступает на вход DD3 синтезатора (SDATA), где осуществляется его частотная модуляция (при передаче логического нуля формируется сигнал с частотой 400 Гц, а логической единицы – 1020 Гц). На выходе VOUT синтезатора формируется тонально-модулированный сигнал, который поступает на выход ФОС.

Выбор необходимых кодовых посылок осуществляет микроконтроллер по линиям PA.0-PA.7 и PC.0-PC.3, где порт А программируется на ввод и состояния его выводов уста-

навливаются в высокий уровень, а порт С программируется на вывод, состояния его выводов устанавливаются в низкий уровень только в том разряде, где производится сканирование (выбор столбца). Код на языке Ассемблер приведен на рис. 3.

```
ldi temp, 0x00
out DDRA, temp
out DDRD, temp
out PORTB, temp
ldi temp, 0xFF
out DDRB, temp
out DDRC, temp
out PORTA, temp
out PORTD, temp
out PORTC, temp
```

Рис. 3. Инициализация портов ввода-вывода

Алгоритм работы начинается с подпрограммы опроса количества букв в кодовой посылке и подпрограммы опроса цикла следования кодовой посылки. После чего формируется буква кодовой посылки. После выполнения подпрограммы формирования каждой буквы происходит проверка соответствующего РОН до тех пор, пока разряд на нем не будет сброшен, после чего цикл программы повторяется.

Алгоритм работы МК в схеме ФОС приведен на рис. 4.

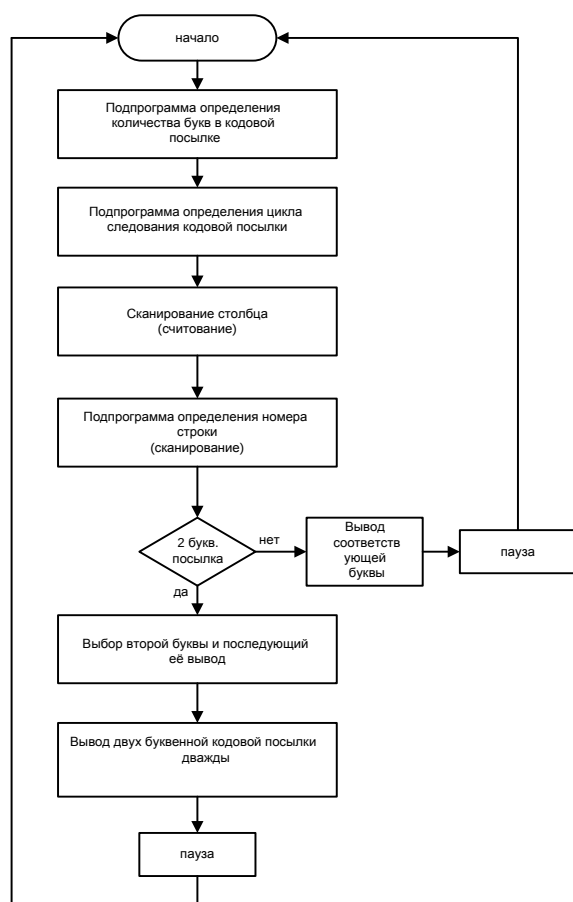


Рис. 4. Алгоритм работы МК в схеме ФОС

## Выводы

Применение предложенного устройства ФОС позволяет реализовывать формирование текста кодом Морзе при минимальных массогабаритных и энергетических показателях, а уменьшение количества функциональных узлов в устройстве обеспечивает увеличение вероятности безотказной работы устройства.

## Литература

1. Малышев В.А. Основы функционирования и эксплуатации средств радиотехнического обеспечения полетов авиации / В.А. Малышев. – Тамбов: ТВАИИ, 2004. – 254 с.
2. Лобачев Ю.В. Радиолокационные системы управления воздушным движением / Ю.В. Лобачев, Е.С. Перевозов. – Тамбов: ТВАИИ, 2005. – 86 с.
3. Радиостанция ПАР-10МС. Руководство по эксплуатации ПЯИУ, 2009. – 145 с.
4. Иванов Ю.И. Микропроцессорные устройства систем управления / Ю.И. Иванов, В.Я. Югай. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 189 с.
5. Рэвич Ю. Занимательная микроэлектроника / Ю. Рэвич. – СПб: БХВ, 2007. – 89 с.

Воронежский государственный технический университет  
Военный учебный научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

## IDENTIFICATION SIGNALS FORMING DEVICE BASED ON A MICROCONTROLLER

N.N. Kosheleva<sup>1</sup>, A.B. Buslaev<sup>2</sup>, S.I. Rembeza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: vstu-ppe@yandex.ru

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: vstu-ppe@yandex.ru

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: rembeza@yandex.ru

The paper describes a device based on a microcontroller, which provides the formation of text, encoded in the Morse code. The proposed device is capable of forming a one-, two-, three-letter identification signal. The sequence cycle of the identification signals is 15, 30 or 60 seconds. The use of the device makes it possible to realize the formation of an identification signal on a new element base, with minimal mass and size and energy indices. The device contains a microprocessor system, a control panel, output stages of the FIS (formation of an identification signal) and a control scheme for the FIS. The

identification signal is formed in the microprocessor system (MPS) in accordance with the program written in its memory. MPS can be implemented on the basis of a microcontroller, the characteristic feature of the structure is the placement on one chip with a central processor of internal memory and a large set of peripheral devices (data I / O ports, programmable interval timers, ADCs, DACs). The use of the proposed FIS device makes it possible to reduce the number of functional nodes in the device, and also provides an increase in the probability of failure-free operation of the device. The paper shows the basic scheme of FIS based on the microcontroller, as well as the algorithm of the microcontroller in the FIS board

Key words: the microcontroller, the identification signal, radio drive unit, microprocessor system

### References

1. Malyshev V. A. "Fundamentals of the functioning and operation of means of radio engineering maintenance of flights of aircraft" ("Osnovy funktsionirovaniya i ekspluatatsii sredstv radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov aviatsii"), Tambov, Tambov Higher Military Aviation Engineering School, 2004, 254 p.
2. Lobachev J. V., Perevozov E. S. "Radar systems air traffic control" ("Radiolokatsionnyye sistemy upravleniya vozdushnym dvizheniyem"), Tambov, Tambov Higher Military Aviation Engineering School, 2005, 86 p.
3. "The radio station PAR-10 MS. The user manual for PAIU" ("Radiostantsiya PAR-10MS. Rukovodstvo po ekspluatatsii PYAIU"), 2009, 145 p.
4. Ivanov Y. I., Yugai V. Y. "Microprocessor control systems" ("Mikroprotsessornyye ustroystva sistem upravleniya"), Taganrog, TRTU, 2005, 189 p.
5. Revich Yu. "Entertaining microelectronics" ("Zanimatel'naya mikroelektronika"), SPb:BHV, 2007, 89 p.

# ОДНОПОРОГОВЫЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РАДИОИМПУЛЬСА С НЕИЗВЕСТНЫМИ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ, АМПЛИТУДОЙ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗОЙ

© 2017 Б.В. Матвеев, М.М. Шахморadian, А.А. Макаров

Синтезирован однопороговый последовательный алгоритм обнаружения прямоугольного радиоимпульса с неизвестной длительностью, амплитудой и начальной фазой, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума. В отличие от известных ранее оптимальных алгоритмов обнаружения он позволяет сократить время анализа наблюдаемых данных и вынести решение о наличии или отсутствии полезного сигнала без потерь в качестве обнаружения. По сравнению с классическим последовательным обнаружителем предложенный алгоритм обнаружения осуществляет сравнение решающей статистики, формируемой в реальном времени, с единственным порогом. Анализ наблюдаемой реализации прекращается либо в момент времени превышения порога, либо при достижении заранее заданного времени. В качестве решающей статистики используется логарифм функционала отношения правдоподобия. Найдены асимптотические выражения для характеристик эффективности функционирования однопорогового последовательного обнаружителя, точность которых возрастает с увеличением отношения сигнал/шум. Рассмотренный однопороговый последовательный алгоритм обнаружения является эвристическим, однако его вероятности ошибок обнаружения совпадают с соответствующими вероятностями ошибок максимально правдоподобного алгоритма. Показано, что при неизменных характеристиках эффективности обнаружения с помощью однопорогового последовательного обнаружителя удаётся получить выигрыш во времени принятия решения по сравнению с известными алгоритмами обнаружения

Ключевые слова: радиосигнал, параметрическая априорная неопределенность, метод максимального правдоподобия, последовательное обнаружение, время принятия решения, вероятность ложной тревоги, вероятность пропуска сигнала

## Введение

Задача обнаружения сигнала с неизвестной длительностью на фоне гауссовского белого шума актуальна для практических приложений статистической теории связи, локации, навигации [1-5]. Максимально правдоподобный (МП) алгоритм обнаружения радиосигнала с произвольной формой огибающей, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума исследован в работе [1]. Показано, что сигнал является разрывным по неизвестному параметру. Получена структурная схема обнаружителя, а также асимптотические выражения для вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала, точность которых возрастает с увеличением отношения сигнал/шум (ОСШ).

Однако применение МП обнаружителя [1] требует анализа наблюдаемой реализации на всём априорном интервале возможных значений длительности сигнала. В работах [2-5] показано, что сократить среднее время анализа позволяет применение однопороговых

последовательных (ОПП) алгоритмов обнаружения сигнала без потери качества обнаружения.

В данной работе предложен ОПП алгоритм обнаружения прямоугольного радиоимпульса с неизвестной длительностью при наличии аддитивных искажений типа гауссовского белого шума. Получены асимптотически точные характеристики эффективности его функционирования. Выполнено сравнение однопорогового последовательного алгоритма с ранее исследованным МП алгоритмом.

Рассмотрим задачу обнаружения радиоимпульса

$$s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) = \begin{cases} a_0 \cos(\omega t - \varphi_0), & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ 0, & t < 0, t > \tau_0, \end{cases} \quad (1)$$

наблюдаемого в течение интервала времени  $[0, T_m]$  на фоне аддитивного гауссовского белого шума  $n(t)$  с односторонней спектральной плотностью  $N_0$ . В (1) обозначено:  $a_0$  – амплитуда,  $\omega$  – центральная частота,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\tau_0$  – длительность сигнала. Полагаем, что параметры  $a_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $\tau_0$  априори неизвестны и принимают значения из априорных интервалов  $(-\infty, \infty)$ ,  $[0, 2\pi]$ ,  $[T_1, T_2]$  соответственно.

Сформулируем задачу обнаружения импульса (1) в терминах теории проверки

Матвеев Борис Васильевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-960-138-45-61, e-mail: matveevzvavkaf@mail.ru

Шахморadian Махди Мохмадджафар – НИУ «МЭИ», аспирант, тел. 8-968-095-01-46, e-mail: mehdi\_shahmoradian@yahoo.com

Макаров Александр Андреевич – НИУ «МЭИ», аспирант, тел. 8-977-811-93-83, e-mail: o\_v\_ch@mail.ru

статистических гипотез, а именно: подлежит проверке простая гипотеза  $H_0: x(t) = n(t)$ , состоящая в том, что полезный сигнал отсутствует в наблюдаемой реализации  $x(t)$  против сложной альтернативы  $H_1: x(t) = s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) + n(t)$ , согласно которой полезный сигнал присутствует в наблюдаемой реализации  $x(t)$ . Предположим также, что интервал наблюдения  $[0, T_m]$  удовлетворяет условию  $0 < T_1 \leq T_2 \leq T_m$ , так что импульс (1) полностью находится в этом интервале. По наблюдаемой реализации  $x(t)$  необходимо вынести решение в пользу одной из гипотез.

### Синтез алгоритма обнаружения

Для синтеза алгоритма обнаружения воспользуемся методом МП [6-8], согласно которому решение о наличии или отсутствии полезного сигнала выносится на основе сравнения с порогом абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОП). Если величины  $a_0, \varphi_0, \tau_0$  неизвестны, то имеет место априорная параметрическая неопределённость относительно амплитуды, начальной фазы и длительности полезного сигнала [1]. В этом случае логарифм ФОП зависит от трёх переменных [6-8] и может быть записан в виде

$$L(a, \varphi, \tau) = \frac{2a}{N_0} \int_0^\tau x(t) \cos(\omega t - \varphi) dt - \frac{a^2 \tau}{N_0}. \quad (2)$$

Здесь отброшены интегралы от функций, осциллирующих с удвоенной частотой [6,8], т.е. полагается, что  $T_1 \gg 2\pi/\omega$ .

Величину максимума функционала (2)  $L_m = \sup_{a, \varphi, \tau} L(a, \varphi, \tau)$  можно найти с помощью последовательной максимизации логарифма ФОП сначала по амплитуде и начальной фазе, затем по длительности. Тогда имеем

$$L_m = \sup_{\tau} L(\tau),$$

где

$$L(\tau) = \sup_{a, \varphi} L(a, \varphi, \tau) = N_0 \left[ X_1^2(\tau) + Y_1^2(\tau) \right] / 2\tau, \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} X_1(\tau) \\ Y_1(\tau) \end{Bmatrix} = \frac{2}{N_0} \int_0^\tau x(t) \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix}(\omega t) dt. \quad (4)$$

Приёмное устройство формирует функционал (3) для всех возможных значений длительности из априорного интервала  $[T_1, T_2]$  и

находит величину его наибольшего максимума. В результате сравнения величины максимума с порогом  $h$  выносится решение в пользу одной из гипотез [6 - 8]. Значение порога  $h$  определяется выбранным критерием оптимальности.

В тех случаях, когда требуется уменьшить время анализа, целесообразно использовать ОПП алгоритм [2 - 5], где формирование решающей статистики  $L(\tau)$  (3) начинается в нулевой момент времени, а ее анализ – в момент времени  $t = T_1$ . Процедура анализа прекращается либо в момент  $t = \tau' < T_2$  первого превышения ею порога  $h$ , либо в момент времени  $t = T_2$ , если момент первого превышения порога выходит за пределы априорного интервала длительности, т.е.  $\tau' \geq T_2$ . Очевидно, что при этом среднее время анализа всегда меньше или равно  $T_2$  и может быть уменьшено с помощью выбора порога. Если реализация  $L(\tau)$  пересекает порог  $h$  в момент времени  $\tau' \in [T_1, T_2]$ , то выносится решение о наличии сигнала (1) в наблюдаемой реализации. В противном случае принимается решение об отсутствии сигнала. Тогда время анализа решающей статистики  $T_a$  представляет собой случайную величину вида

$$T_a = \begin{cases} T_1, & \tau' < T_1, \\ \tau', & T_1 \leq \tau' \leq T_2, \\ T_2, & \tau' > T_2. \end{cases}$$

На рис. 1 показана структурная схема ОПП алгоритма обнаружения, где введены обозначения: И – интегратор от нуля до текущего момента времени  $t$ , ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения, РУ – решающее устройство, осуществляющее сравнение выходного сигнала интегратора с порогом  $h$  и выносящее решение о наличии или отсутствии сигнала.

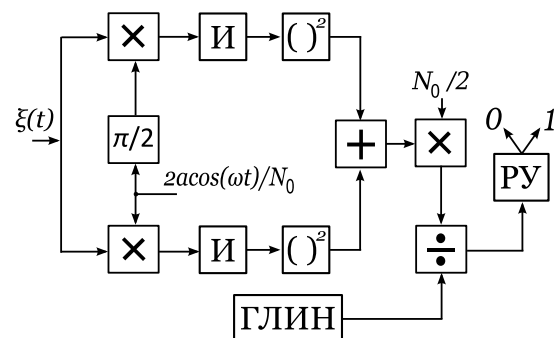


Рис. 1. Структурная схема однопорогового последовательного обнаружителя радиопulses с неизвестными амплитудой, начальной фазой и длительностью

### Характеристики обнаружения

ОПП алгоритм может обеспечить сокращение среднего времени принятия решения по сравнению с МП алгоритмом. Поэтому одной из важных характеристик эффективности функционирования ОПП обнаружителя является среднее время анализа (принятия решения) [2-5]. Обозначим:  $T_{aj}$  – время принятия решения при условии справедливости гипотезы  $H_j$ ,  $t_j$  – время первого достижения порога  $h$  реализацией случайного процесса  $L_j(\tau) = L(\tau|H_j)$ ,

$$F_j(h, T) = P(t_j < T), \quad j = 0, 1 \quad (5)$$

– функция распределения времени  $t_j$ .

Найдём функции распределения (5). С этой целью исследуем решающую статистику (3). Подставив выражения (4) в формулу (3) и пренебрегая интегралами от функций, осциллирующих с удвоенной частотой, перепишем функционал  $L_j(\tau)$  в виде

$$L_j(\tau) = \frac{[z_0^2 j \min(1, \tau/\tau_0) \cos \varphi_0 + N_c(\tau)]^2}{2z_0^2 \tau/\tau_0} + \frac{[z_0^2 j \min(1, \tau/\tau_0) \sin \varphi_0 + N_s(\tau)]^2}{2z_0^2 \tau/\tau_0}. \quad (6)$$

Здесь обозначено:

$$\begin{cases} N_c(\tau) \\ N_s(\tau) \end{cases} = \frac{2a_0}{N_0} \int_0^\tau n(t) \begin{cases} \cos \\ \sin \end{cases} (\omega t) dt,$$

$z_0^2 = a_0^2 \tau_0 / N_0$  – ОСШ на выходе приёмника МП для принятого сигнала [8]. Шумовые составляющие  $N_c(\tau)$ ,  $N_s(\tau)$ , как интегралы от произведения белого шума и детерминированной функции, являются гауссовскими случайными процессами с нулевыми математическими ожиданиями и корреляционными функциями вида

$$\begin{aligned} \langle N_c(\tau_1) N_c(\tau_2) \rangle &= \langle N_s(\tau_1) N_s(\tau_2) \rangle = z_0^2 \min(\tau_1, \tau_2) / \tau_0, \\ \langle N_c(\tau_1) N_s(\tau_2) \rangle &= 0. \end{aligned}$$

Перейдём в выражении (6) к переменной  $\lambda = z_0^2 \tau / \tau_0$ ,  $\Lambda_1 \leq \lambda \leq \Lambda_2$ ,  $\Lambda_1 = z_0^2 T_1 / \tau_0$ ,  $\Lambda_2 = z_0^2 T_2 / \tau_0$ . Тогда функционал (6) как функция переменной  $\lambda$  может быть представлен выражением

$$\begin{aligned} L_j(\lambda) &= [j \min^2(\lambda_0, \lambda) + 2j \min(\lambda_0, \lambda) N_1(\lambda)] / 2\lambda + \\ &+ [N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)] / 2\lambda, \\ N_1(\lambda) &= N_c(\lambda) \cos \varphi_0 + N_s(\lambda) \sin \varphi_0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\lambda_0 = z_0^2$ , а  $N_c(\lambda)$  и  $N_s(\lambda)$  – гауссовские статистически независимые случайные процессы. Нетрудно показать, что

$$\begin{aligned} \langle N_1(\lambda) \rangle &= \langle N_c(\lambda) \rangle = \langle N_s(\lambda) \rangle = 0, \\ \langle N_1(\lambda_1) N_1(\lambda_2) \rangle &= \langle N_c(\lambda_1) N_c(\lambda_2) \rangle = \\ &= \langle N_s(\lambda_1) N_s(\lambda_2) \rangle = \min(\lambda_1, \lambda_2), \end{aligned}$$

т.е. процессы  $N_1(\lambda)$ ,  $N_c(\lambda)$ ,  $N_s(\lambda)$  являются стандартными винеровскими случайными процессами.

Функции распределения (5) времени первого достижения порога случайным процессом (6) можно выразить через вероятность

$$G_j(h, T) = P[L_j(\tau) < h], \quad j = 0, 1 \quad (8)$$

недостижения процессом  $L_j(\tau)$  границы  $h$  к моменту времени  $T$ :

$$F_j(h, T) = 1 - G_j(h, T).$$

Найдём сначала вероятность (8) при отсутствии сигнала в принятой реализации ( $j = 0$ ). Она представляет собой вероятность недостижения границы  $h$  случайным процессом

$$L_0(\lambda) = [N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)] / 2\lambda.$$

Асимптотическое выражение для искомой вероятности получено в работе [1]:

$$P[L_0(\lambda) < h] \approx \begin{cases} (\Lambda_1 / \Lambda)^{h \exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 0, & h < 1. \end{cases}$$

Отсюда находим приближённое выражение для функции распределения (5) при  $j = 0$ :

$$F_0(h, T) \approx \begin{cases} 1 - (T_1 / T)^{h \exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 1, & h < 1. \end{cases} \quad (9)$$

Погрешность формулы (9) уменьшается с увеличением порога  $h$  и отношения  $T_1 / T$ .

Найдём теперь вероятность (8), а также функцию распределения времени первого достижения границы (5) при наличии сигнала в принятой реализации. При  $j = 1$  решающая статистика (7) принимает вид

$$\begin{aligned} L_1(\lambda) &= \min^2(\lambda_0, \lambda) / 2\lambda + \min(\lambda_0, \lambda) N_1(\lambda) / \lambda + \\ &+ [N_c^2(\lambda) + N_s^2(\lambda)] / 2\lambda. \end{aligned}$$

Перейдём в последнем выражении к новой переменной  $l = \lambda / \lambda_0$ ,  $T_1 / \tau_0 \leq l \leq T_2 / \tau_0$ . Тогда имеем

$$\begin{aligned} L_1(l) &= z_0^2 \min^2(1, l) / 2l + z_0 \min(1, l) N_1(l) / l + \\ &+ [N_c^2(l) + N_s^2(l)] / 2l. \end{aligned} \quad (10)$$

В условиях достаточно больших ОСШ последним слагаемым в (10) можно пренебречь. Следовательно, возвращаясь к

переменной  $\lambda$ , при  $z_0 \gg 1$  получаем приближенное равенство

$$L_1(\lambda) \approx \min^2(\lambda_0, \lambda) / 2\lambda + \min(\lambda_0, \lambda) N_1(\lambda) / \lambda. \quad (11)$$

Функция распределения момента первого достижения границы случайным процессом (11) найдена в [5]

$$F_1(h, T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\Lambda_1}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi - h + \Lambda_1/2)^2}{2\Lambda_1}\right] \times \\ \times \left[ \Phi\left(\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}}{2}\right) - \exp(\xi) \times \right. \\ \left. \times \Phi\left(-\frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}} - \frac{\sqrt{\Lambda - \Lambda_1}}{2}\right) \right] d\xi, \quad \Lambda \leq \lambda_0, \quad (12)$$

$$F_1(h, T) = 1 - \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi + \lambda_0/2)^2 + h^2 - h\lambda_0}{2\lambda_0}\right] \times \\ \times \left[ \exp\left(\frac{h\xi}{\lambda_0}\right) \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0 - \Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} + \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0 - \Lambda_1)}}\right) - \right. \\ \left. - \exp\left(-\frac{h\xi}{\lambda_0}\right) \Phi\left(h\sqrt{\frac{\lambda_0 - \Lambda_1}{\lambda_0\Lambda_1}} - \xi\sqrt{\frac{\Lambda_1}{\lambda_0(\lambda_0 - \Lambda_1)}}\right) \right] \times \\ \times \left[ \Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}{2} + \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}\right) - \exp(-\xi) \times \right. \\ \left. \times \Phi\left(\frac{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}{2} - \frac{\xi}{\sqrt{\Lambda - \lambda_0}}\right) \right] \frac{d\xi}{\sqrt{2\pi\lambda_0}}, \quad \Lambda > \lambda_0,$$

где  $\Lambda = z_0^2 T / \tau_0$ ,  $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi}$  – интеграл вероятности.

Функции (9), (12) позволяют найти вероятности ошибок обнаружения – вероятность ложной тревоги

$$\alpha(h, T_2) = P(t_0 < T_2) = F_0(h, T_2) \quad (13)$$

и вероятность пропуска сигнала

$$\beta(h, T_2) = P(t_1 > T_2) = 1 - F_1(h, T_2). \quad (14)$$

Подставляя функции распределения (9) и (12) в формулы (13) и (14) соответственно, находим искомые вероятности ложной тревоги

$$\alpha(h, T_2) \approx \begin{cases} 1 - (T_1/T_2)^{\exp(-h)}, & h \geq 1, \\ 1, & h < 1 \end{cases} \quad (15)$$

и вероятность пропуска сигнала

$$\beta(h, T_2) = \frac{1}{z_0 \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi + z_0^2/2)^2 + h^2 - hz_0^2}{2z_0^2}\right] \times \\ \times \left[ \exp\left(\frac{h\xi}{z_0^2}\right) \Phi\left(\frac{h}{z_0} \sqrt{\frac{\tau_0 - T_1}{T_1}} + \frac{\xi}{z_0} \sqrt{\frac{T_1}{\tau_0 - T_1}}\right) - \right. \\ \left. - \exp\left(-\frac{h\xi}{z_0^2}\right) \Phi\left(\frac{h}{z_0} \sqrt{\frac{\tau_0 - T_1}{T_1}} - \frac{\xi}{z_0} \sqrt{\frac{T_1}{\tau_0 - T_1}}\right) \right] \times \\ \times \left[ \Phi\left(\frac{z_0 \sqrt{T_2/\tau_0 - 1}}{2} + \frac{\xi}{z_0 \sqrt{T_2/\tau_0 - 1}}\right) - \exp(-\xi) \times \right. \\ \left. \times \Phi\left(\frac{z_0 \sqrt{T_2/\tau_0 - 1}}{2} - \frac{\xi}{z_0 \sqrt{T_2/\tau_0 - 1}}\right) \right] d\xi. \quad (16)$$

Полученные выражения вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала для ОПП алгоритма как частный случай совпадают с аналогичными вероятностями для МП алгоритма обнаружения, рассмотренного в [1], а вероятность пропуска сигнала асимптотически совпадает также с вероятностью пропуска при использовании МП алгоритма обнаружения сигнала без высокочастотного заполнения с неизвестной амплитудой [5].

Используя выражения (9), (12), находим аналогично [5] среднее время принятия решения ОПП алгоритмом

$$\langle T_{aj} \rangle = T_1 P(t_j < T_1) + \langle t_j \rangle + T_2 P(t_j > T_2) = \\ = T_1 + \int_{T_1}^{T_2} [1 - F_j(h, T)] dT.$$

Если известны априорные вероятности  $p_0$  и  $p_1$  отсутствия и наличия сигнала соответственно, а также априорная плотность вероятности  $w(\tau)$  неизвестной длительности, можно ввести безусловное среднее время принятия решения

$$T_{au} = p_0 T_{a0} + p_1 T_{a1}, \quad (17)$$

где  $T_{a1} = \int_{T_1}^{T_2} T_{a1}(\tau) w(\tau) d\tau$  – безусловное среднее время принятия решения при наличии сигнала.

Нетрудно видеть, что для МП алгоритма обнаружения [1] время анализа соответствует максимально возможной длительности полезного сигнала  $T_2$ . Поэтому выигрыш во времени анализа ОПП алгоритма по сравнению с МП алгоритмом можно характеризовать величинами относительного времени принятия решения

$$\chi_j = T_{aj} / T_2, \quad \chi = T_{au} / T_2, \quad (18)$$

которые показывают, насколько сокращается время принятия решения ОПП обнаружителем по сравнению с временем  $T_2$ , требуемым для принятия решения МП обнаружителем. Если величина  $\chi < 1$  (18), то ОПП алгоритм обнаружения, обеспечивая выигрыш в величине среднего времени анализа, обладает такой же асимптотической эффективностью обнаружения, как и МП алгоритм. Если заданы априорные вероятности  $p_0$  и  $p_1$  отсутствия и наличия сигнала, а также априорное распределение неизвестной длительности, то для характеристики качества обнаружения можно использовать среднюю (полную) вероятность ошибки [6]

$$P_e = p_0\alpha + p_1\beta, \quad (19)$$

где  $\alpha$  определяется из (15), а  $\beta = \int_{T_1}^{T_2} \beta(\tau)w(\tau)d\tau$  – безусловная вероятность пропуска сигнала.

Таким образом, эффективность обнаружения ОПП алгоритмом определяется значениями среднего времени принятия решения (17), вероятности ложной тревоги (15), условной вероятности пропуска сигнала (16) и средней безусловной вероятности ошибки (19). Поскольку все перечисленные характеристики являются функциями порога  $h$ , то величину порога можно выбирать на основе требуемых показателей качества обнаружения, например, одним из следующих способов: величина порога  $h_\alpha$  находится из решения уравнения  $\alpha(h_\alpha, T_2) = \varepsilon$  по заранее заданной вероятности ложной тревоги  $\varepsilon$  (критерий Неймана–Пирсона) [6-8]; величина порога  $h_p$  находится из решения уравнения  $P_e(h_p) = P$  по заранее заданной средней безусловной вероятности ошибки  $P$ ; величина порога  $h_\chi$  находится по заранее заданной величине выигрыша  $X$  в среднем времени принятия решения, то есть из решения уравнения  $\chi(h_\chi) = X$ ; величина порога  $h_{\min}$  находится из условия минимума средней безусловной вероятности ошибки [6 - 8]:  $h_{\min} = \arg \inf P_e(h)$ .

В качестве примера на рис. 2, 3 изображены зависимости величин  $\chi_0$  и  $\chi_1$  (18) соответственно, характеризующих выигрыши ОПП алгоритма обнаружения во времени принятия решения, от параметра  $k = T_2/T_1$ , определяющего динамический диапазон возможных значений длительности. При

построении кривых порог выбирался по критерию Неймана-Пирсона как решение уравнения  $\alpha(h, T_2) = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданная величина, а  $z_0 = 5$ . Сплошные кривые соответствуют  $\varepsilon = 10^{-1}$ , штриховые –  $\varepsilon = 10^{-2}$ , штрих-пунктирные –  $\varepsilon = 10^{-3}$ . Как видно из рис. 2, с ростом динамического диапазона возможных значений длительности относительное среднее время принятия решения при отсутствии сигнала снижается, а при наличии сигнала – увеличивается. Средний выигрыш во времени принятия решения однопороговым последовательным алгоритмом зависит от априорных вероятностей наличия и отсутствия сигнала в принятой реализации.

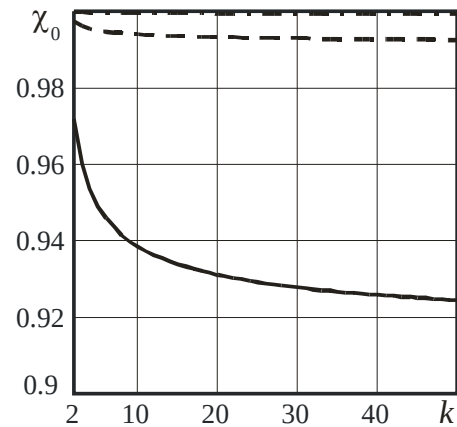


Рис. 2. Выигрыш во времени принятия решения последовательным алгоритмом обнаружения по сравнению с максимально правдоподобным при отсутствии полезного сигнала

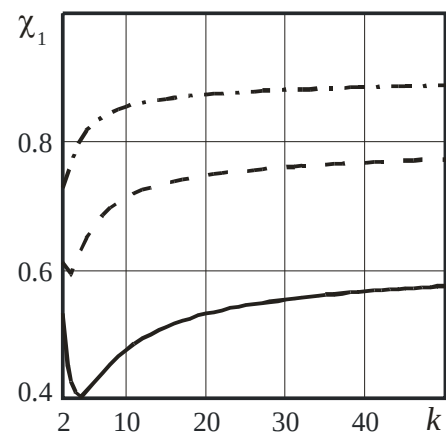


Рис. 3. Выигрыш во времени принятия решения последовательным алгоритмом обнаружения по сравнению с максимально правдоподобным при наличии полезного сигнала



## Заключение

Применение однопорогового последовательного алгоритма обнаружения сигнала с неизвестными длительностью, амплитудой и начальной фазой позволяет сократить среднее время принятия решения по сравнению со временем анализа на основе метода максимального правдоподобия. При этом однопороговый последовательный и максимально правдоподобный алгоритмы обеспечивают одинаковую эффективность обнаружения сигнала с неизвестной длительностью: обладают одинаковыми вероятностями ложной тревоги и пропуска сигнала. При наличии сигнала выигрыш во времени принятия решения может достигать до 50 процентов. Если известны априорные вероятности наличия и отсутствия сигнала в принятой реализации, а также априорная плотность вероятности неизвестной длительности, можно осуществить выбор порога по критерию минимума средней вероятности ошибки. В этом случае характеристики однопорогового последовательного обнаружителя асимптотически (с ростом отношения сигнал/шум) совпадают с характеристиками байесовского обнаружителя.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-49-00079).*

Воронежский государственный технический университет  
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

## Литература

1. Трифонов А.П. Обнаружение радиосигнала с неизвестными длительностью, амплитудой и начальной фазой / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, М.В. Трифонов // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 2015. - Т. 58. - № 5. - С. 401-414.
2. Галун С.А. Обнаружение и оценка момента изменения интенсивности пуассоновского потока / С.А. Галун, А.П. Трифонов // Автоматика и телемеханика. - 1982. - № 6. - С. 95-105.
3. Корчагин Ю.Э. Пороговый последовательный алгоритм обнаружения сигнала с неизвестной длительностью / Ю.Э. Корчагин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2003. - Т. 6. - № 2. - С. 51-57.
4. Трифонов А.П. Однопороговый последовательный алгоритм приема сигнала с неизвестной длительностью / А.П. Трифонов, М.Б. Беспалова, Ю.Э. Корчагин // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 2006. - Т. 49. - № 6. - С. 525-536.
5. Корчагин Ю.Э. Однопороговый последовательный алгоритм обнаружения сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью / Ю.Э. Корчагин // Известия ВУЗов. Радиофизика. - 2012. - Т. 55. - № 12. - С. 800-808.
6. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович и др.; под ред. П.А. Бакута. - М.: Радио и связь, 1984. - 440 с.
7. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации / Ю.Г. Сосулин. - М.: Радио и связь, 1992. - 304 с.
8. Трифонов А.П. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех / А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков. - М.: Радио и связь, 1986. - 264 с.

## THE SINGLE-THRESHOLD SEQUENTIAL ALGORITHM FOR DETECTION OF THE RECTANGULAR RADIO PULSE WITH UNKNOWN DURATION, AMPLITUDE AND INITIAL PHASE

**B.V. Matveev<sup>1</sup>, M.M. Shahmoradian<sup>2</sup>, A.A. Makarov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: matveevzavkaf@mail.ru

<sup>2</sup>Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation  
e-mail: mehdi\_shahmoradian@yahoo.com

<sup>3</sup>Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation  
e-mail: o\_v\_ch@mail.ru

We synthesize the single-threshold sequential algorithm for the detection of the rectangular radio pulse with unknown duration, amplitude and initial phase observed against Gaussian white noise. Unlike common optimal detection algorithms, it allows us to reduce the time needed for taking decision on presence or absence of the useful signal in the observable realization without decrease in detection quality. Unlike the classical sequential detector, the introduced detection algorithm carries out the comparison of the decision statistics formed in real time with a single threshold. The analysis of the observable realization stops either at the time of the threshold crossing, or when the predetermined time comes. As the decision statistics we use the

logarithm of the functional of the likelihood ratio. We find the asymptotic expressions for the characteristics of the efficiency of the single-threshold sequential detector whose accuracy increases with the signal-to-noise ratio. The considered single-threshold sequential detection algorithm is the heuristic one, but, however, its detection errors probabilities coincide with the corresponding probabilities of errors allowed by the maximum likelihood algorithm. We also show that, under invariable characteristics of detection efficiency, we can get a gain in the decision time, if we apply the single-threshold sequential detector instead of the common detection algorithms

Key words: radio signal, parametric prior uncertainty, maximum likelihood method, sequential detection, decision time, false alarm probability, missing probability

### References

1. Trifonov A.P., Korchagin, Y.E., Trifonov M.V. "Detection of Radio Signals with Unknown Duration, Amplitude, and Initial Phase", *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 361-372.
2. Galun S.A., Trifonov A.P. "Detection and Estimation of the Time when the Poisson Flow Intensity Changes", *Automation and Remote Control*, 1982, vol. 43, no. 6, pp. 782-790.
3. Korchagin Yu.E. "Threshold Serial Algorithm for Detecting of Signal with Unknown Duration", *Wave Process Physics and Radio Engineering Systems (Fizika Volnovykh Protessov i Radiotekhnicheskie Sistemy)*, 2003, vol. 6, no. 2, pp. 51-57.
4. Trifonov A.P., Bepalova M.B., Korchagin Yu.E. "Single-Threshold Sequential Algorithm for Receiving a Signal with Unknown Duration", *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, vol. 49, no. 6, pp. 474-484.
5. Korchagin Yu.E. "Single-Threshold Serial Algorithm for Detecting Signals with Unknown Amplitudes and Durations", *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, vol. 55, no. 12, pp. 719-727.
6. Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A., et al. "Signal Detection Theory" ("Teoriya obnaruzheniya signalov"), Ed. by P.A. Bakut, Moscow, Radio i Svyaz', 1984, 440 p.
7. Sosulin Yu.G. "Theoretical Principles of Radar and Radio Navigation" ("Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii i radionavigatsii"), Moscow, Radio i Svyaz', 1992, 304 p.
8. Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. "Joint Discrimination of Signals and Estimation of Their Parameters Against the Background of Interferences" ("Sovmestnoye razlicheniye signalov i otsenka ikh parametrov na fone pomekh"), Moscow, Radio i Svyaz', 1986, 264 p.

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЗУБЬЕВ СБОРНОЙ ДИСКОВОЙ ФРЕЗЫ С КОНСТРУКТИВНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

© 2017 В.В. Куц, В.В. Пономарев

Рассмотрен вопрос обработки РК-профилей с помощью сборной фрезы, оснащенной сменными многогранными пластинами с конструктивной радиальной подачей. Приведен расчет высоты отклонения от номинального профиля в радиальном направлении при обработке вала и определена зависимость отклонения от угла расположения пластины.

Рассмотрен вопрос разработки метода расчета числа сменных многогранных пластин фрезы с конструктивной подачей и определения их положения, исходя из условия постоянства величин максимальных отклонений обработанного профиля. Предложен алгоритм расчета углов расположения сменных многогранных пластин.

Представлены результаты расчета для обработки РК-профильного вала радиусом  $R = 40$  мм и эксцентриситетом  $e = 3,4$  мм при различных радиусах фрезы и качествах точности.

Применение представленного метода расчета положения сменных многогранных пластин позволяет выровнять отклонения от номинального профиля в радиальном направлении при обработке детали с РК-профилем сборной фрезой. Определены дальнейшие пути исследования износа сменных многогранных пластин для получения работоспособной конструкции данной фрезы

Ключевые слова: РК – профиль, фреза, математическая модель, формообразование, отклонения профиля, сменная многогранная пластина

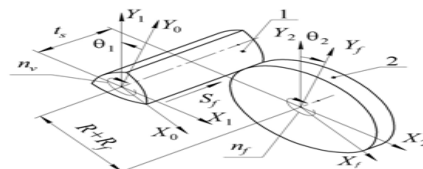
## Введение

РК-профили как альтернативные соединения не получили должного распространения в основном из-за трудностей получения поверхности деталей в данном соединении. Несмотря на множество существующих методов обработки РК-профилей [1-5], обработка таких сложных поверхностей остается трудоемкой и нетехнологичной, особенно для протяженных, жестких валов.

## Цель исследования

В работе [6] предложен вариант обработки длинных валов с применением специального инструмента – сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей, которой сообщают осевую подачу, рис. 1. Данный способ позволяет обрабатывать детали с протяженными участками РК-профиля, например, таких как штанги буровых установок, передающие значительный крутящий момент.

Конструкция данной фрезы должна обеспечивать требуемую погрешность обработки, характеризуемую, в частности, величиной допуска погрешности формы обработанного вала в радиальном направлении ( $T\Delta_r$ ).



где  $\bar{Q}_\theta(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k$ -й СМП по параметру профиля производящей поверхности фрезы;

$\bar{Q}_t(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k$ -й СМП по параметру времени;

$\bar{k}_0$  – единичный орт, направление которого совпадает с положительным направлением оси  $Z_0$  системы координат детали;

$s_k$  – величина длины дуги режущей кромки СМП, определяющей точку контакта с производящей поверхностью фрезы.

2. Определим по методике, приведенной в [7], матрицу установки  $A_w$  системы координат секущей плоскости на основе векторов  $\bar{Q}(t_A, s_k), \bar{Q}_{t_2}(t_A, s_k), \bar{k}_0$ , где  $\bar{Q}(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания по параметру вращения фрезы (главному движению) в точке поверхности с координатами  $t_A$  и  $s_k$ ;  $\bar{Q}_{t_2}(t_A, s_k)$  – радиус-вектор, определяющий точку на поверхности резания с координатами  $t_A$  и  $s_k$ .

3. Определим момент времени  $t_B$  контакта  $k+1$  СМП с обрабатываемой деталью путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\bar{Q}_\theta(t_B, s_{k+1}) \cdot [\bar{Q}_t(t_B, s_{k+1}) \times \bar{k}_0]}{|\bar{Q}_\theta(t_B, s_{k+1})| \cdot |\bar{Q}_t(t_B, s_{k+1}) \times \bar{k}_0|} = 0; \\ \bar{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t_B, s_{k+1})} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_\theta(t_B, s_{k+1})$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k+1$ -й СМП по параметру профиля производящей поверхности;

$\bar{Q}_t(t_B, s_{k+1})$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k+1$ -й СМП по параметру времени.

$\bar{k}_w$  – единичный орт, направление которого совпадает с положительным направлением оси  $Z_w$  системы координат секущей плоскости.

4. Определяем моменты времени  $t_C$  и  $t'_C$  когда режущая кромка  $k$ -й СМП и  $k+1$ -й СМП пересекаются в секущей плоскости  $W$ , путем решения системы уравнений относительно параметров  $t_C, s_{kC}, t'_C, s_{(k+1)C}$

$$\begin{cases} \bar{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t_C, s_{kC})} = 0; \\ \bar{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t'_C, s_{(k+1)C})} = 0; \\ \bar{i}_0 \cdot [\bar{Q}(t_C, s_{kC}) - \bar{Q}(t'_C, s_{(k+1)C})] = 0; \\ \bar{j}_0 \cdot [\bar{Q}(t_C, s_{kC}) - \bar{Q}(t'_C, s_{(k+1)C})] = 0. \end{cases} \quad (3)$$

5. Определим матрицу  $A_r$  установки радиальной секущей плоскости, проходящей через ось  $Z_0$  и точку  $C$  (см. рис. 3), на основе векторов.

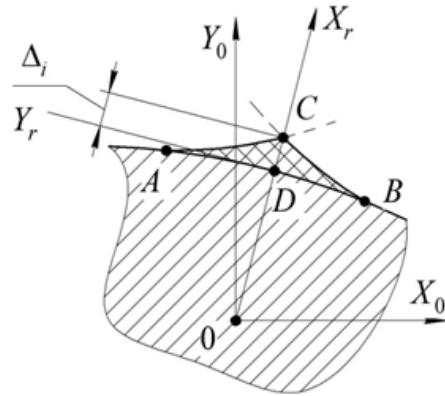


Рис. 3. Схема расчета высоты отклонения от номинального профиля в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \vec{r}_{r_0} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{k}_0 \cdot \bar{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \vec{k}_{r_0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \vec{j}_{r_0} &= \begin{bmatrix} \bar{i}_0 \cdot \bar{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ \bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

6. Находим точку пересечения оси  $X_r$  системы координат секущей плоскости  $r$  с номинальной поверхностью детали путем решения относительно параметрического угла профиля вала ( $\theta_r$ ) уравнения

$$\bar{i}_r \cdot \overline{A_r \cdot \vec{r}_0(\theta, z)} = 0, \quad (5)$$

где

$$z = \bar{k}_0 \cdot \bar{Q}_k(t_C, s_{kC}). \quad (6)$$

7. Определим величину  $\Delta_k$ , максимального отклонения обработанного  $k$ -й и  $k+1$ -й СМП участка профильного вала от номинального значения как

$$\Delta_k = \left| A_r \cdot \vec{Q}_k(t_c, s_{kc}) - \vec{r}_0(\theta_r, z) \right|. \quad (7)$$

### Результаты исследования

На рис. 4 представлен результат расчета величин  $\Delta_k$  для РК-профильного вала с радиусом  $R = 40$  мм и эксцентриситетом  $e = 3,4$  мм, фрезой с радиальной конструктивной подачей радиусом  $R_f = 200$  мм и числом зубьев 25, расположенных с равномерным угловым шагом.

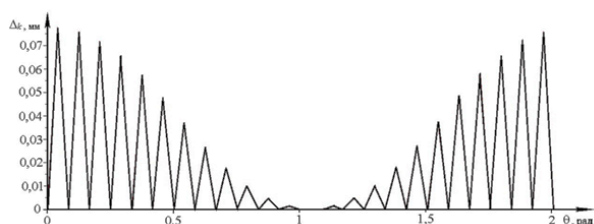


Рис. 4. График изменения высоты отклонения профиля в радиальном направлении при обработке фрезой с параметрами  $R_f = 200$ ,  $R = 40$ ,  $K = 25$

Из графика видно, что величина  $\Delta_k$  не одинакова на различных участках профиля, что может усложнить обработку на последующих чистовых операциях.

Для обеспечения постоянства величины  $\Delta_k$  целесообразно СМП фрезы располагать с неравномерным шагом [9-11].

Если величину  $\Delta_k$  представить как функцию

$$\Delta_k = f_k(R_f, \theta_k, \Delta\theta_{k+1}) \quad (8)$$

зависящую от среднего радиуса фрезы, текущего положения  $k$ -й СМП и углового шага  $k+1$ -й СМП, то с применением алгоритма, представленного на рис. 5 можно определить число зубьев фрезы и величины угловых положений СМП, при которых будет выполняться условие

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_k \leq T\Delta_r \quad (9)$$

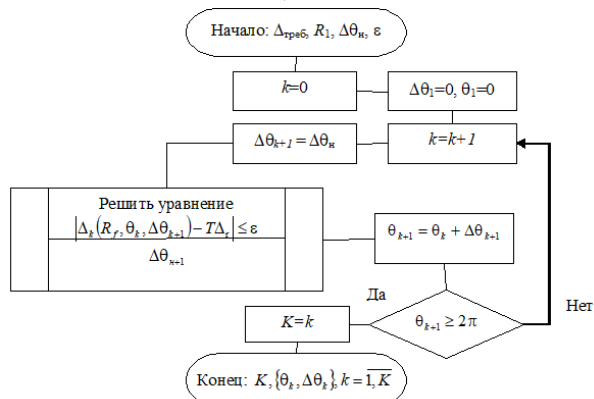


Рис. 5. Алгоритм расчета углов расположения СМП

С применением данного алгоритма для вала  $R = 40$  и  $e = 3,4$  был выполнен расчет числа зубьев фрезы при различном значении  $T\Delta_r$ , соответствующем определенному качеству точности (по ГОСТ 24643-81 для нормальной относительной геометрической точности), и различных радиусах фрезы, результат которого представлен в таблице.

Расчетное количество пластин СМП в зависимости от среднего радиуса фрезы и качества точности

|            | $T\Delta_r$ , мкм / ITn |          |         |         |          |
|------------|-------------------------|----------|---------|---------|----------|
| $R_f$ , мм | 13,8/IT8                | 22,2/IT9 | 36/IT10 | 57/IT11 | 100/IT12 |
| 200        | 40                      | 32       | 25      | 20      | 15       |
| 150        | 41                      | 32       | 25      | 20      | 15       |
| 100        | 41                      | 33       | 26      | 21      | 16       |
| 50         | 42                      | 33       | 26      | 21      | 16       |

На рис. 6 представлен результат расчета в виде зависимости углового шага СМП от углового положения предыдущей СМП при радиусе фрезы  $R_f = 200$  и различных качествах точности.

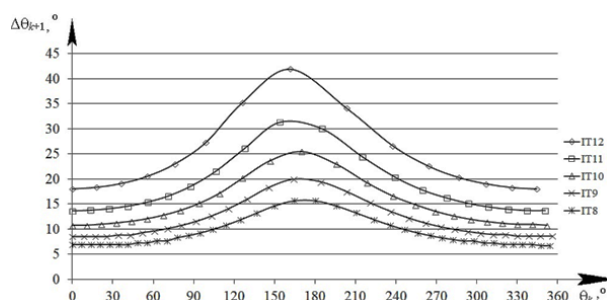


Рис. 6. Зависимость углового параметра размещения СМП от качества точности при радиусе фрезы  $R_f = 200$

### Выводы

Таким образом, применив данный метод расчета положения СМП, можно получить выравнивание отклонений от номинального профиля в радиальном направлении при обработке детали с РК-профилем сборной фрезой. Однако для получения работоспособной конструкции данной фрезы, требуются дальнейшие исследования процесса износа СМП.

### Литература

1. Куц В.В. Структурный синтез специализированных металлорежущих систем для обработки РК – профильных валов / В.В. Куц, Ю.А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета – 2012. – №6(45). – С.65-70.
2. Методология структурно – параметрического синтеза металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Сариллов.

Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2015. – 282 с.

3. Ивахненко А.Г. Структурно-параметрический синтез технологических систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц. -Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2010. – 153 с.

4. Куц В.В. Способы обработки профильных валов фрезами с радиальной конструктивной подачей / В.В. Куц, Ю.А. Мальнева, А.А. Горохов // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. –Курск, 2015. – С. 156-158.

5. Куц В.В. Синтез производящих поверхностей фрез - протяжек для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, А.Г. Ивахненко, М.Л. Сторублев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.

6. Куц В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК-профилем сборной дисковой фрезой / В.В. Куц, В.В. Пономарев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. - № 2(322). – С.110-115.

7. Лашнев С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г.

Емельянов. – Курск: Курский государственный технический университет, 1997. – 391 с.

8. Емельянов С.Г. Корректировка положений сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез для обработки шеек коленчатых валов / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // СТИН. 2000. №2. – С. 12-15.

9. Емельянов С.Г. Определение размеров остаточных слоев при фрезеровании сборными дисковыми фрезами / С.Г. Емельянов, А.А. Горохов, В.В. Куц // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: I Всерос. науч.-техн. конф. Нижний Новгород, 1999. С. 15-18.

10. Куц В.В. Расчет величин искажения профиля обрабатываемой фасонной поверхности при разработке CAD/CAM – системы сборных фасонных фрез / В.В. Куц // Автоматизация и современные технологии. 2004. №11. – С.5-7.

11. Емельянов С.Г. Моделирование процесса обработки шейки коленчатого вала сборной дисковой фрезой, оснащенной сменными многогранными пластинами / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // Техника машиностроения. 1999. №2. – С. 21-25.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## METHOD FOR DETERMINING THE POSITION OF THE TEETH OF THE INTERLOCKING SIDE CUTTER WITH THE CONSTRUCTIVE RADIAL FEED

V.V. Kuts<sup>1</sup>, V.V. Ponomarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Associate Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: [kuc-vadim@yandex.ru](mailto:kuc-vadim@yandex.ru)

<sup>2</sup>Assistant Professor, Southwest State University, Kursk, Russian Federation

e-mail: [ponomarev@ascon.ru](mailto:ponomarev@ascon.ru)

The problem of processing equiaxial contour profiles with an interlocking side cutter equipped with replaceable polyhedral plates with constructive radial feed is considered. Calculation of the height of the deviation from the nominal profile in the radial direction is given for the shaft processing and the dependence of the deviation on the angle of the plate is determined.

The issue of developing a method for calculating the number of replaceable polyhedral cutter plates with constructive feed and determining their position is considered, with due account to the condition of constancy of the values of the maximum deviations of the processed profile. An algorithm for calculating the angles of the location of replaceable polyhedral plates is proposed.

The results of calculations are presented for processing of the equiaxial contour profile shaft of radius  $R = 40$  mm and eccentricity  $e = 3.4$  mm for different cutter radii and accuracy grades.

The application of the presented method of calculating the position of the replaceable polyhedral plates makes it possible to equalize the deviations from the nominal profile in the radial direction when machining the workpiece with the equiaxial contour profile by the interlocking side cutter. Further ways of studying the wear of replaceable polyhedral plates have been determined in order to obtain an efficient design for this cutter

Key words: equiaxial contour profile, interlocking side cutter, mathematical model, shaping, profile deviations, replaceable polyhedral plate

### References

1. Kuts V.V., Maksimenko Yu.A. "Structural synthesis of specialized metal-cutting systems for processing RK-profile rolls", *News of the South-Western State University*, 2012, no. 6 (45), pp. 65-70.
2. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Yerenkov O.Yu., Oleinik A.V., Sarilov M.Yu. "Methodology of structural - parametric synthesis of metal - cutting systems" ("Metodologija strukturno – parametriceskogo sinteza metallorazhishhih sistem"), Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, 2015, 282 p.
3. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. "Structurally-parametric synthesis of technological systems" ("Strukturno-parametriceskij sintez tehnologicheskikh sistem"), Kursk. state. tech. un-t. Kursk, 2010, 153 p.

4. Kuts V.V., Malneva Yu.A., Gorokhov A.A. "Methods of processing profile shafts with milling cutters with radial constructive feed", *Problems and achievements in innovative materials and technologies of mechanical engineering materials of the International scientific and technical conference*, 2015, pp. 156-158.
5. Kuts V.V., Ivakhnenko A.G., Stroublev M.L. "Synthesis of producing surfaces of milling cutters for machining shafts with an equiaxial contour", *Proceedings of the Tula State University, Technical science*, 2012, no. 8, pp. 42-48.
6. Kuts V.V., Ponomarev V.V. "Construction of a model for the formation of long shafts with a PK profile by a prefabricated disk milling cutter", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2017, no. 2 (322), pp.110-115.
7. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emelyanov S.G. Geometrical theory of surface shaping by cutting tools: monograph ("Geometricheskaja teorija formirovanija poverhnostej rezhushhimi instrumentami: monografija"), Kursk, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.
8. Emelyanov S.G., Kuts V.V. "Adjustment of the positions of replaceable polyhedral plates in the design of prefabricated disc milling cutters for processing the crankshaft necks", *STIN*, 2000, no. 2, pp. 12-15.
9. Emelyanov S.G., Gorokhov A.A., Kuts V.V. "Determination of the dimensions of the residual layers when milling with disc milling cutters", *Computer technologies in science, design and production I All-Russian Scientific and Technical Conference*, 1999, pp. 15-18.
10. Kuts V.V. "Calculation of the distortion values of the profile of the contoured surface when developing the CAD \ CAM - system of prefabricated shaped cutters", *Automation and modern technologies*, 2004, no. 11, pp. 5-7.
11. Emelyanov S.G., Kuts V.V. "Modeling of the processing of the crankshaft neck by a prefabricated disk milling cutter equipped with replaceable polyhedral plates", *Engineering*, 1999, no. 2. pp. 21-25.



## НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХСЛОЙНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ КАНАЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА САМОЛЕТА

© 2017 В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев

В работе рассмотрены вопросы по изготовлению канала воздухозаборника самолета. Приведены направления по повышению эффективности шумоглушения канала воздухозаборника за счет применения двухслойных звукопоглощающих конструкций (ЗПК). Применение двухслойных конструкций обеспечивает поглощение шума в широком спектре частот. Рассмотрены технологические процессы изготовления канала воздухозаборника. Представлен анализ точности процесса изготовления канала воздухозаборника, позволяющий прогнозировать получение заданных геометрических размеров его внутренней и наружной поверхностей. Обеспечение заданных размеров обшивки определяется процессом формообразования обшивки на оборудовании с ЧПУ с применением универсальных обтяжных пуансонов. С целью повышения акустической эффективности канала воздухозаборника разработаны предложения по изменению двухслойной конструкции ЗПК, когда промежуточная обшивка заменяется сеткой. Для проведения акустических исследований были изготовлены образцы для испытания на интерферометре и установке канал с потоком во ФГУП «ЦАГИ». Испытания показали, что применение сеток, расположенных в промежуточном слое панели, обеспечивает снижение шума на ~5дБ, что определяет эффективность нового решения по разработке двухслойной конструкции. Проведены прочностные испытания по определению предельных напряжений сжатия панели, подтверждены значительные запасы прочности конструкции

Ключевые слова: канал воздухозаборника, двухслойная конструкция, шумоглушение

### Введение

В последнее время ведется постоянное ужесточение международных норм стандарта ИКАО по снижению шума самолета, включая требования новой Главы 14 тома 1 Приложения 16 ИКАО, а также конкурентно необходимых уровней шума в салоне и кабине экипажа.

Эти решения ставят сложные задачи перед разработчиками новых изделий авиационной техники и направлены на разработку новых конструктивных решений двигателей, создавая их мал шумными, а также установку кожухов шумоглушения, снижающих шум вентилятора, компрессора, газогенератора и турбины. Особая роль отводится снижению шума струи.

Проводится комплекс исследований по проектированию канала воздухозаборника (рис. 1), облицованного звукопоглощающими конструкциями.

Так, на самолете Ил-86 в канале воздухозаборника впервые были установлены однослойные ЗПК, состоящие из сплошной и перфорированной обшивок, соединенных с сотовым наполнителем (рис. 2). Они обеспечивали

дискретное поглощение звуковых частот, что соответствовало «3 главе ИКАО».

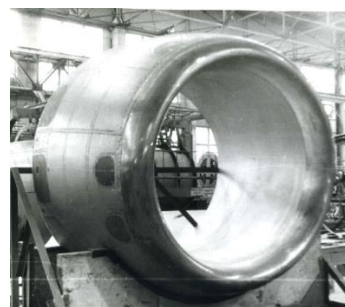


Рис. 1. Канал воздухозаборника



Рис. 2. Панель однослойной ЗПК: 1 – сотовый наполнитель; 2 – сплошная обшивка; 3 – перфорированная обшивка

На более поздних конструкциях самолетов были установлены в канале воздухозаборника двухслойные панели ЗПК (рис. 3). Они обеспечивают поглощение шума в широком спектре частот, что соответствовало «4 главе ИКАО». Однако этого недостаточно для выполнения норм «14 главы ИКАО», для чего требуется проведение комплекса исследований.

---

Максименков Владимир Иванович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [maksimenkov.v.i@mail.ru](mailto:maksimenkov.v.i@mail.ru)  
 Молод Марина Владиславовна - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: [molodmv@yandex.ru](mailto:molodmv@yandex.ru)  
 Федосеев Владислав Игоревич - Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», инженер-конструктор, e-mail: [vladislav.f@inbox.ru](mailto:vladislav.f@inbox.ru)



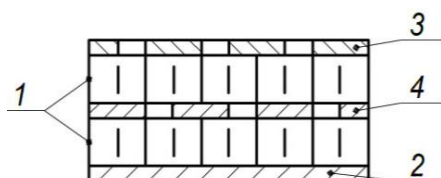


Рис. 3. Панель двухслойной ЗПК: 1 – сотовый наполнитель; 2 – сплошная обшивка; 3, 4 – перфорированные обшивки

Решая вопросы конструктивного характера по разработке новых типов более эффективных ЗПК, следует остановиться на технологических аспектах изготовления канала воздухозаборника.

### Анализ технологий

Материалы, применяемые для изготовления канала воздухозаборника, приведены в табл. 1.

Таблица 1

| Клееные панели    |                                                                                     |          |        |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| Обшивка           |                                                                                     |          |        |
| Материал          | Д19АТ                                                                               |          |        |
| Толщина, мм       | 1,0-1,2                                                                             |          |        |
| Заполнитель       |                                                                                     |          |        |
| Материал          | ССП1-Т                                                                              | ТССП10-П | АМг2-Н |
| Тип ячейки        |  |          |        |
| Размер ячейки, мм | 3,5; 4,2; 8,0                                                                       | 10,0     | 6,0    |
| Толщина, мм       | 0,2                                                                                 | 0,2      | 0,04   |
| Высота, мм        | ≥10                                                                                 |          |        |

Схема укрупненного технологического процесса изготовления панелей ЗПК приведена на рис.4.



Рис. 4

При изготовлении панелей ЗПК необходимо обеспечить их высокую точность, осуществляя базирование по обшивкам наружного контура.

Рассмотрим процесс увязки сечения канала воздухозаборника (рис.5).

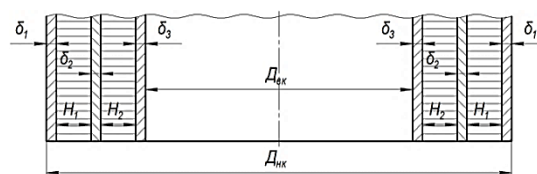


Рис. 5

Размеры по наружному контуру канала воздухозаборника определяются по зависимости (1):

$$D_{нк} = D_{вк} + 2\delta_1 + 2\delta_2 + 2\delta_3 + 2H_1 + 2H_2 + C \quad (1)$$

где  $D_{нк}$  - диаметр наружного контура канала воздухозаборника;

$D_{вк}$  - диаметр внутреннего контура канала воздухозаборника;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  - толщина листов обшивок;

$H_1, H_2$  - высота сотового наполнителя;

$C$  - погрешность  $D_{вк}$  из-за температурных характеристик оснастки.

Погрешность характерного размера по наружному контуру канала воздухозаборника (2):

$$\Delta D_{нк} = \Delta D_{вк} + \Delta 2\delta_1 + \Delta 2\delta_2 + \Delta 2\delta_3 + \Delta 2H_1 + \Delta 2H_2 \quad (2)$$

где  $\Delta D_{нк}, \Delta D_{вк}, \Delta \delta_1, \Delta \delta_2, \Delta \delta_3, \Delta H_1, \Delta H_2$  - погрешности соответствующих размеров.

Анализ приведенных зависимостей показывает необходимость получения обшивок с высокой точностью, а также раскрой на требуемую высоту сотового наполнителя.

Рассмотрение технологического процесса показывает, что требуемая точность сплошных обшивок достигается формообразованием на обтяжном прессе [1].

Особая сложность возникает при формообразовании перфорированных обшивок, заключающаяся в получении после обтяжки границ зон перфорирования [2].

При формообразовании обшивок для каждого слоя и его частей изготавливают обтяжные пуансоны с требуемой точностью и жесткостью. Процесс формообразования обшивок целесообразно осуществлять по разработанному способу [3], применяя смазку в виде двухслойной полиэтиленовой пленки, что обеспечивает выравнивание деформаций по поверхности обшивки и исключает вероятность разрыва материала обшивки.

Для изготовления панелей рекомендуется применять универсальные конструкции пуансонов [4], обеспечивающих получение обшивок требуемого качества.

Процесс соединения обшивок с заполнителем осуществляется в автоклаве с применением пленочного клея ВК36 под действием атмосферного давления, создаваемого вакуумированием специального мешка, в котором находится конструкция канала воздухозаборника.

### Новая конструкция

С целью повышения акустической эффективности канала воздухозаборника разработан вариант двухслойной сотовой панели, в которой промежуточная обшивка заменяется сеткой [5].

Для проведения испытаний образцов выбирались три типа сеток, обладающих различной воздухопроницаемостью:

1. С-120 ТУ 14-4-698-98;
2. С-450 ТУ 14-4-432-94;
3. С685 ТУ 14-4-697-76.

Образцы двухслойной конструкции были изготовлены по технологии предприятия с установкой промежуточного слоя сетки С685 для испытания на интерферометре и стенде канал с потоком во ФГУП «ЦАГИ» и последующих прочностных испытаниях.

Результаты сравнительных испытаний показали, что эффективность образцов конструкции с промежуточным слоем сетки выше на 5 дБ по сравнению с существующей конструкцией. При этом упрощается технология изготовления промежуточного слоя и в целом канала воздухозаборника за счет сокращения процессов формообразования перфорированных обшивок и изготовления обтяжных пуансонов (пункты 2 и 3 на рис.3). Также достигается снижение веса промежуточного слоя более чем в 4 раза.

После проведения акустических испытаний проводились испытания на сжатие образцов двухслойных панелей (рис.6) на испытательной машине, как показано на рис. 7.

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Максимальное значение напряжения сжатия  $[\sigma_{сж}]$ , при котором происходит потеря устойчивости сотового заполнителя, составляет 3,6 МПа, что значительно выше давления, воздействующего на сотовый заполнитель при термостатировании в автоклаве.

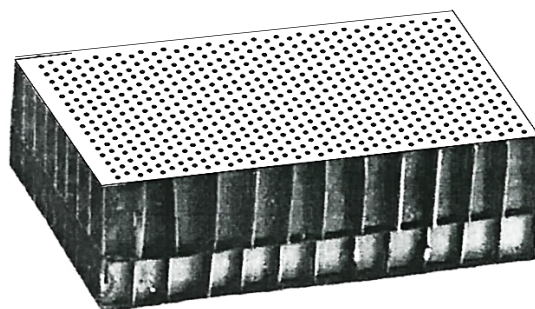


Рис. 6. Образец двухслойной панели

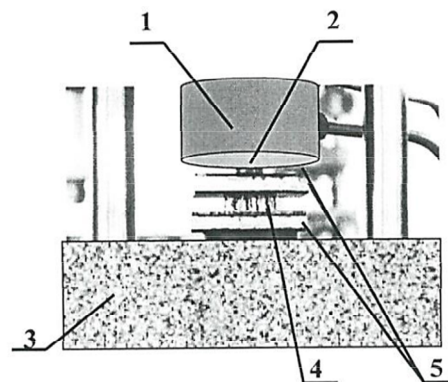


Рис. 7. Устройство для испытания на сжатие образцов многослойных панелей: 1 - траверса; 2 - шаровая опора; 3 - стол; 4 - панель; 5 - опорные плиты

Таблица 2

| Тип панелей                        | Обшивка  |             | Заполнитель |                   |             |                 | Напряжение сжатия, МПа |
|------------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-----------------|------------------------|
|                                    | Материал | Толщина, мм | Материал    | Размер ячейки, мм | Толщина, мм | Высота слоя, мм |                        |
| Двухслойная с сотовым заполнителем | Д19АТ    | 1,2         | ССП-1       | 8,0               | 0,2         | 20÷8            | 3,6<br>0               |

При испытании выявлено, что потеря устойчивости сотового заполнителя происходит сначала в слое с наибольшей высотой.

Проведенные испытания указывают на эффективность применения сеток в промежуточном слое панелей и проведения дальнейших исследований конструкции канала воздухозаборника.

### Выводы

1. Проведен анализ применения однослойных и двухслойных ЗПК с учетом ужесточающихся требований норм ИКАО, подтверждающий необходимость разработки новых, более эффективных ЗПК.

2. Рассмотрена схема укрупненного технологического процесса изготовления двухслойных ЗПК для канала воздухозаборника, определившая направление совершенства-

ния технологии для обеспечения точности конструкции.

3. Составлен баланс точности получения конструктивных элементов канала воздухозаборника, показывающий на необходимость разработки технологий, обеспечивающих требуемые геометрические размеры сплошных и перфорированных обшивок при формообразовании на обтяжных прессах и раскроя сотового заполнителя на требуемую высоту.

4. Предложена новая двухслойная конструкция для канала воздухозаборника с промежуточным сеточным слоем, обеспечивающая:

повышение эффективности шумоглушения;

требуемую прочность;

снижение веса промежуточного слоя;

снижение трудоемкости изготовления.

#### Литература

1. Молод М.В. Управление процессом формообразования обшивок на оборудовании с ЧПУ /М.В. Мо-

лод//Вестник Воронежского государственного технического университета. -2011. – Т.7. - №12.2. - С.62-64.

2. Молод М.В. Определение параметров перфорированных обшивок при изготовлении сотовых панелей звукопоглощающих конструкций/ М.В. Молод// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С.П. Королева (Национальный исследовательский университет). Спец. выпуск, подготовленный по материалам междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». 2014.-№4.4-№5(47).- С. 56-62.

3. Пат. 2459680 Российская Федерация, С2 МПК В21 D 11/20. Способ обтяжки листовых материалов/ В.И. Максименков, М.В. Молод и др. - №2009143306/02; Бюл. №24.-4с.: от 27.08.2012.

4. Молод М.В. Разработка универсального пуансона/ М.В. Молод// Вестник Воронежского государственного технического университета. -2016. - Т.12. - №1. - С.55-57.

5. Пат. 2588516 Российская Федерация, С2 МПК 1332133/12. Комбинированная сотовая панель/ В.И. Максименков, М.В. Молод и др. - №2014117425; Бюл. №31. от 06.06.2016.

Воронежский государственный технический университет  
Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» в г. Воронеже

## THE WAYS TO INCREASE EFFICIENCY OF ACOUSTIC HONEYCOMB SANDWICH FOR AN AIRCRAFT AIR INTAKE DUCT

V.I. Maksimenkov<sup>1</sup>, M.V. Molod<sup>2</sup>, V.I. Fedoseev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: molodmv@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

<sup>3</sup>Engineer, Public company "Corporation "Irkut",  
e-mail: vladislav.f@inbox.ru

The article discusses an aircraft air intake duct manufacturing. The ways to increase efficiency of an aircraft air intake duct are described using acoustic honeycomb sandwich constructions. Application of sandwich constructions provides noise reduction in the wide frequency spectrum.

The technological processes of the air intake duct manufacturing are described. The analysis of the accuracy of the manufacturing process of the air intake channel is presented. This allows to predict the obtaining of the given geometric dimensions of the outer and inner surfaces of air intake duct. The provision of specified dimensions of the skin is determined by the process of shaping on CNC equipment with the use of universal punches.

To improve the acoustic efficiency of the air intake duct, proposals have been developed to change the two-layer design of the noise reduction structures, when the intermediate skin is replaced by a grid.

To carry out acoustic studies, samples were prepared for testing with an interferometer on the stand "channel with flow" in the Federal State Unitary Enterprise "Central Aero-Hydrodynamical Institute". The tests showed that the use of grids located in the intermediate layer of the panel provides a noise reduction of ~ 5 dB, which determines the effectiveness of the new solution for the development of a two-layer structure.

The compressive stress limit values are defined for new sandwich constructions by durability tests. The obtained data proved a sufficient margin of safety

Key words: air intake duct, honeycomb sandwich, noise reduction

#### References

1. Molod M.V. "The control of sheet forming by press with numerical control", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no 12.2, pp.62-64.

2. Molod M.V. "The parameters of perforated sheet definition during acoustic honeycomb sandwich manufacturing", *Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2014, no. 4.4-№5(47), pp. 56-62.

3. Maksimenkov V.I., Molod M.V. "The way to sheet metall stretching" ("Sposob obtyazhki listovykh materialov"), Patent 2459680 from 27.08.2012 №2009143306/02.

4. Molod M.V. "All round punch development", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 55-57.

5. Maksimenkov V.I., Molod M.V. "The composite honeycomb panel" ("Kombinirovannaya sotovaya panel", Patent 2588516 from 06.06.2016. №2014117425.

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ АЗОТИРОВАННОГО ТИТАНА

© 2017 В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин

В данной статье приведены результаты изучения влияния предварительного азотирования титана на развитие его ползучести в условиях диффузионной сварки.

Исследования проводили на образцах диаметром 5 и высотой 10 мм из сплавов ОТ4-1, которые нагружали сжимающим давлением от 1,0 до 3,0 МПа при температурах 850-950 °С (ОТ4). Предварительное азотирование выполняли при 800 °С в течение 60 мин. в среде особо чистого азота.

В ходе работы установлено, что величина накопленной деформации при одинаковых параметрах режимов испытания во всех случаях была значительно меньше у азотированных образцов, хотя с увеличением длительности испытания скорость их ползучести возрастает, приближаясь к скорости ползучести неазотированных образцов. На кривых ползучести выделяются близкие к линейным участки в начале и конце зависимостей и нелинейный участок, обусловленный переходом от одного режима ползучести к другому. Длительность существования линейных участков на начальном этапе зависимостей находится в экспоненциальной зависимости от температуры и с ее повышением уменьшается.

Определен механизм высокотемпературной деформации азотированных образцов в зависимости от длительности испытания: за счет размножения и перемещения дислокаций на начальных участках и вязкого течения – на конечных участках зависимостей.

На основании проведенных исследований дано объяснение кинетических закономерностей развития высокотемпературной ползучести азотированных образцов и получены выражения для расчета их скорости ползучести на линейных начальных и конечных участках

Ключевые слова: титановые сплавы, ползучесть, азотирование

### Введение

При диффузионной сварке титановых тонкостенных слоистых конструкций, представляющих собой сочетание двух несущих обшивок и расположенного между ними сотового заполнителя, сварочное давление ограничивается устойчивостью сотового заполнителя [1]. Потеря устойчивости заполнителя происходит в процессе развития высокотемпературной ползучести под действием сжимающего давления при некоторой критической величине накопленной деформации  $\varepsilon_{кр}$ .

Проведенные испытания показали, что, например, заполнитель из сплава ОТ4-1 высотой 20 мм, характеризуемый отношением  $\delta/D = 0,01...0,02$  (где  $\delta$  – толщина стенки сотового заполнителя;  $D$  – диаметр окружности, вписанной в шестигранную ячейку), теряет устойчивость при  $\varepsilon_{кр} < (1,25...1,5) \%$ , что значительно меньше величины деформации, необходимой для формирования диффузионного соединения [1, 2].

Из анализа температурных зависимостей сварочного давления  $p=\varphi(t)$ , обеспечивающего получение сварного соединения, равнопрочного основному металлу, и предельного напряже-

ния потери устойчивости заполнителя  $\sigma=\varphi(t)$  следует, что диффузионной сваркой при  $p \leq \sigma$  сотовые конструкции если и могут быть получены, то только в очень узком диапазоне режимов сварки [1].

Расширение области допустимых давлений при диффузионной сварке сотовых конструкций и, как следствие этого, повышение качества и надежности диффузионных соединений несущих обшивок с сотовым заполнителем связано с разработкой способов, обеспечивающих повышение устойчивости заполнителя при температурах сварки и локализацию деформации в зоне соединения.

Результаты, приведенные в работе [3], показали, что испытание титана на ползучесть в азотосодержащей среде сопровождается образованием на его поверхности нитридов и повышением сопротивления высокотемпературной деформации. Однако этот способ не может быть применен при диффузионной сварке трехслойных конструкций с сотовым заполнителем, так как в этом случае будет происходить взаимодействие свариваемых поверхностей с активной газовой азотосодержащей средой.

Целью данной работы является установление влияния предварительного азотирования титана на развитие его ползучести в условиях диффузионной сварки.

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [otsp@vorstu.ru](mailto:otsp@vorstu.ru)  
 Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [bulkov\\_ab@mail.ru](mailto:bulkov_ab@mail.ru)  
 Корчагин Илья Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [otsp@vorstu.ru](mailto:otsp@vorstu.ru)



## Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили на образцах диаметром 5,0 мм и высотой 10 мм из сплава ОТ4–1 в интервале температур 850–950 °С и давлений от 1,0 до 3,0 МПа. Испытания на ползучесть в условиях сжатия приводили в вакууме  $10^{-2}$  Па. Давление к образцу прикладывали после достижения им температуры испытания. Деформацию образцов в процессе ползучести измеряли индикатором часового типа (ИЧ) с ценой деления 10 мкм или измерительной головкой 1МИГ с ценой деления 1 мкм.

Перед испытаниями на ползучесть одну партию образцов для получения на их поверхности нитридов отжигали при 800 °С в течение 60 мин в среде особо чистого азота (ГОСТ 9293), а другую партию образцов отжигали по этому же режиму, но в среде аргона высшего сорта (ГОСТ 10157), что обеспечивало формирование однотипной равноосной мелкозернистой микроструктуры с размерами зерен 5...8 мкм.

### Ползучесть неазотированных образцов

На рис. 1, а приведены типичные кривые  $\varepsilon=\varphi(\tau)$ , отражающие деформацию образцов во времени в процессе ползучести в зависимости от температуры. На зависимостях  $\varepsilon=\varphi(\tau)$  присутствует два участка, соответствующих неустановившейся и установившейся ползучести. Изменение давления в диапазоне от 1,0 до 3,0 МПа не приводит к изменению характера зависимостей  $\varepsilon=\varphi(\tau)$  (рис. 1, б).

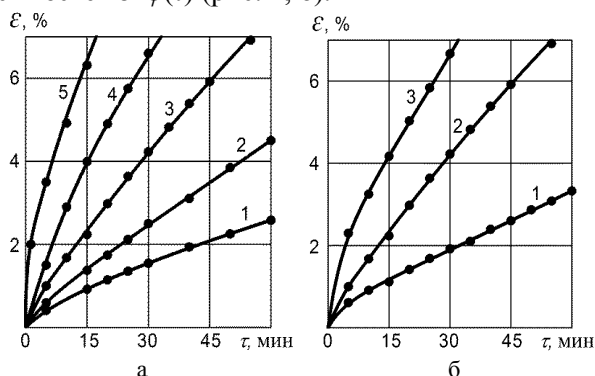


Рис. 1. Ползучесть неазотированных образцов из сплава ОТ4–1: а – при температурах, °С: 1 – 850; 2 – 875; 3 – 900; 4 – 925; 5 – 950 и давлении 2,0 МПа; б – при давлениях, МПа: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0 и температуре 900 °С

Скорости установившейся ползучести  $\dot{\varepsilon}$ , вычисленные по линейным участкам зависимостей  $\varepsilon=\varphi(\tau)$ , с повышением температуры и увеличением давления возрастают.

Независимо от атомного механизма, контролирующего высокотемпературную ползу-

честь, скорость деформации является экспоненциальной функцией температуры [4]:

$$\dot{\varepsilon} \sim \exp(-Q/RT), \quad (1)$$

где  $Q$  – энергия активации процесса, контролирующего ползучесть.

Опытные данные в координатах  $\ln \dot{\varepsilon} - 1/T$  ложатся на прямую линию (рис. 2, поз. 1), из тангенса угла наклона которой следует, что эффективная энергия процесса ползучести неазотированного сплава ОТ4–1 в интервале температур 850–950 °С составляет 225 кДж/моль.

В зависимости от атомного механизма, контролирующего установившуюся ползучесть, скорость деформации металлов обычно находится в линейной ( $\dot{\varepsilon} \sim p$ ), степенной ( $\dot{\varepsilon} \sim p^n$ ) или экспоненциальной ( $\dot{\varepsilon} \sim \exp(-\gamma p/RT)$ ) зависимости от напряжения [4].

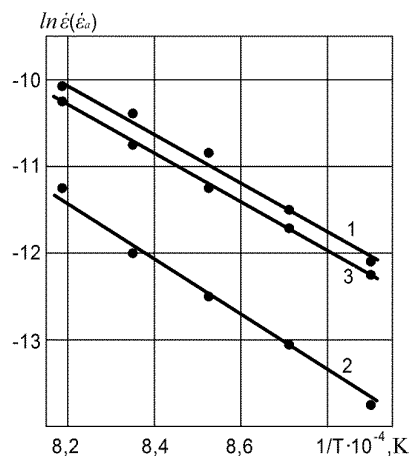


Рис. 2. Температурная зависимость скорости ползучести образцов из сплава ОТ4–1 при давлении 2,0 МПа: 1 – неазотированных; 2, 3 – азотированных (2 – на начальном, 3 – на конечном линейном участке зависимости  $\varepsilon_a=\varphi(\tau)$ )

В логарифмических координатах экспериментальные значения скорости ползучести неазотированных образцов при температуре 900 °С в зависимости от давления укладываются на прямую линию (рис. 3) с тангенсом угла наклона 1,2.

Установленные закономерности высокотемпературной деформации неазотированных образцов из сплава ОТ4–1 и их сопоставление с более ранними исследованиями ползучести титана [1, 2] дают основание считать, что ползучесть образцов осуществлялась по механизму вязкого течения, контролируемого процессами, развивающимися по границам зерен.

Оценку относительной скорости ползучести ( $s^{-1}$ ) неазотированных образцов из сплава ОТ4–1 в интервале температур 850–950 °С и давлений 1,0–3,0 МПа можно выполнять по выражению

$$\dot{\varepsilon} = 8,9 \cdot 10^4 \cdot p^{1,2} \cdot \exp(-225000/RT). \quad (2)$$

### Ползучесть азотированных образцов

На рис. 4 приведены типичные кривые ползучести азотированных образцов в зависимости от температуры (рис. 4, а) и от давления (рис. 4, б).

Из сопоставления зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  (рис. 4) с  $\varepsilon = \varphi(\tau)$  (рис. 1), полученных при одинаковых режимах испытания ( $t$ ,  $p$  и  $\tau$ ), видны принципиальные различия, как в кинетике развития, так и в значениях высокотемпературной деформации. Величина накопленной деформации при одинаковых параметрах режимов испытания во всех случаях была значительно меньше у азотированных образцов, хотя с течением времени испытания скорость их ползучести возрастает, приближаясь к скорости ползучести неазотированных образцов.

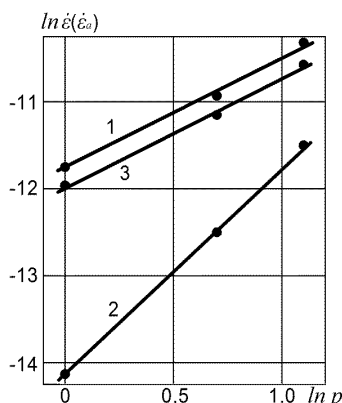


Рис. 3. Логарифмическая зависимость скорости ползучести от давления при 900 °С образцов из сплава ОТ4-1: 1 – неазотированных; 2, 3 – азотированных (2 – на начальном, 3 – на конечном линейном участке зависимости  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$ )

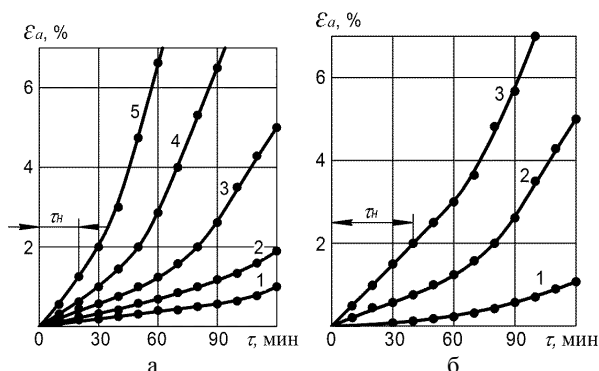


Рис. 4. Ползучесть азотированных образцов из сплава ОТ4-1: а – при температурах, °С: 1 – 850; 2 – 875; 3 – 900; 4 – 925; 5 – 950 и давлении 2,0 МПа; б – при давлениях, МПа: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0 и температуре 900 °С

На кривых ползучести азотированных образцов (рис. 4) можно выделить линейные (или достаточно близкие к линейным) участки в начале и конце зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  и нелинейный участок, обусловленный переходом от одного режима ползучести к другому.

При этом длительность существования линейных участков  $\tau_n$  – на начальном этапе зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  уменьшается с повышением температуры (рис. 4, а) и практически не зависит от величины приложенного давления (рис. 4, б).

Скорости ползучести азотированных образцов  $\dot{\varepsilon}_a$ , вычисленные на начальных и конечных линейных участках зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$ , с повышением температуры и увеличением давления возрастают. Зависимости  $\ln \dot{\varepsilon}_a = \varphi(1/T)$  представляют собой прямые линии (рис. 2, поз. 2 и 3), из угловых коэффициентов которых следует, что эффективная энергия активации процесса ползучести азотированных образцов на начальном этапе высокотемпературной деформации составляет 265 кДж/моль (что несколько выше энергии активации ползучести неазотированных образцов) и 220 кДж/моль – на конечном этапе.

Зависимости скорости ползучести азотированных образцов от давления при температуре 900 °С в логарифмических координатах представляют собой прямые линии (рис. 3, поз. 2 и 3) с тангенсом угла наклона 2,3 и 1,3, т.е. на начальных линейных участках зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  скорость ползучести  $\dot{\varepsilon}_a \sim p^{2,3}$ , на конечных –  $\dot{\varepsilon}_a \sim p^{1,3}$ .

Полученные результаты позволяют считать, что высокотемпературная деформация азотированных образцов в зависимости от длительности испытания осуществляется по разным механизмам: за счет размножения и перемещения дислокаций на начальных участках и вязкого (или приближающегося к нему) течения – на конечных участках зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  [4].

Для оценки относительной скорости ползучести ( $s^{-1}$ ) азотированных образцов из сплава ОТ4-1 на линейных начальных и конечных участках можно использовать, соответственно, выражения:

$$\dot{\varepsilon}_a = 4,8 \cdot 10^5 \cdot p^{2,3} \cdot \exp(-265000/RT), \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_a = 4,0 \cdot 10^4 \cdot p^{1,3} \cdot \exp(-220000/RT). \quad (4)$$

Наблюдаемые кинетические закономерности развития высокотемпературной ползучести азотированных образцов (рис. 4) можно объяснить, считая, что первостепенную роль в развитии пластической деформации играют приповерхностные слои, где происходит зарождение, размножение и перемещение дислокаций. При этом деформация вначале охватывает только тонкий поверхностный слой, а затем распространяется на внутренние объемы [5]. Наличие на поверхности образцов нитрида

ных слоев препятствует выходу дислокаций на поверхность, что приводит к уменьшению плотности подвижных дислокаций и величины накопленной деформации  $\varepsilon_a$  за одинаковые промежутки времени (т.е. скорости ползучести  $\dot{\varepsilon}_a$ ) на начальных участках (рис. 4). С увеличением длительности испытания свыше  $\tau > \tau_n$  в результате развития диффузии азота из поверхностных нитридных слоев вглубь титана происходит понижение его концентрации в поверхностных слоях и уменьшение их способности блокировать движение дислокаций. В результате этого скорость ползучести  $\dot{\varepsilon}_a$  возрастает, приближаясь к скорости ползучести неазотированных образцов. Так как диффузия азота в титане является термически активируемым процессом, то и время, необходимое для понижения концентрации азота в нитридном слое до некоторого критического значения, должно уменьшаться с повышением температуры, что и наблюдается в экспериментах (рис. 5, а).

Из рассмотрения нитридного слоя на титане как плоского источника азота на поверхности полубесконечного тела и решения уравнения Фика для этого случая [6] следует, что время  $\tau_n$ , в течение которого происходит понижение концентрации азота  $C$  в поверхностном нитридном слое до некоторого критического значения  $C_{кр}$  (и как результат этого уменьшение сопротивления высокотемпературной деформации, рис. 4), должно экспоненциально зависеть от температуры, т.е.  $\tau_n \sim \exp(E/RT)$ , где  $E$  – энергия активации процесса диффузии азота в титане, которая, например, согласно [6] для  $\alpha$ -титана составляет 190 кДж/моль.

Построение на основе экспериментальных данных зависимости  $\ln \tau_n - 1/T$  (рис. 5, б) позволяет оценить эффективное значение  $E$ , которое составило 205 кДж/моль, что достаточно близко к приведенному выше значению энергии активации диффузии азота в титане. Это дает основание считать, что смена механизма ползучести азотированных образцов с течением времени испытания (при  $\tau > \tau_n$ ) связана с понижением концентрации азота в нитридном слое и контролируется процессом диффузии азота в титане.

Полученные результаты позволяют решить практическую задачу: дать количественную оценку эффективности предварительного азотирования сотового заполнителя из сплава ОТ4-1 с целью повышения его предельного напряжения сжатия  $\sigma$  и расширения области допустимых давлений  $p$  при диффузионной сварке.

Задаваясь допустимой величиной относительной деформации  $\varepsilon(\varepsilon_a)=0,015$  свариваемых заготовок, временем испытания  $\tau=\tau_n$  (рис. 5, а) и используя полученные выражения (1) и (2), можно вычислить допустимое значение  $p$ , приравняв его  $\sigma$ .

Результаты расчетов приведены на рис. 6, из которых видно, что предварительное азотирование сплава ОТ4-1 при 800 °С в течение одного часа позволяет повысить допустимые напряжения сжатия свариваемых заготовок более чем в 3 раза по сравнению с неазотированным материалом.

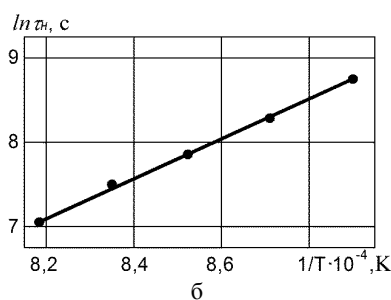
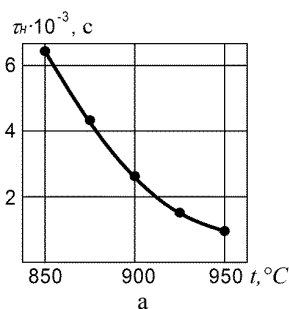


Рис. 5. Зависимость длительности существования начальных линейных участков  $\tau_n$  на кинетических кривых  $\varepsilon_a=\varphi(\tau)$  (рис. 4) от температуры

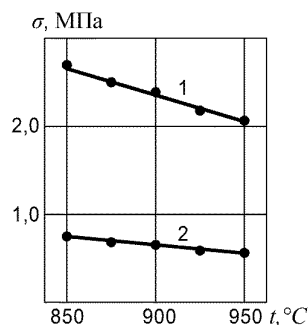


Рис. 6. Зависимость предельных напряжений сжатия сотового заполнителя из сплава ОТ4-1 от температуры и предварительной термической обработки: 1 – азотирование, 2 – отжиг в среде аргона

## Выводы

1. Показано, что предварительное газотермическое азотирование титанового сплава ОТ4-1 может являться эффективным средством

повышения его сопротивления высокотемпературной деформации.

2. В изотермических условиях испытания азотированных образцов на кинетических кривых высокотемпературной деформации можно выделить линейные (или достаточно близкие к ним) участки в начале и конце зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$ , характеризующиеся различными скоростями деформации и свидетельствующие о смене режимов ползучести.

3. Длительность существования линейных участков на начальном этапе зависимостей  $\varepsilon_a = \varphi(\tau)$  находится в экспоненциальной зависимости от температуры и с ее повышением уменьшается.

4. Смена режимов ползучести в изотермических условиях обусловлена развитием процесса диффузии азота из нитридных слоев на поверхности титана в металлическую основу и, как следствие этого, снижения их влияния на развитие деформации.

## Литература

1. Пешков В.В. Диффузионная сварка титановых тонкостенных слоистых конструкций / В.В. Пешков, А.Б. Булков. – М.: РИТМ, 2016. – 242 с.
2. Диффузионная сварка титана и его сплавов / А.В. Бондарь, В.В. Пешков, Л.С. Киреев, В.В. Шурупов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1998. – 256 с.
3. Пешков В.В. Высокотемпературная ползучесть титана при испытаниях в азотосодержащих средах / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. -Т. 12. – № 2. – С. 108 – 112.
4. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов / В.М. Розенберг. – М.: Металлургия, 1973. – 326 с.
5. Крамер И. Влияние среды на механические свойства металлов / И. Крамер, Л. Демер. – М.: Металлургия, 1964. – 131 с.
6. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах / П. Шьюмон. – М.: Металлургия, 1966. – 195 с.
7. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У. Цвиккер. – М.: Металлургия, 1979. – 511 с.

Воронежский государственный технический университет

## HIGH TEMPERATURE CREEP OF THE NITRIDED TITAN

V.V. Peshkov<sup>1</sup>, A.B. Bulkov<sup>2</sup>, I.B. Korchagin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: [otsp@vorstu.ru](mailto:otsp@vorstu.ru)

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: [bulkov\\_ab@mail.ru](mailto:bulkov_ab@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: [otsp@vorstu.ru](mailto:otsp@vorstu.ru)

This article presents the results of studying the effect of preliminary nitriding of titanium on the development of its creep under conditions of diffusion welding. The studies were carried out on samples with a diameter of 5 and a height of 10 mm from alloys OT4-1, which were loaded with a compressive pressure from 1.0 to 3.0 MPa at 850-950 °C (OT4). The preliminary nitriding was carried out at 800 °C. for 60 minutes in pure nitrogen atmosphere.

In the course of work it was established that the value of the accumulated deformation at identical parameters of the test regimes in all cases was significantly lower for nitrided samples, although with increasing test duration their creep rate increases, approaching the creep rate of unnitrided samples. Creep curves distinguish near-linear areas at the beginning and end of the dependencies and a nonlinear region due to the transition from one creep regime to another. The duration of the existence of linear sections at the initial stage of the dependences is in an exponential dependence on temperature and decreases with temperature rising.

The mechanism of high-temperature deformation of nitrided samples is determined depending on the duration of the test: by multiplication and displacement of dislocations in the initial sections and viscous flow, on the final sections of the dependences.

Based on the studies carried out, the kinetic regularities of the development of high-temperature creep of nitrided samples are explained and expressions are obtained for calculating their creep rate at linear initial and final sections

Key words: titanium alloys, creep, nitriding

## References

1. Peshkov V.V., Bulkov A.B. "Diffusion welding of titanium thin-walled layered structures" ("Diffuzionnaya svarka titanovykh tonkostennykh sloistyykh konstruksiy"), Moscow, RITM, 2016, 242 p.
2. Bondar A.V., Peshkov V.V., Kireev L.S., Shurupov V.V. "Diffusion welding of titanium and its alloys" ("Diffuzionnaya svarka titana i yego splavov"), Voronezh, VSU, 1998, 256 p.
3. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Korchagin I.B. "High-temperature creep of titanium during testing in nitrogen-containing media, *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2016, vol. 12, no. 2, pp. 108-112.
4. Rozenberg V.M. "The fundamentals of the heat resistance of metallic materials" ("Osnovy zharoprochnosti metallicheskih materialov"), Moscow, Metallurgy, 1967, 276 p.
5. Kramer I., Demer L. "Influence of the medium on the mechanical properties of metals" ("Vliyaniye sredy na mekhanicheskiye svoystva metallov"), Moscow, Metallurgy, 1964, 131 p.
6. Shymon P. "Diffusion in solids" ("Diffuziya v tverdykh telakh"), Moscow, Metallurgy, 1966, 195 p.
7. Zwicker U. "Titanium and its alloys" ("Titan i yego splavy"), Moscow, Metallurgy, 1979, 511 p.



## СИНТЕЗ ДОПУСКОВ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

© 2017 О.В. Аникеева

В работе поставлена и решена комплексная задача создания полнофункционального математического аппарата для перевода требований к параметрам точности обработки и расположения поверхностей в требования к точности изготовления и сборки узлов станка. Цель работы заключается в создании метода синтеза допусков на значения геометрических погрешностей металлорежущих станков. Впервые обосновано исключение при расчетах точности процессов формообразования, а также конкретных видов и типов режущих инструментов, применяемых при обработке. Исследованы два сложившихся подхода к оценке геометрических погрешностей обработки, основанные на применении матриц преобразований однородных координат и полной вариации полученных зависимостей. Применение этих подходов принципиально не поддерживает разделение станка и инструмента, а также требований к параметрам их точности и точности обработки деталей. Преимущества созданного математического аппарата показаны при анализе геометрической точности многокоординатного станка на основе полученных зависимостей, впервые представленных в данной работе. На основе созданного математического аппарата разработан метод синтеза допусков на значения геометрических погрешностей металлорежущих станков. Выделены ключевые вопросы по основным этапам предложенного метода синтеза допусков, требующие принятия ключевых решений. Даны примеры выявления размерных связей между геометрическими погрешностями станка и погрешностями обработанных поверхностей при анализе формообразующей системы пятикоординатного станка. Работа полезна для научных работников, занимающихся исследованием геометрической точности обработки на металлорежущих станках

Ключевые слова: металлорежущие станки, погрешности обработки, геометрическая точность

### Введение

Геометрическая точность металлорежущих станков оказывает непосредственное влияние на точность изготавливаемых на них деталей машин и на их эксплуатационные характеристики. Необоснованное ужесточение допусков на параметры геометрической точности станков существенно повышает себестоимость обработки и может привести к снижению конкурентоспособности продукции машиностроения.

Суть синтеза допусков заключается в формировании системы линейных уравнений (неравенств), связывающих требования к параметрам точности обработанных поверхностей с требованиями к точности узлов станка и его базовых поверхностей для заготовки и инструмента, возникающих при изготовлении и сборке. Для случая, когда количество различных требований к геометрической точности всех обрабатываемых на станке поверхностей равно количеству его геометрических погрешностей, задача синтеза состоит в решении системы совместных линейных уравнений с квадратной матрицей коэффициентов, определитель которой не равен

нулю. Если количество различных требований к геометрической точности обрабатываемых поверхностей больше количества геометрических погрешностей станка, то задача состоит в решении переопределенной системы линейных уравнений. В наиболее часто встречающемся случае количество требований меньше количества геометрических погрешностей станка, и здесь существует множество решений задачи синтеза допусков. Последний случай при наличии одного требования изучен в теории размерных цепей, где предложены различные методы решения задачи синтеза допусков. Таким образом, актуальной является задача создания математического аппарата для перевода требований к параметрам точности обработанных поверхностей в требования к точности изготовления и сборки узлов станка.

При решении этой задачи существует практическая потребность в анализе точности станка без рассмотрения конкретных видов и типов режущих инструментов, применяемых при обработке сложных поверхностей, уравнения для которых неизвестны производителю.

Целью работы является создание метода синтеза допусков на значения геометрических погрешностей металлорежущих станков без учета конкретных видов и типов режущих инструментов, применяемых при обработке.

---

Аникеева Олеся Владимировна – ЮЗГУ, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник,  
e-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru

## Подходы к оценке геометрических погрешностей обработки

При расчетах точности станков сложились два подхода к оценке геометрических погрешностей обработки, основанные на применении матриц преобразований однородных координат и полной вариации полученных зависимостей.

Первый подход основан на рассмотрении двух ветвей – заготовки и инструмента относительно неподвижного звена – станины станка и определении их номинальных положений при обработке [1, 2] и др. Контакт заготовки и инструмента происходит в некоторой точке (точке резания), и при отсутствии геометрических погрешностей ФС определяется так:

$$A_{ви} r_i = A_{вз} r_z, \quad (1)$$

где  $A_{ви}$  и  $A_{вз}$  – матрицы преобразований координат, описывающих движения узлов ФС при обработке, от станины к режущему инструменту (ветвь инструмента) и к заготовке (ветвь заготовки), соответственно;  $r_i$  и  $r_z$  – радиусы-векторы инструмента и заготовки,  $r_i = (r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}, 1)^T$ ,  $r_z = (r_{zx}, r_{zy}, r_{zz}, 1)^T$ ,  $T$  – символ транспонирования.

Вектор полной геометрической погрешности  $E$  находится из полной вариации ( $\Delta$ ) выражения (1) и равен

$$E = \Delta A_{вз} r_z - \Delta A_{ви} r_i. \quad (2)$$

Недостатком этого подхода является то, что нужно определить радиусы-векторы инструмента и заготовки. Тем не менее, этот подход лежит в основе стандарта ISO 230-1:2012 [3], в котором используется понятие «функциональная точка» (рис. 1). Она определена как «центральная точка режущего инструмента или точка, связанная с компонентом станка, в которой режущий инструмент входит в контакт с заготовкой для удаления слоя материала» [3].

Отметим, что если определение функциональной точки для точечного инструмента не представляет трудностей, обычно это вершина резца, то для лезвийного инструмента (фрезы) и инструмента, работающего поверхностью (шлифовальный круг) требуется учет связей однопараметрического или двухпараметрического огибания, соответственно.

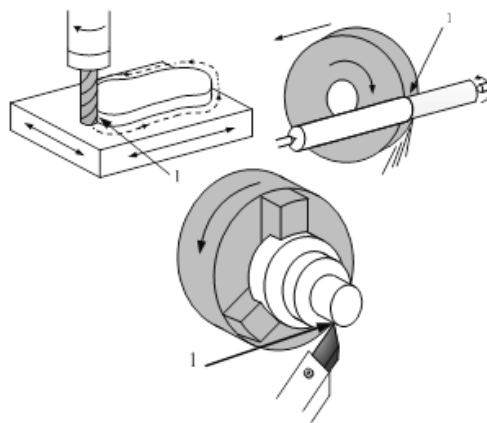


Рис. 1. Примеры функциональных точек по ISO 230-1:2012

Второй подход основан на использовании функции формообразования, которая определяется положением кромки режущего инструмента в системе координат обрабатываемой заготовки следующим образом [4]:

$$r_0 = A_{ст} r_i, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус-вектор, связывающий координаты точек режущего инструмента в системах координат самого режущего инструмента и обрабатываемой детали;  $A_{ст}$  – матрица преобразований координат станка, являющаяся произведением матриц элементарных перемещений;  $r_i$  – радиус-вектор формообразующих точек инструмента.

После наложения на функцию формообразования различных связей (огибания, скрытых и функциональных)  $r_0$  в выражении (3) будет соответствовать уравнению конкретной идеальной обрабатываемой поверхности.

Полная вариация выражения (3) имеет вид

$$\Delta r_0 = \Delta A_{ст} r_i + A_{ст} \Delta r_i, \quad (4)$$

но полагая режущий инструмент идеальным [5], т.е.  $\Delta r_i = 0$ , это выражение будет иметь вид

$$\Delta r_0 = \Delta A_{ст} r_i. \quad (5)$$

В работе [4] были получены векторный и скалярные балансы точности токарного станка при обработке различных поверхностей точечным режущим инструментом, т.е. для  $r_i = (0, 0, 0, 1)^T$ , на основе которых был выполнен анализ влияния элементарных геометрических погрешностей взаимного положения узлов ФС станка на точность обработки.

## Анализ геометрической точности станка без рассмотрения конкретных видов и типов режущих инструментов

Рассмотрим возможность анализа геометрической точности станка без рассмотрения конкретных видов и типов

режущих инструментов. Подставив выражение, полученное из уравнения (3)  $(A_{\text{ст}})^{-1}r_0 = r_{\text{и}}$ , в выражение (5), получим следующее уравнение для векторного баланса точности станка:

$$\Delta r_0 = \Delta A_{\text{ст}}(A_{\text{ст}})^{-1}r_0. \quad (6)$$

В правой части выражения (6)  $r_0$  будем рассматривать как уравнение некоторой номинальной обрабатываемой поверхности, а при учете матрицы преобразований координат станка  $A_{\text{ст}}$  налагаемых связей оно соответствует новому определению векторного баланса точности [6]  $\Delta r_0^{**}$  в виде

$$\Delta r_0^{**} = \varepsilon_0 r_0 + \delta r_0 + dr_0. \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0 = \varepsilon_i$  ( $i = 0$ ),  $\varepsilon_i$  – матрица погрешности взаимного расположения  $S_{i-1}$ -ой и  $S_i$ -ой систем координат формообразующей системы (ФС), связанных с  $i-1$ -м и  $i$ -м узлами ФС:

$$\varepsilon_i = \begin{pmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & \delta_{xi} \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & \delta_{yi} \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $\delta_{xi}$ ,  $\delta_{yi}$ ,  $\delta_{zi}$  – малые смещения системы координат  $S_i$  вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ;  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  – малые углы поворота системы координат  $S_i$  относительно осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Особенностью выражения (6) является то, что не требуется задание уравнения режущей кромки инструмента и указание положения функциональной точки, однако нужно задание уравнения обрабатываемой поверхности в параметрическом виде  $r_0 = r_0(u, v)$ , где  $u, v$  – криволинейные координаты, причем  $r_u \times r_v \neq 0$ , где  $r_u \equiv \partial r / \partial u$ ,  $r_v \equiv \partial r / \partial v$ , и выражения для аргументов матриц входящих в  $A_{\text{ст}}$  через эти координаты. В свою очередь, выражение (7) характеризует отклонения для одной номинальной поверхности, при этом уравнение реальной обработанной поверхности имеет вид [6]:

$$r = r_0 + \varepsilon_0 r_0 + \delta r_0 + dr_0. \quad (9)$$

Отклонения взаимного расположения двух реальных обработанных поверхностей полностью определяются через величину угла  $\eta_{1,2}$  между двумя радиусами-векторами реальных обработанных поверхностей  $r_1(u, v)$  и  $r_2(u, v)$  и расстояния  $\rho(r_1, r_2)$  между этими радиусами-векторами:

$$\cos \eta_{1,2} = \frac{r_1 r_2}{|r_1| |r_2|}, \quad (10)$$

$$\rho(r_1, r_2) = \sqrt{(r_2(1,1) - r_1(1,1))^2 + (r_2(2,1) - r_1(2,1))^2 + (r_2(3,1) - r_1(3,1))^2}. \quad (11)$$

При синтезе допусков и проверках геометрической точности станка характерны два противоположных случая. В первом случае

имеется полная информация об обрабатываемых поверхностях и требования к их точности размеров, формы и расположения. Здесь применение выражения (6) для каждой из этих поверхностей не представляет затруднений, поскольку имеются уравнения номинальных поверхностей. Так для токарных станков, как правило, достаточно рассмотрения обработки цилиндрической поверхности, конической поверхности и плоской торцевой поверхности, соответствующие примеры приведены в [4-6, 8], при этом из потенциально существующих 24 элементарных геометрических погрешностей в уравнение (5) входят 20 из них, а в уравнения (6) и (7) только 13 погрешностей. Данный случай характерен для традиционно выпускаемого оборудования – токарного, сверлильного и фрезерного.

Второй случай представляет больший интерес, поскольку зависимость вида  $r_0 = r_0(u, v)$  неизвестна производителям станков, а будет получена только при их эксплуатации. Данный случай характерен для многокоординатных станков, служащих для обработки поверхностей двойной кривизны, проектирование которых осуществляется потребителями станков. Хотя в основе современных САПР используется довольно ограниченное количество видов сплайнов (Безье,  $B$ -сплайны,  $NURBS$ ) [9], результат их применения при проектировании поверхностей является закрытой информацией (ноу-хау) потребителей станков. Компромисс между производителями и потребителями станков в этом случае может быть достигнут посредством гарантии точности обработки некоторого набора простых поверхностей (плоских, цилиндрических и сферических и т.п.) и их комбинаций в рабочем пространстве станка, даже если при его эксплуатации обработка таких поверхностей не будет осуществляться. Таким образом, в данном случае также можно считать заданными уравнения обрабатываемых поверхностей и требования к их точности. Здесь также следует отметить перспективность применения формообразующих сплайнов [10], в основе структуры которых лежит функция формообразования (3), при этом переменные  $u$  и  $v$  являются аргументами двух матриц элементарных перемещений, а аргументы остальных матриц являются функциями этих переменных.

Рассмотрим второй случай на примере 5-координатного станка ХКН1600 (КНР), геометрическая точность которого была

исследована в работе [11]. На рис. 2 представлена структура ФС этого станка.

Данный станок условно отнесен к 5-координатному, поскольку он имеет 6 управляемых координат: 3 поступательных движения вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  и 3 вращательных движения вокруг этих осей. Вращение инструмента вокруг оси  $Y$  в [11] не рассматривалось, поскольку была принята модель точечного режущего инструмента  $r_n = (0, 0, 0, 1)^T$  для упрощения расчетов, что нельзя признать полностью корректным, поскольку скорость резания при таком упрощении будет равна нулю.

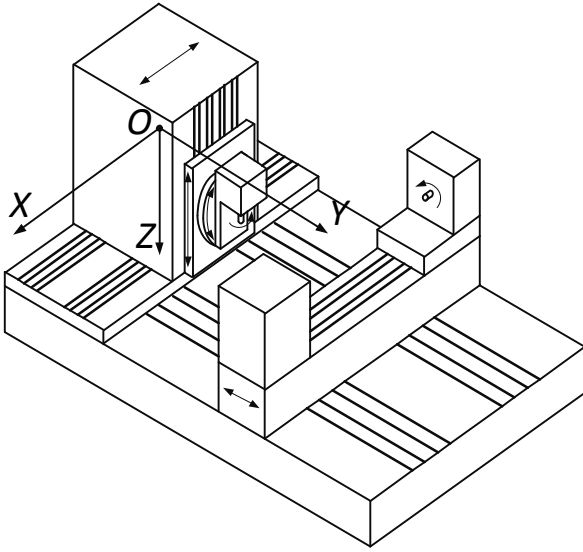


Рис. 2. ФС станка XKN1600 (адаптировано из [11])

Тем не менее, такого рода допущения достаточно часто применяются при исследованиях, поскольку позволяют идентифицировать большинство геометрических погрешностей станка. Использование предложенного выражения (6) не требует упрощения расчетов такого рода, поскольку в нем не используется модель режущего инструмента.

Функция формообразования (3) для данного станка имеет вид

$$r_0 = A^4(A)A^2(y)A^1(x)A^3(z)A^5(B)A^6(\varphi)r_n, \quad (12)$$

где  $A^1(x)$ ,  $A^2(y)$  и  $A^3(z)$  – матрицы перемещений вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ;  $A^4(A)$ ,  $A^5(B)$  и  $A^6(\varphi)$  – матрицы вращений вокруг осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Векторный баланс точности станка, соответствующий выражению (6), имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta r_0 = & (\varepsilon_0 + A^4(A)\varepsilon_1 A^4(-A) + \\ & + A^4(A)A^2(y)\varepsilon_2 A^2(-y)A^4(-A) + \\ & + A^4(A)A^2(y)A^1(x)\varepsilon_3 A^1(-x)A^2(-y)A^4(-A) + \\ & + A^4(A)A^2(y)A^1(x)A^3(z)\varepsilon_4 A^3(-z)A^1(-x)A^2(-y) \cdot \\ & \cdot A^4(-A) + A^4(A)A^2(y)A^1(x)A^3(z)A^5(B) \cdot \\ & \cdot \varepsilon_5 A^5(-B)A^3(-z)A^1(-x)A^2(-y)A^4(-A) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + A^4(A)A^2(y)A^1(x)A^3(z)A^5(B)A^6(\varphi) \cdot \\ & \cdot \varepsilon_6 A^6(-\varphi)A^5(-B)A^3(-z)A^1(-x) \cdot \\ & \cdot A^2(-y)A^4(-A))r_0. \end{aligned} \quad (13)$$

При сопоставлении выражений (7), (9) и (13) видно, что первый член правой части (13) полностью описывает отклонение расположения реальной поверхности относительно технологических баз, а остальные члены – погрешности размера и формы реальной поверхности. Результаты вычисления, по выражению (13), представлены в таблице в виде передаточных коэффициентов от элементарных геометрических погрешностей к составляющим векторного баланса точности, где  $r_0 = (r_{0x}, r_{0y}, r_{0z}, 1)^T$ , а  $\Delta r_0 = (\Delta r_{0x}, \Delta r_{0y}, \Delta r_{0z}, 0)^T$ .

Передаточные коэффициенты

| Погрешности   | Составляющие векторного баланса точности |                          |                                              |
|---------------|------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|
|               | $\Delta r_{0x}$                          | $\Delta r_{0y}$          | $\Delta r_{0z}$                              |
| $\alpha_0$    | 0                                        | $-r_{0z}$                | $r_{0y}$                                     |
| $\beta_0$     | $r_{0z}$                                 | 0                        | $-r_{0x}$                                    |
| $\gamma_0$    | $-r_{0y}$                                | $r_{0x}$                 | 0                                            |
| $\delta_{x0}$ | 1                                        | 0                        | 0                                            |
| $\delta_{y0}$ | 0                                        | 1                        | 0                                            |
| $\delta_{z0}$ | 0                                        | 0                        | 1                                            |
| $\alpha_1$    | 0                                        | $-r_{0z}$                | $r_{0y}$                                     |
| $\beta_1$     | $-r_{0y}sA + r_{0z}cA$                   | $r_{0x}sA$               | $-r_{0x}cA$                                  |
| $\gamma_1$    | $-r_{0y}cA - r_{0z}sA$                   | $r_{0x}cA$               | $r_{0x}sA$                                   |
| $\delta_{x1}$ | 1                                        | 0                        | 0                                            |
| $\delta_{y1}$ | 0                                        | $cA$                     | $sA$                                         |
| $\delta_{z1}$ | 0                                        | $-sA$                    | $cA$                                         |
| $\alpha_2$    | 0                                        | $-r_{0z} + y sA$         | $r_{0y} - y cA$                              |
| $\beta_2$     | $-r_{0y}sA + r_{0z}cA$                   | $r_{0x}sA$               | $-r_{0x}cA$                                  |
| $\gamma_2$    | $-r_{0y}cA - r_{0z}sA + y$               | $r_{0x}cA$               | $r_{0x}sA$                                   |
| $\delta_{x2}$ | 1                                        | 0                        | 0                                            |
| $\delta_{y2}$ | 0                                        | $cA$                     | $sA$                                         |
| $\delta_{z2}$ | 0                                        | $-sA$                    | $cA$                                         |
| $\alpha_3$    | 0                                        | $-r_{0z} + y sA$         | $r_{0y} - y cA$                              |
| $\beta_3$     | $-r_{0y}sA + r_{0z}cA$                   | $(r_{0x} - x)sA$         | $-(r_{0x} - x)cA$                            |
| $\gamma_3$    | $-r_{0y}cA - r_{0z}sA + y$               | $(r_{0x} - x)cA$         | $(r_{0x} - x)sA$                             |
| $\delta_{x3}$ | 1                                        | 0                        | 0                                            |
| $\delta_{y3}$ | 0                                        | $cA$                     | $sA$                                         |
| $\delta_{z3}$ | 0                                        | $-sA$                    | $cA$                                         |
| $\alpha_4$    | 0                                        | $-r_{0z} + y sA + z cA$  | $r_{0y} - y cA + z sA$                       |
| $\beta_4$     | $-r_{0y}sA + r_{0z}cA - z$               | $(r_{0x} - x)sA$         | $-(r_{0x} - x)cA$                            |
| $\gamma_4$    | $-r_{0y}cA - r_{0z}sA + y$               | $(r_{0x} - x)cA$         | $(r_{0x} - x)sA$                             |
| $\delta_{x4}$ | 1                                        | 0                        | 0                                            |
|               |                                          |                          |                                              |
| $\delta_{y4}$ | 0                                        | $cA$                     | $sA$                                         |
| $\delta_{z4}$ | 0                                        | $-sA$                    | $cA$                                         |
| $\alpha_5$    | $(r_{0y}cA + r_{0z}sA - y)sB$            | $(-r_{0x} - x)sB + z cB$ | $(r_{0y} - y cA + z sA)cB - (r_{0x} - x)sAs$ |

| Погрешности   | Составляющие векторного баланса точности                          |                                                                       |                                                                      |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|               | $\Delta r_{0x}$                                                   | $\Delta r_{0y}$                                                       | $\Delta r_{0z}$                                                      |
|               |                                                                   |                                                                       | $B$                                                                  |
| $\beta_5$     | $-r_{0y}sA+r_{0z}cA-z$                                            | $(r_{0x}-x)sA$                                                        | $-(r_{0x}-x)cA$                                                      |
| $\gamma_5$    | $-(r_{0y}cA+r_{0z}sA-y)cB$                                        | $((r_{0x}-x)cB+zsB)cA+(-r_{0z}+ysA)sB$                                | $(r_{0y}-ycA+zsA)sB+(r_{0x}-x)sAcB$                                  |
| $\delta_{x5}$ | $cB$                                                              | $sAsB$                                                                | $-cAsB$                                                              |
| $\delta_{y5}$ | $0$                                                               | $cA$                                                                  | $sA$                                                                 |
| $\delta_{z5}$ | $sB$                                                              | $-sAcB$                                                               | $cAcB$                                                               |
| $\alpha_6$    | $(r_{0y}cA+r_{0z}sA-y)sBc\varphi-(r_{0y}sA-r_{0z}cA+z)s\varphi$   | $((-r_{0x}-x)sB+zcB)cA+(-r_{0z}+ysA)cB+c\varphi+(r_{0x}-x)sAs\varphi$ | $((r_{0y}-ycA+zsA)cB-(r_{0x}-x)sAsB)B+c\varphi-(r_{0x}-x)cAs\varphi$ |
| $\beta_6$     | $(-r_{0y}sA+r_{0z}cA-z)c\varphi-(r_{0y}cA+r_{0z}sA-y)sB s\varphi$ | $(r_{0x}-x)sAc\varphi+((r_{0x}-x)cAsB+(r_{0z}-ysA-zcA)cB)s\varphi$    | $(r_{0x}-x)cAc\varphi+((r_{0x}-x)sAsB-(r_{0y}-ycA+zsA)cB)s\varphi$   |
| $\gamma_6$    | $-(r_{0y}cA+r_{0z}sA-y)cB$                                        | $(r_{0x}-x)cAcB-(r_{0z}-ysA-zcA)sB$                                   | $(r_{0x}-x)sAcB+(r_{0y}-ycA+zsA)sB$                                  |
| $\delta_{x6}$ | $cBc\varphi$                                                      | $cAs\varphi+sAsBc\varphi$                                             | $sAs\varphi-cAsBc\varphi$                                            |
| $\delta_{y6}$ | $-cBs\varphi$                                                     | $cAc\varphi-sAsBs\varphi$                                             | $sAc\varphi+cAsBs\varphi$                                            |
| $\delta_{z6}$ | $sB$                                                              | $-sAcB$                                                               | $cAcB$                                                               |

Обозначения в таблице:  $c \equiv \cos$ ;  $s \equiv \sin$

Рассмотрим обработку на данном станке плоской поверхности, для которой  $\mathbf{r}_0 = (x, y, z, 1)^T$  при наложении системы связей  $\{A=0; B=0; \varphi=0; z=\text{const}\}$ . Здесь условие  $\varphi=0$  не означает отсутствия движения резания, а отражает скрытую связь, образующуюся при совпадении огибающей семейства мгновенных положений поверхности инструмента с самой обрабатываемой поверхностью [4]. Уравнение единичного вектора нормали к данной плоскости –  $\mathbf{n} = (0, 0, 1, 0)^T$ . Векторный баланс, соответствующий выражению (7), равен

$$\Delta \mathbf{r}_0^{**} = \begin{pmatrix} z\beta_0 \\ -z\alpha_0 \\ y\alpha_0 + \delta_{z0} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z \sum_{i=1}^2 \beta_i \\ -z\alpha_1 \\ y\alpha_1 - x \sum_{i=1}^2 \beta_i + \sum_{i=1}^6 \delta z_i \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

и включает геометрические погрешности из (8), рассматриваемые как постоянные величины.

Первая составляющая правой части (14) и характеризует отклонение от параллельности номинальной плоскости и реальной обработанной плоскости из-за погрешности установки заготовки относительно базы – оси координаты  $A$ . Вторая составляющая правой части (14) характеризует погрешности размера и формы реальной обработанной плоскости. В целом в выражение (14) входят 12 геометрических погрешностей станка из 42-х погрешностей, потенциально влияющих на точность обработки –  $\{\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \delta z_0, \delta z_1, \delta z_2, \delta z_3, \delta z_4, \delta z_5, \delta z_6\}$ . Из выражения (14)

принципиально невозможно выделить отдельные составляющие из сумм  $\sum_{i=1}^2 \beta_i$  и  $\sum_{i=1}^6 \delta z_i$ .

### Синтез допусков параметров геометрической точности станков

Создание полной системы уравнений для синтеза допусков основано на ряде приемов работы с балансами точности, представленных на примерах.

Рассмотрим известный подход к оценкам геометрической точности станков, основанный на использовании скалярного баланса точности –  $r_n = n \Delta \mathbf{r}_0$  [4], который, при заданном уравнении для  $\mathbf{n}$ , равен

$$\Delta r_n = y \sum_{i=0}^1 \alpha_i - x \sum_{i=0}^2 \beta_i + \sum_{i=0}^6 \delta z_i. \quad (15)$$

Любые преобразования скалярного баланса (15) не позволят дифференцировать вклад, вносимый в формирование погрешностей обработки плоскости составляющих, входящих в соответствующие суммы. Имеется особенность использования скалярного баланса, которую рассмотрим на примере обработки трех плоскостей, уравнения которых отличаются координатой  $z$  –  $\mathbf{r}_{0,1} = (x, y, z_1, 1)^T$ ,  $\mathbf{r}_{0,2} = (x, y, z_2, 1)^T$  и  $\mathbf{r}_{0,3} = (x, y, z_3, 1)^T$ . Из выражения (15) получим систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta_1 = \alpha y_1 - \beta x_1 + \delta z \\ \Delta_2 = \alpha y_2 - \beta x_2 + \delta z, \\ \Delta_3 = \alpha y_3 - \beta x_3 + \delta z \end{cases} \quad (16)$$

где  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$  – некоторые значения отклонений;  $\alpha = \sum_{i=0}^1 \alpha_i$ ;  $\beta = \sum_{i=0}^2 \beta_i$ ;  $\delta z = \sum_{i=1}^6 \delta z_i$ ;  $\{x_1, y_1\}$ ,  $\{x_2, y_2\}$  и  $\{x_3, y_3\}$  – габаритные размеры плоскостей.

Обычным условием разрешимости системы уравнений (16) является неравенство нулю определителя матрицы коэффициентов этой системы, что соответствует неравенству  $(x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3) \neq 0$ . Однако для получения нетривиальных решений для всех значений переменных  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta z$  габаритные размеры обрабатываемых плоскостей должны отличаться друг от друга –  $x_1 \neq x_2 \neq x_3$ ,  $y_1 \neq y_2 \neq y_3$ , чтобы значения отклонений были различными –  $\Delta_1 \neq \Delta_2 \neq \Delta_3$ . Сама возможность получения системы уравнений (16) из одного скалярного баланса (15) обусловлена нелинейным характером зависимостей допусков на значения этих отклонений от номинальных значений геометрических размеров деталей. Установленная особенность позволяет обоснованно назначить допуски на составляющие выражения (15) –  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta z$ .

Применение скалярного баланса позволяет определить отклонения размеров и формы обработанных поверхностей [4, 5], а также

погрешности их расположения относительно технологических баз. Рассмотрим отклонение от параллельности плоскости  $r_{0,1}$  от оси координаты  $A - r_{0,4} = (x, 0, 0, 1)^T$ , которое определяется как разность расстояний между ними по координате  $Z$ , при значениях  $x \neq 0$  и  $x = L$ , с заданным значением допуска  $T_4$ . Данное отклонение должно соответствовать условию  $\Delta r_n(x=0, y=0) - \Delta r_n(x=L, y=0) = T_4$ , или  $L \sum_{i=0}^2 \beta_i = T_4$ . Очевидно, что использование только скалярного баланса точности, в соответствии с его определением, не позволяет раскрыть полную систему размерных связей ФС станка, в т.ч. определять погрешности расположения поверхностей, имеющих различные нормали.

Более широкие возможности определения связей между геометрическими погрешностями обработки и погрешностями станка предоставляют использование уравнений реальных обработанных поверхностей (9), основанных на использовании определения векторного баланса (14).

Определим косинус угла между поверхностью  $r_{0,1}$  и  $r_{0,4} = (x, y_4, z, 1)^T$ . Векторный баланс для поверхности  $r_{0,4}$  равен

$$\Delta r_0^{**} = \begin{pmatrix} -y_4 \gamma_0 \\ -z \alpha_0 + x \gamma_0 + \delta_{y_0} \\ y_4 \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -y_4 \gamma_1 \\ x \sum_{i=1}^2 \gamma_i - z \sum_{i=1}^4 \alpha_i + \sum_{i=1}^6 \delta y_i \\ y_4 \alpha_1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Используя выражение (10) и учитывая только члены первого порядка малости, получим

$$\cos \eta_{1,2} \approx \approx (x^2 + y y_4 + z z_1 - x y_4 \sum_{i=0}^1 \gamma_i + x z_1 \sum_{i=0}^2 \beta_i - y z \sum_{i=2}^4 \alpha_i + x y \sum_{i=0}^2 \gamma_i + 2 y_4 z_1 \sum_{i=0}^1 \alpha_i - x z \sum_{i=0}^1 \alpha_i) / (\sqrt{x^2 + y^2 + z_1^2} \sqrt{x^2 + y_4^2 + z^2}). \quad (18)$$

Задавая значения координат для переменных  $x$ ,  $y$  и  $z$  из (18), можно получить уравнение связи геометрических погрешностей с величиной допуска на отклонение от перпендикулярности плоскостей  $r_{0,1}$  и  $r_{0,4}$ .

При установке заготовки в центрах координаты  $A$ , кроме основного контура ФС, возникает дополнительный замкнутый контур, который позволяет сформировать дополнительные уравнения связей между геометрическими погрешностями станка. Пример анализа такого контура приведен в работе [8].

## Метод синтеза допусков

Раскрытие всех взаимосвязей между геометрическими погрешностями станка и требованиями к точности обработки позволяет перейти к решению самой задачи синтеза допусков. На рис. 3 представлена структура метода синтеза допусков на значения геометрических погрешностей металлорежущих станков.

Рассмотрим основные этапы предложенного метода.

*Этап 1.* Требования к геометрической точности деталей машин, их взаимного положения и перемещения в процессе эксплуатации формируются конструкторами на этапе проектирования самих машин, поскольку они оказывают решающее влияние на значения показателей всех ее свойств – функциональности, надежности, экономичности и др. и рассмотрены в различных работах, в т.ч. в [12, 13].

Формирование множества обрабатываемых поверхностей на проектируемом станке может выполняться самим производителем или при взаимодействии производителя и потребителей (заказчиков). В основе такого формирования используются положения типовой, групповой или модульной технологий производства машин [14-16]. При этом нецелесообразно в формируемое множество включать детали с одинаковыми поверхностями, но сильно отличающимися требованиями к точности их поверхностей, здесь целесообразно учитывать существующее разделение станков по классам точности Н, П, В, А и С. Выше рассмотрены два противоположных случая, связанных с наличием полной информации об обрабатываемых поверхностях, и требования к их точности размеров, формы и расположения, и отсутствием такой информации.

*Этап 2.* Методика определения функции формообразования и различные примеры изложены в работе [4], примеры также приведены в многочисленных работах, в т.ч. в [5-7, 10]. На необходимость выявления замкнутых контуров впервые указано в работе [8], что обусловлено появлением дополнительных связей между геометрическими погрешностями станка.

*Этап 3.* Структура иерархической системы размерных связей представлена в работе [6] и имеет 4 уровня:

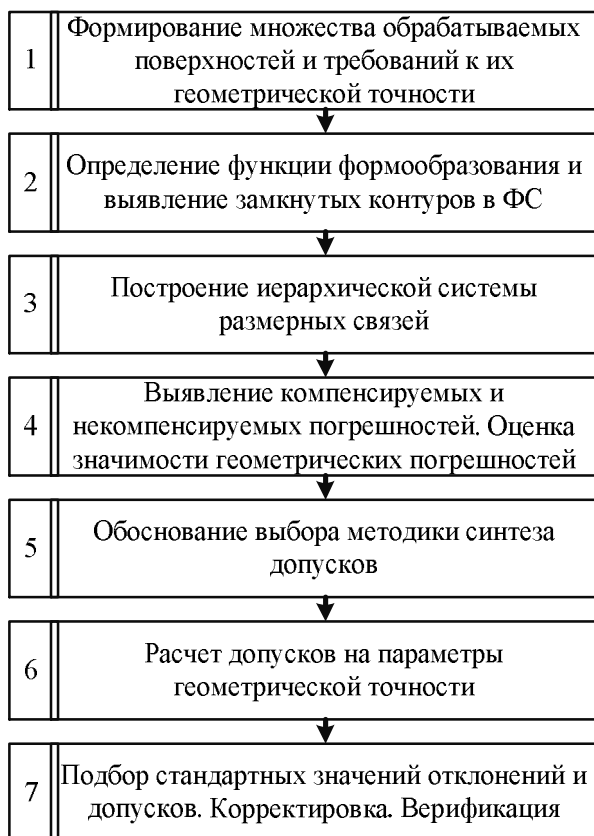


Рис. 3. Структура метода синтеза допусков

I. Размерные связи при обработке детали (наборов/модулей поверхностей).

II. Размерные связи при обработке набора/модуля поверхностей.

III. Размерные связи при обработке одной поверхности.

IV. Размерные связи, не включающие режущие инструменты.

В работах [6, 17] рассмотрены примеры выявления размерных связей для станков, содержащих механизмы параллельной и гибридной структуры и не включающих режущие инструменты.

На данном этапе в размерных связях всех уровней рассматриваются отклонения, а не допуски на них.

**Этап 4.** Выявление компенсируемых и некомпенсируемых погрешностей имеет важное значение для определения требований к точности положения узлов ФС станка. Например, выше рассмотрена обработка плоской поверхности  $r_0 = (x, y, z, 1)^T$ , в выражение для скалярного баланса точности (15) которой входит сумма малых смещений узлов ФС по оси Z -  $\sum_{i=0}^6 \delta z_i$ . В этом случае следует рассмотреть возможность компенсации погрешностей изготовления и сборки узлов станка, а также погрешностей формы базовых поверхностей на основе условия

$$\delta z_{3, \text{поз}} = -(\delta z_0 + \delta z_1 + \delta z_2 + \delta z_3 + \delta z_4 + \delta z_5 + \delta z_6), \quad (19)$$

где  $\delta z_{3, \text{поз}}$  – погрешность позиционирования узла ФС по оси Z.

Поскольку в функции формообразования (12) четвертый узел ФС осуществляет перемещения по оси Z, то выполнение условия (19) позволяет определить менее жесткое требование к точности (дискретности и повторяемости) этого перемещения, поскольку в этом случае выражение (15) будет содержать не 12 составляющих, а только 6 составляющих.

В (19)  $\delta z_{3, \text{поз}}$  можно рассматривать как методическую погрешность, а составляющие правой части этого выражения как случайные погрешности. Это выражение можно рассматривать и как размерную цепь с компенсатором, которым является погрешность позиционирования.

Оценка значимости геометрических погрешностей должна выполняться с учетом возможностей производителя станка по достижению требований к точности положения и перемещения различных узлов ФС, связанной с конструктивными и производственными факторами, в т.ч. обусловленными габаритными размерами узлов. Эта оценка является ранжированием по степени сложности выполнения требований к точности положения и перемещения различных узлов станка.

**Этап 5.** Поскольку полученные уравнения размерных связей целиком нельзя рассматривать как размерные цепи с компенсатором, то здесь применимы базовые методики, основанные на применении принципов полной и неполной взаимозаменяемости [13]. В дополнение к ним возможно обоснование выбора методик, основанных на сложности выполнения требований к точности (этап 4), соответствующих принципам равных допусков, равных квалитетов, учету себестоимости достижения точности и др.

**Этап 6.** Как отмечалось выше, собственно сам расчет допусков основан на решении системы линейных уравнений, связывающих требования к параметрам точности обработанных поверхностей с требованиями к точности узлов станка и его базовых поверхностей для заготовки и инструмента. При использовании дополнительных методик в эти уравнения будут включены дополнительные коэффициенты, введенные при ранжировании на этапе 4.

При выполнении расчета допусков следует установить долю, вносимую геометрическими погрешностями станка в точность обработанных поверхностей деталей. Данное решение должно быть согласовано с реализацией мер по обеспечению жесткости, виброустойчивости, теплостойкости и износостойкости станка и режущего инструмента. Однако в работе [18] было использовано положение о том, что для точных станков данная доля равна 100%. Такое предположение можно рассматривать как

допустимое при предварительном расчете допусков.

*Этап 7.* Подбор стандартных значений отклонений и допусков для размеров, формы и расположения поверхностей узлов ФС выполняется с использованием действующих стандартов и не представляет сложности. Такие сложности могут возникнуть по причинам отсутствия или высокой стоимости комплектующих узлов и деталей с требуемыми параметрами точности – шпиндельных узлов, приводов перемещений и др. В связи с этим допустимы итерации при выполнении этапов 6 и 7.

### Заключение

В работе предложен метод синтеза допусков на значения геометрических погрешностей металлорежущих станков и рассмотрено содержание его этапов. Особенностью этого метода является то, что он не требует учета конкретных видов и типов режущих инструментов, применяемых при обработке. Даны примеры выявления размерных связей между геометрическими погрешностями станка и погрешностями обработанных поверхностей при анализе формообразующей системы многокоординатного станка.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60049 мол\_а\_дк.*

### Литература

1. Error Modeling and Sensitivity Analysis of a Five-Axis Machine Tool/ Wenjie Tian, Weiguo Gao, Wenfen Chang, and Yingxin Nie //Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2014, Article ID 745250, 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/745250>.
2. Xiaogeng Jiang. Characterising Geometric Errors in Rotary Axes of 5-axis Machine Tools. A thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of Doctor Of Philosophy. 137 p.
3. ISO 230-1:2012. Нормы и правила испытаний металлорежущих станков. Часть 1: Геометрическая точность станков, работающих на холостом ходу или в квазистатических условиях. Взамен ISO 230-1:1996; введ. 01.03.2012. Switzerland: ISO, 2012. 168 с.
4. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков/ Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
5. Анисеева О.В. Методологические основы стандартизации параметров геометрической точности металлорежущих станков / О.В. Анисеева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. - №3. – С. 202-209.
6. Анисеева О.В. Развитие вариационного метода расчета точности металлорежущих станков / О.В. Анисеева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. - № 5. С. 111-118.
7. Анисеева О.В. Влияние параметров геометрической точности станков на отклонения расположения обработанных поверхностей / О.В. Анисеева, А.Г. Ивахненко, Д.Н. Крюков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2017. Т. 9. №1. <http://naukovedenie.ru/PDF/52TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
8. Анисеева О.В. Построение полной системы размерных связей при обработке заготовок на металлорежущих станках / О.В. Анисеева // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении (FRITME-2017): сб. науч. тр. V Междунар. науч. конф. – М.: ИМАШ им. А.А. Благоврадова РАН, 2017. – С. 39-41.
9. Роджерс Д. Математические основы машинной графики/Д. Роджерс, Дж. Адамс. М.: Мир, 2001. – 604 с.
10. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез: монография/А.Г. Ивахненко.– Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1998. – 124 с.
11. Ligang Cai, Ziling Zhang, Qiang Cheng, Zhifeng Liu, Peihua Gu. A geometric accuracy design method of multi-axis NC machine tool for improving machining accuracy reliability, 2015. - DOI: 10.17531/ein.2015.1.19.
12. Фундаментальные проблемы теории точности / Под ред. В.П. Булатова, И.Г. Фридендера. - М.: Наука, 2001. - 484 с.
13. Расчет точности машин и приборов / В.П. Булатов и др.; под общ. ред. В.П. Булатова и И.Г. Фридендера. – СПб.: Политехника, 1993. – 495 с.
14. Проектирование технологии: учебник для машиностроительных специальностей вузов / И.М. Баранчукова, А.А. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др.; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.
15. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. В 2-х т. Т.1: Организация группового производства/С.П. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 407 с.
16. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении/Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
17. Анисеева О.В. Управление качеством при обработке заготовок на станках с параллельными и гибридными компоновками на основе системы размерных связей /О.В. Анисеева// Управление качеством в образовании и промышленности: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2017. – С. 11-17.
18. Сахаров А.В. Установление технологических возможностей станков для проектирования технологических процессов и обоснования производственной программы: дисс. ... канд. техн. наук. - Москва, 2012. - 174 с.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск

## SYNTHESIS OF GEOMETRIC ACCURACY PARAMETERS TOLERANCES OF METAL-CUTTING EQUIPMENT O.V. Anikeeva

PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Southwest State University, Kursk, Russian Federation  
e-mail: olesya-anikeeva@yandex.ru



The article sets and solves the complex problem of creating a fully functional mathematical apparatus for translation of requirements to accuracy parameters of processing and arrangement of surfaces into the requirements to the accuracy of manufacturing and assembly of machine nodes. The aim of this work is to create a method for synthesizing tolerances for the values of geometrical errors of metal-cutting equipment. For the first time, it is justified to exclude the accuracy of forming processes, as well as the specific types of cutting tools used in the processing, from calculating the accuracy. Two developed approaches to the estimation of geometrical errors of processing based on the use of matrices of transformations of homogeneous coordinates and the total variation of the obtained dependences are investigated. The application of these approaches does not fundamentally support the separation of the machine and the equipment, as well as the requirements for the parameters of their accuracy and accuracy of parts machining. The advantages of the created mathematical apparatus are shown when analyzing the geometric accuracy of a multi-axis machine based on the dependences obtained, which were first presented in this paper. On the basis of the created mathematical apparatus the method of synthesis of tolerances on values of geometrical errors of metal-cutting equipment is developed. Key questions are identified on the main stages of the proposed method for the synthesis of tolerances, which require the adoption of key decisions. Examples are given of the identification of dimensional relationships between geometrical errors of the machine and the errors of the machined surfaces in the analysis of the forming system of a five-axis machine. The work is useful for researchers involved in the study of geometrical precision of machining on metal-cutting machines

Key words: metal-cutting equipment, processing errors, geometric accuracy

### References

1. Wenjie Tian, Weiguo Gao, Wenfen Chang, and Yingxin Nie "Error Modeling and Sensitivity Analysis of a Five-Axis Machine Tool", *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article ID 745250, 8 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/745250>.
2. Xiaogeng Jiang "Characterising Geometric Errors in Rotary Axes of 5-axis Machine Tools", *A thesis submitted to the Faculty of Engineering of The University of Birmingham for the degree of Doctor Of Philosophy*, 137 p.
3. ISO 230-1:2012. Test code for machine tools, Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions. In return ISO 230-1:1996, Third edition 01.03.2012, Switzerland: ISO, 2012, 168 p.
4. Reshetov D.N., Portman V.T. "Precision metal-cutting machines" ("Tochnost metallo-rezhushchikh stankov"), Moscow, Mechanical engineering, 1986, 336 p.
5. Anikeeva O.V. "Methodological fundamentals in parameters standardization of machine-tools geometrical accuracy", *Bulletin of Bryansk State Technical University*, 2016, no. 3, pp. 202-209.
6. Anikeeva O.V. "The development of the variational method for the computation of machine-tools accuracy", *Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*, 2016, no. 5, pp. 111-118.
7. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Krukov D.N. "The influence of machine tools geometric accuracy parameters on the position deviations of the machinable surfaces", *Naukovedenie*, vol. 9, no. 1, 2017 (available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/52TVN117.pdf>).
8. Anikeeva O.V. "Construction of the full system of dimensional connections at the processing of trainings on metal-stocking machines" ("Postroenie polnoj sistemy razmernyh svyazey pri obrabotke zagotovok na metallo-rezhushchih stankah"), FRITME-2017, Moscow, 2017, p. 39-41.
9. Rodzhers D., Adams Dzh. "Mathematical foundations of computer graphics" ("Matematicheskie osnovy mashinnoj grafiki"), Moscow, Mir, 2001, 604 p.
10. Ivakhnenko A.G. "Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis: monograph": ("Konceptualnoe proektirovanie metallo-rezhushchih system. Strukturnyj sintez: monografiya"), Habarovsk, 1998, 124 p.
11. Ligang Cai, Ziling Zhang, Qiang Cheng, Zhifeng Liu, Peihua Gu. A geometric accuracy design method of multi-axis NC machine tool for improving machining accuracy reliability, 2015. – DOI: 10.17531/ein.2015.1.19.
12. "Fundamental problems of the theory of precision" ("Fundamentalnye problemy teorii tochnosti"), edited by Bulatov V.P., Fridlender I.G. Moscow, Nauka, 2001, 484 p.
13. Bulatov V.P. [and al.] "The calculation of precision machines and instruments" ("Raschet tochnosti mashin i priborov"), edited by Bulatov V.P., Fridlender I.G., St. Petersburg, Politehnika, 1993, 495 p.
14. Baranchukova I.M., Gusev A.A., Kramarenko Yu.B. [and al.] "The design of the technology. A textbook for engineering students" ("Proektirovanie tekhnologii. Uchebnik dlya mashinostroitelnykh specialnostey vuzov"), edited by Solomencev Yu.M. Moscow, Mashinostroyeniye, 1990, 416 p.
15. Mitrofanov S.P. "Group technology machine-building production. In 2 vol. Vol. 1: Organization of group production" ("Gruppovaya tekhnologiya mashinostroitel'nogo proizvodstva. T.1: Organizatsiya gruppovogo proizvodstva"), Leningrad, Mashinostroyeniye, 1983, 407 p.
16. Bazrov B.M. "Modular technology in engineering" ("Modul'naya tekhnologiya v mashinostroyenii"), Moscow, Mechanical engineering, 2001, 368 p.
17. Anikeeva O.V. "Quality management processing of work pieces on machines with parallel and hybrid arrangements based of the functional relationships system" ("Upravlenie kachestvom pri obrabotke zagotovok na stankah s parallelnymi i gibridnymi komponovkami na osnove sistemy razmernyh svyazey"), *Upravlenie kachestvom v obrazovanii i promyshlennosti: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Sevastopol, SevGU, 2017, pp. 11-17.
18. Sakharov A.V. "Establishment of techno-logical capabilities of machine tools for the design of techno-logical processes and the rationale for the production pro-gram: dissertation of PhD" ("Ustanovlenie tekhnologicheskikh vozmozhnostey stankov dlya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov i obosnovaniya proizvodstvennoy programmy: dis. ... kand. tekhn. nauk"), Moscow, 2012, 174p.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕРМОЭДС НАНОКОМПОЗИТОВ $Cu_x(a-C)_{100-x}$

© 2017 В.А. Макагонов, А.С. Краснова, Л.И. Янченко, И.М. Трегубов, М.А. Каширин

Методом ионно-лучевого напыления в атмосфере аргона получены тонкие пленки  $Cu_x(a-C)_{100-x}$ , содержащие от 15 до 85 ат. % Cu. Исследования структуры показали, что полученные пленки являются наноккомпозитами, в которых до порога перколяции частицы меди с размером от 1 до 20 нм внедрены в аморфную углеродную матрицу. Экспериментально исследованы концентрационные и температурные зависимости электрической проводимости на постоянном и переменном токе, а также коэффициент термоЭДС при комнатной температуре. Анализ концентрационных зависимостей электрического сопротивления показал, что система  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  является перколяционной с порогом протекания 54,3 ат. % Cu. Зависимость термоЭДС от атомной доли металлической фазы имеет максимум в окрестности порога перколяции. Показано, что в изученном диапазоне температур у образцов с концентрацией  $x$  металлической фазы в области от 15 до 54,3 ат. % Cu (до порога перколяции) электроперенос осуществляется путем прыжковой проводимости. При концентрации от 54,3 до 85 ат. % Cu (за порогом перколяции) преобладает металлическая проводимость. Термическая обработка при температурах 280 и 400 °C в течение 30 минут приводит к смещению порога перколяции к  $x_c=34$  и 46,5 ат. % Cu для композитов  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  соответственно. Установлено, что температурный коэффициент электрического сопротивления тонких пленок  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  с концентрацией меди  $\sim 54$  ат. % в широком диапазоне температур остается близким к нулю

Ключевые слова: наноккомпозит, тонкие пленки, медь, углерод, электрическое сопротивление

## Введение

Гранулированные наноккомпозиты металл-диэлектрик представляют собой гетерогенные системы металлических частиц размером 2-10 нм, случайным образом распределённых в диэлектрической матрице. Такие композиты, благодаря относительно простой технологии их получения, продолжают представлять повышенный интерес многих исследователей для изучения многих физических свойств и применения таких материалов на практике. Впервые наноккомпозитные структуры (cermets в англоязычной литературе) были получены в начале 70-х годов как тонкопленочные высокоомные резистивные слои для микроэлектроники и в этом же десятилетии были сформулированы основные модельные представления об электрических и магнитных свойствах композитов [1-4]. Особый интерес при этом с практической точки зрения представляли композиты вблизи порога протекания, поскольку такие композит-

ные слои помимо высокого удельного сопротивления обладали невысоким температурным коэффициентом электрического сопротивления [5]. В качестве диэлектрической матрицы чаще всего используются окислы Si, Al, Zr, Cr, Hf и т. д., обладающие высоким удельным электрическим сопротивлением [6]. Для получения низкоомных тонкопленочных резистивных слоев необходимо использовать материал гранул и матрицы, которые обладают более низкими значениями удельного электрического сопротивления по сравнению с традиционно используемыми тонкопленочными композитами. Такие системы, в частности, необходимы при изготовлении коммутационных проводников для термоэлектрических батарей. В качестве материала металлических гранул в данной работе авторы выбрали медь, а материалом матрицы служил аморфный графитоподобный углерод, который стабильно синтезируется методом ионно-лучевого распыления [7]. С учетом вышесказанного, в работе поставлена задача синтезировать тонкие пленки гетерогенной системы Cu-C с целью установления возможности получения резистивных слоев с температурным коэффициентом электрического сопротивления, близким к нулю.

## Методика

Ионно-лучевой метод наиболее эффективен для нанесения пленок многокомпонентных материалов, в том числе композитных пленок металл-углерод [5]. Исследуемые тонкие плен-

Макагонов Владимир Анатольевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, e-mail: vlad\_makagonov

Краснова Анна Алексеевна – ВГТУ, студент, e-mail: KAA@mail.ru

Янченко Лариса Ивановна – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: lyanchenko74@yandex.ru

Трегубов Илья Михайлович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ilia.tregubov@mail.ru

Каширин Максим Александрович – ВГТУ, младший научный сотрудник, e-mail: mnitro@yandex.ru

ки гетерогенной системы Cu-C получены методом ионно-лучевого распыления составной мишени на установке УВН-2М. В процессе получения образцов в камеру подавалась аргон (чистотой 99,98 %) без добавления водорода, в отличие от типичного способа получения пленок аморфного гидрогенизированного углерода [8-9].

Для получения пленок наноккомпозитов Cu-C с различным содержанием частиц меди использовалась две конфигурации составной мишени (рис. 1). Составная мишень представляла собой прямоугольную литую основу из меди (1) с расположенными на ее поверхности пластинами графита (2) одинакового размера, но на различном расстоянии друг от друга, что позволило синтезировать композиты с широким и непрерывным спектром концентраций металлической фазы.

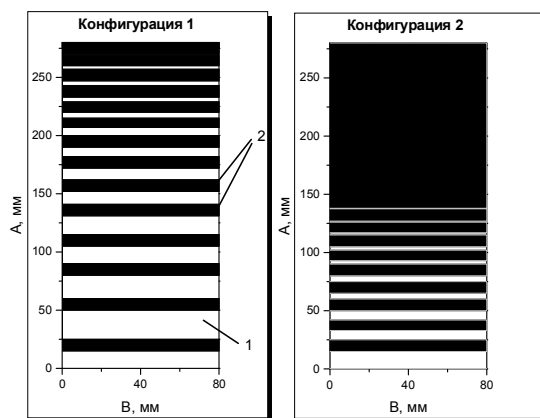


Рис. 1. Конфигурация составной мишени, используемой при напылении тонких пленок  $Cu_xC_{1-x}$ :  
1 – медное основание; 2 – пластины графита

В качестве подложек были использованы ситалловые (размером  $60 \times 48 \text{ мм}^2$ ) и стеклянные пластины (размером  $24 \times 75 \text{ мм}^2$ ), из которых вырезались образцы размером  $3 \times 60 \text{ мм}^2$ . Ширина пластины была выбрана таковой, чтобы разброс состава по ее ширине не превышал 0,5 ат. % металлической фазы [10].

Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления при комнатной температуре были измерены двухзондовым методом на постоянном токе при помощи цифрового мультиметра VC 9808+, позволяющего измерять электрическое сопротивление в диапазоне от 0,1 Ом до  $2 \times 10^9$  Ом.

Для измерения концентрационных зависимостей термоЭДС использовались образцы пленок Cu-C шириной 3 мм и длиной 40 - 60 мм, вдоль которых создавался температурный градиент порядка 80 К, причем «холодный»

конец образца находился при комнатной температуре. Значение термоЭДС композитов рассчитывалось по следующей формуле с поправкой на термоЭДС в серебряных зондах:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, возникающее между горячим и холодным концами образца;  $\Delta T$  – разность температур между горячим и холодным концами образца соответственно.

Определение температурных зависимостей термоЭДС пленок Cu-C в интервале температур 77 – 300 К проводилось с использованием установки, принципиальная схема которой показана на рис. 2.

Для измерения термоЭДС использовались напыленные на ситалловую подложку образцы шириной 3 мм и длиной 40 – 60 мм, которые помещались в специальную капсулу (рис. 2,б). Для создания электрических контактов образец с обоих концов прижимался термопарами ТП1 и ТП2.

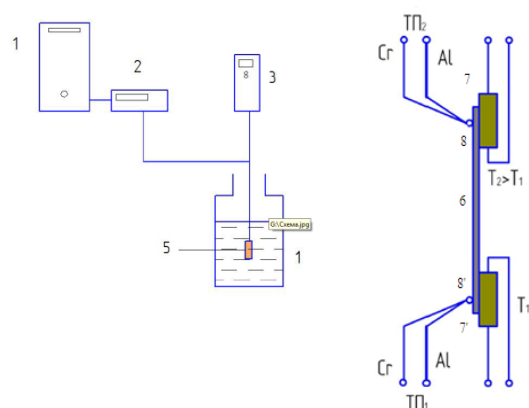


Рис. 2. Схема установки для измерения термоЭДС (а);  
схема крепления образца в капсуле (б);  
1 – ЭВМ, 2 – нановольт/микроомметр Agilent 34420А, 3 – блок питания, 4 – термостат с жидким азотом, 5 – капсула с образцом; 6 – образец, 7 – нагреватель, 8 – хромель-алюмелевая термопара

Концентрацию атомов меди, углерода и кислорода, входящих в состав композитов, определяли с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализатора INCA X-MAX (Oxford Instruments), входящего в состав растрового электронного микроскопа (РЭМ) Carl ZEISS EVO MA 10.

Результаты элементного анализа образцов, полученных при использовании двух конфигураций мишени, показали, что при использовании первой конфигурации составной мишени содержание Cu в пленках находится в интервале от 12 до 68 ат. %. При использовании второй

конфигурации - от 56 до 85 ат. %. Таким образом, общий диапазон концентраций меди находится в диапазоне от 12 до 85 ат. % Cu.

Картины рентгеновской дифракции (излучение  $\text{CuK}_{\alpha 1,2}$   $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) для пленок  $\text{Cu}_x\text{C}_{1-x}$  представлены на рис. 3. Интенсивность рефлексов, относящихся к решетке меди, увеличивается с увеличением доли Cu в образцах. Других кристаллических фаз на рентгенограммах не обнаружено.

В гранулированных композитах  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  углерод является аморфным полупроводником и выполняет роль изолирующей матрицы, в которой находятся частицы меди размером 2-10 нм и 10-20 нм для конфигурации мишени 1 и конфигурации 2, соответственно. Кроме этого, в структуре могут содержаться графитоподобные включения, которые также могут образовывать каналы проводимости [11]. Поэтому полученные пленки  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ , даже с большим содержанием углерода, обладают сравнительно низким электрическим сопротивлением. Этот факт указывает на значительную степень их графитизации.

Результаты измерений электрического сопротивления тонких пленок при комнатной температуре приведены на рис. 4.

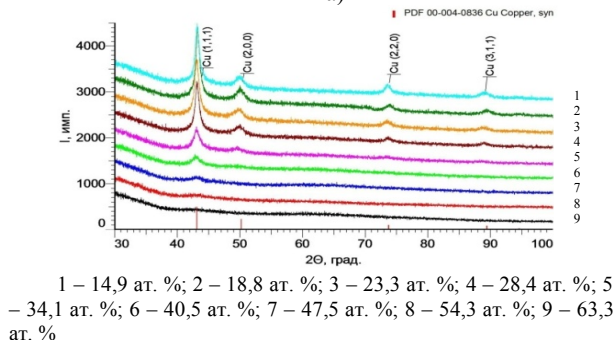
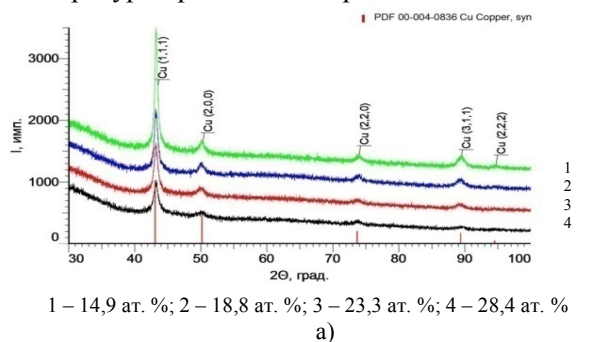


Рис. 3. Дифрактограммы пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), полученных при конфигурации 1 (а) и конфигурации 2 (б)

Данная зависимость является типичной для перколяционных систем металл – диэлектрик [5]. Наблюдается монотонное уменьшение электрического сопротивления более чем на три порядка. Полученные значения близки к

результатам, полученных в синтезированной системе другими методами [12-13].

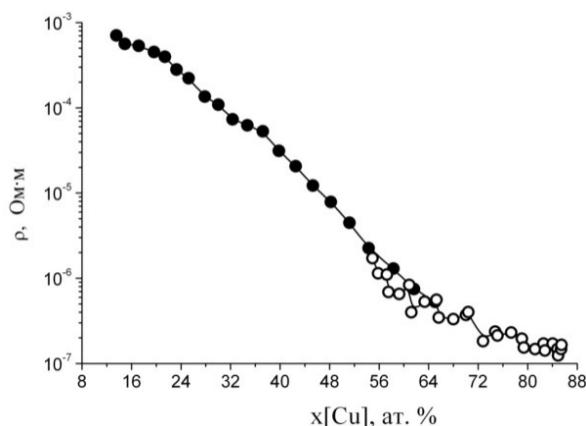


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  от концентрации меди

Стоит отметить, что для образцов, полученных распылением мишени с 14 навесками углерода (конфигурация 1), электрическое сопротивление (светлые кружки) имеет большой разброс экспериментальных данных, в отличие от пленок, полученных распылением мишени Cu-C (конфигурация 2), график которых имеет гладкий, монотонный вид (закрашенные кружки, рис. 4). Поскольку коэффициенты распыления меди и углерода значительно различаются, как было отмечено выше, то при геометрическом расположении навесок (рис. 1) состав меняется не монотонно, и приводит к флуктуациям электрического сопротивления в образцах, расположенных в зоне с большим содержанием меди. По всей вероятности такое изменение состава связано с так называемым «краевым эффектом», а также не идеальностью и неоднородностью поверхности мишени.

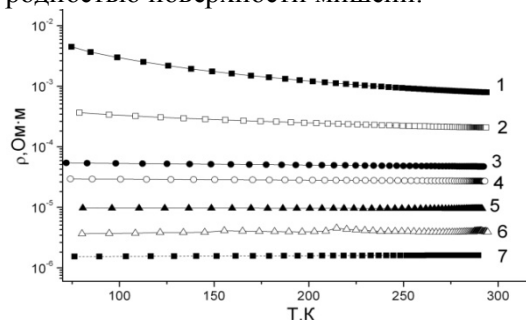


Рис. 5. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$

Температурные зависимости удельного электрического сопротивления гранулированных структур  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  представлены на рис. 5. В пленках с концентрацией меди меньше 48 ат. % наблюдается активационный тип

проводимости  $\sigma \propto \exp(-\varepsilon_a/kT)$ , где  $\varepsilon_a$  – энергия активации. Такой тип проводимости наблюдался в работе [11] в структурах с полупроводниковой матрицей а-С:Н, содержащей наночастицы меди. Авторы полагают, что малая энергия активации проводимости соответствует разности энергий между дном зоны проводимости матрицы и уровнем Ферми металлических частиц.

В синтезированных пленках  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  с концентрацией меди больше 54 ат. % наблюдается смена температурного коэффициента сопротивления с отрицательного на положительный (рис. 5 и 6), что свидетельствует о формировании сплошной токопроводящей сетки металлических наночастиц меди, электрически контактирующих друг с другом. Характерной особенностью температурной зависимости ТКС тонких пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  с концентрацией меди  $\sim 54$  ат. % является то, что в широком диапазоне температур данный параметр остается близким к нулю (кривая 4 на рис. 6), что особенно важно при использовании таких пленок в качестве резистивных слоев прецизионных резисторов. Смена знака ТКС с отрицательного на положительный в синтезированных нанокompозитах  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  при  $x \approx 54$  ат. % позволяет считать данную концентрацию меди соответствующей порогу перколяции.

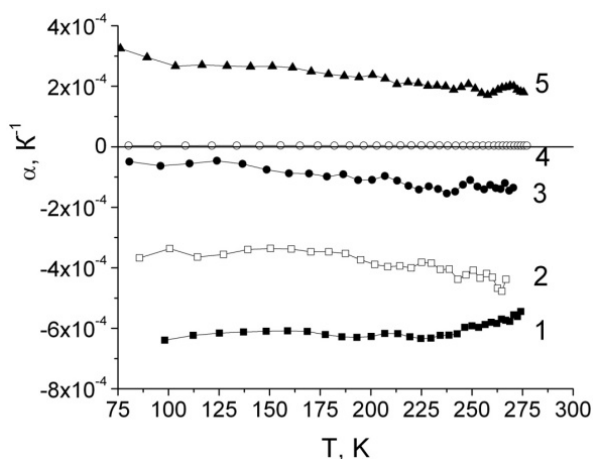


Рис. 6. Температурные зависимости удельного электрического сопротивления тонких пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ : 1–34,1 ат. %; 2–40,5 ат. %; 3–47,5 ат. %; 4–54,3 ат. %; 5–63,3 ат. %

Преобладание металлического характера электрической проводимости в этом случае подтверждается также видом зависимостей в высокочастотной ( $f > 200$  кГц) части адмиттанса  $Z(f)$  (рис. 7). За порогом перколяции ( $x_c > 54$  ат. % Cu) комплексное сопротивление практически не зависит от частоты, тогда как до порога

наблюдается слабая частотная зависимость (на частотах выше 200 кГц включительно).

На рис. 8 приведены концентрационные зависимости коэффициента термоЭДС тонких пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ . Полученные значения коэффициента термоЭДС положительны при всех концентрациях меди и в 2–4 раза выше, чем для объемной меди.

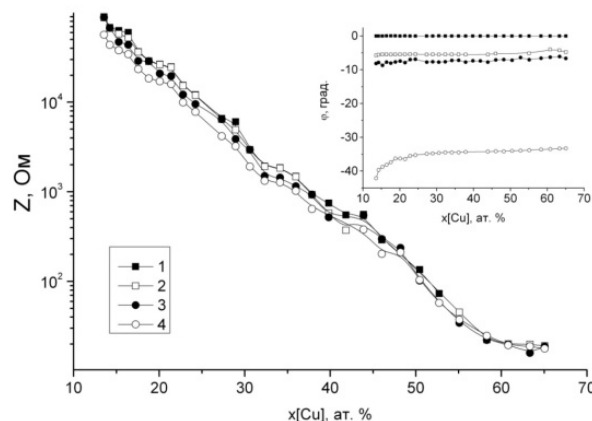


Рис. 7. Концентрационная зависимость комплексного электрического сопротивления на различных частотах (на вставке приведена зависимость угла сдвига фаз): 1–500 Гц; 2–200 кГц; 3–500 кГц; 4–1 МГц

С уменьшением концентрации углерода, когда электрическое сопротивление уменьшается, термоЭДС начинает увеличиваться. Поскольку до порога перколяции термоЭДС в тонких пленках  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  определяется аморфным углеродом, у которого при комнатной температуре термоЭДС имеет значение  $S \sim 12$  мкВ/К [7], то с увеличением углерода термоЭДС растет.

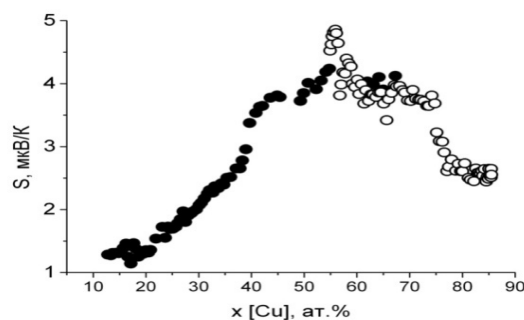


Рис. 8. Концентрационные зависимости коэффициента термоЭДС тонких пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$

В области перколяционного перехода наблюдается максимум. Для образцов, находящихся за порогом перколяции, наблюдается корреляция между термоЭДС и концентрацией носителей заряда (здесь предполагается, что концентрация свободных носителей заряда пропорциональна концентрации атомов меди в нанокompозите).

Влияние термообработки на электрическое сопротивление композитов  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  при температурах 280 и 400 °С в течение 30 минут представлено на рис. 9. Термообработка приводит к росту электрического сопротивления композита до порога протекания и снижению  $\rho$  за порогом протекания. Как видно из рис. 9, с увеличением температуры обработки значения пороговой концентрации  $x_c$  смещаются в сторону меньших концентраций медного наполнителя.

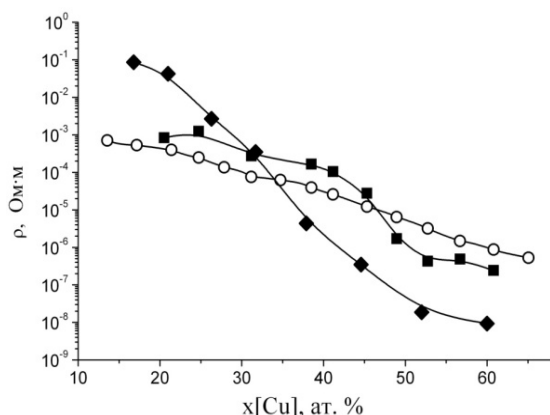


Рис. 9. Влияние термообработки на электрическое сопротивление нанокompозитов  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ : Исходное состояние (1), после термообработки при  $T=280$  °C (2) и 400 °C (3)

Полученные значения порога перколяции  $x_c=34$  и 46,5 ат. % Cu (по пересечению графиков после термообработки с исходными данными) для композитов  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ , подвергнутых термообработке при 400 и 280 °C соответственно, оказываются меньше 54,3 ат. % для образца в исходном состоянии, что говорит о том, что при температурах отжига происходит не только релаксация структуры и диффузия компонентов (углерода из гранул меди и меди из углеродной матрицы), но и объединение и увеличение размеров медных частиц.

### Заключение

Методом ионно-лучевого напыления в атмосфере аргона были синтезированы тонкие пленки  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$ , содержащие от 15 до 85 ат. % Cu. Исследования структуры показали, что полученные пленки являются нанокompозитами, в которых до порога перколяции частицы меди с размером от 1 до 20 нм внедрены в углеродную матрицу.

Экспериментально исследованы электрическая проводимость на постоянном и переменном токе, а также коэффициент термоЭДС при комнатной температуре. Анализ концентраци-

онных зависимостей электрического сопротивления показал, что система  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  является перколяционной с порогом протекания 54,3 ат. % Cu. Зависимость термоЭДС от атомной доли металлической фазы имеет максимум в окрестности порога перколяции.

Показано, что в изученном диапазоне температур у образцов с концентрацией  $x$  металлической фазы в области от 15 до 54,3 ат. % Cu (до порога перколяции) электроперенос осуществляется путем прыжковой проводимости. При концентрации от 54,3 до 85 ат. % Cu (за порогом перколяции) преобладает металлическая проводимость

Установлено, что температурный коэффициент сопротивления тонких пленок  $\text{Cu}_x(\text{a-C})_{100-x}$  с концентрацией меди  $\sim 54$  ат. % в широком диапазоне температур остается близким к нулю, что особенно важно при использовании таких пленок в качестве резистивных слоев прецизионных резисторов и коммутационных пленок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. №218 (Договор № 03.G25.31.0246).*

### Литература

1. Neugebauer C.A. Resistivity of Cermet Films Containing Oxides of Silicon / C.A. Neugebauer // Thin Solid Films. - 1970. - V.6. - P.443-447.
2. Gittleman J.L. Magnetic properties of Granular Nikel Films / J.L. Gittleman, Y. Goldstain, S. Bozowski // Physical Review. - 1972. - V.B5. - P.3609-3621.
3. Structural and electrical properties of granular metal films / B. Abeles, P. Sheng, M.D. Coutts, Y. Arie // Advances in Physics. - 1975. - V.24. - P.407-461.
4. Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред / А.Л. Эфрос, Б.И. Шкловский // УФН. - 1974. - Т. 117. - № 3. - С. 2-14.
5. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах/ С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, - 2012. - 352 с.
6. Транспортные и магнитные явления в наногетерогенных структурах / А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // Альтернативная энергетика и экология. - 2015. - № 20(184). - С.53-73.
7. 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. - Вып. 11. - С. 1722-1728.
8. Иванов-Омский В.И. Модифицирование электронного спектра и колебательных свойств аморфного углерода примесью меди / В.И. Иванов-Омский, Э.А. Сморгонская // ФТП. 1998. - Т.32. - №8. - С. 931-938.
9. Особенности роста пленок  $\alpha - \text{C:H}$  и  $\alpha - \text{C:H} < \text{Cu} >$  при магнетронном распылении / Т.К. Звонарева, В.И.



Иванов-Омский, А.В. Нащекин, Л.В. Шаронова // ФТП. – 2000. – С. 96–101.

10. Образование поверхностных медно-углеродных микроструктур при распылении составной графитово-медной мишени магнетронным способом / С.И. Валянский, С.В. Виноградов и др. // Прикладная физика. – 2016. – № 1. – С. 49–52.

11. Луцев Л.В. Электронный транспорт в наноразмерной кластерной структуре углерод-медь / Л.В. Луцев, С.В. Яковлев, В.И. Сиклицкий // ФТП. – 2000. – Т. 42. – Вып. 6. – С 1105–1112.

12. Grill A. Diamond-like carbon state of the art / A. Grill // *Diamond and Related Materials*. – 1999. – № 8. – С.428–434.

13. Кодолов В. Производство и использование металл-углеродных нанокompозитов / В. Кодолов // *Наноиндустрия*. – 2011. – С. 24–26.

Воронежский государственный технический университет

## ELECTRICAL RESISTANCE AND THERMAL ELECTROMOTIVE FORCE OF NANOCOMPOSITES $Cu_x(a-C)_{100-x}$

V.A. Makagonov<sup>1</sup>, A.A. Krasnova<sup>2</sup>, L.I. Yanchenko<sup>3</sup>, I.M. Tregubov<sup>4</sup>, M.A. Kashirin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD, Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: vlad\_makagonov@mail.ru

<sup>2</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: KAA@mail.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: lyanchenko74@yandex.ru

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: ilia.tregubov@mail.ru

<sup>5</sup>Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: mnitro@yandex.ru

The  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  thin films containing 15-85 at. % Cu were obtained by the ion-beam sputtering technique in argon atmosphere. According to the structure investigations the obtained films are nanocomposites, where in a prepercolating regions the copper particles with size from 1 to 20 nm are embedded in an amorphous carbon matrix. The concentration and temperature dependence of electrical conductivity in DC and AC modes and the thermal electromotive force at room temperature were experimentally investigated. The analysis of concentration dependences of electrical resistance shows that the  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  is a percolating system with the percolating threshold at 54.3 at. % Cu. The concentration dependence of thermal electromotive force has a maximum in the vicinity of the percolation threshold. It is shown that in the studied temperature range the charge transfer is carried by the hopping conductivity in the samples with the small concentration of the metallic phase 15 to 54.3 at. % Cu, (before the percolation threshold). The usual metal conductivity is dominated at a concentration range from 54.3 to 85 at. % Cu (after the percolation threshold). The heat treatment of the  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  composites carried at temperatures of 280 and 400 °C for 30 min leads to a shift of the percolation threshold to  $x_c=34$  and 46.5 at. % Cu, respectively. It is established that the temperature coefficient of electrical resistance of  $Cu_x(a-C)_{100-x}$  thin films with the copper concentration of 54 at. % remains close to zero in a wide temperature range

Key words: nanocomposite, thin films, copper, carbon, electrical resistance

### References

1. Neugebauer C.A. "Resistivity of Cermet Films Containing Oxides of Silicon", *Thin Solid Films*, vol. 6, 1970, pp. 443-447.
2. Gittleman J.L., Goldstain Y., Bozowski S. "Magnetic properties of Granular Nickel Films", *Physical Review*, 1972, vol. B5, pp. 3609-3621.
3. Abeles B., Sheng P., Coutts M.D., Arie Y. "Structural and electrical properties of granular metal films", *Advances in Physics*, 1975, vol. 24, pp. 407-461.
4. Jeffros A.L., Shklovskij B.I. "Theory of flow and conductivity of strongly inhomogeneous media" ("Teorija protekanija i provodimost' sil'no neodnorodnyh sred"), *UFN*, 1974, vol. 117, no. 3, pp. 2-14
5. Gridnev S.A., Kalinin Ju.E., Sitnikov A.V., Stognej O.V. "Nonlinear phenomena in nano- and microheterogeneous systems" ("Nelinejnye javlenija v nano- i mikroheterogennyh sistemah"), Moscow, BINOM. Laboratorija znaniy, 2012, 352 p.
6. Granovskij A.B., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stognej O.V. "Transport and magnetic phenomena in nanoheterogeneous structures", *Alternative energy and ecology*, 2015, no. 20(184), pp. 53-73.
7. Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Makagonov V.A., Pankov S.Ju., Sitnikov A.V. "Electrical properties of thin films of amorphous carbon produced by ion-beam deposition", *Journal of Technical physics*, 2017, vol. 87, no. 11, pp. 1722-1728.
8. Ivanov-Omskij V.I., Smorgonskaya A. E. "Modification of the electronic spectrum and the vibrational properties of amorphous carbon admixture of copper", *FTP*, 1998, vol. 32, no. 8, pp. 931-938.
9. Zvonareva T.K., Ivanov-Omskij V.I., Nashhekin A.V., Sharonova L.V. "Characteristics of growth of films of  $a-C:H$  and  $a-C:H<Cu>$  at magnetron sputtering", *FTP*, 2000, pp. 96–101.
10. Valjanskij S.I., Vinogradov S.V. and oth. "The formation of surface copper-carbon microstructures during the spraying of the composite graphite-copper target sputtering method", *Journal of Applied physics*, 2016, no. 1, pp. 49–52.
11. Lucev L.V., Jakovlev S.V., Siklickij V.I. "Electron transport in nanonans-dimensional cluster structure of carbon-copper", *FTT*, 2000, vol. 42, no. 6, pp. 1105–1112.
12. Grill A. "Diamond-like carbon state of the art", *Diamond and Related Materials*, 1999, no 8, pp. 428–434.
13. Kodolov V. "Production and use of the metal-carbon composites", *Nanoindustrija*, 2011, pp. 24–26.

## ПОВЫШЕНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВОЙСТВ КОММУТАЦИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕТВЯХ N-ТИПА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРНЫХ БАТАРЕЙ

© 2017 Е.К. Белоногов, В.А. Дыбов, А.В. Костюченко, С.Б. Кушев, Д.В. Сериков,  
С.А. Солдатенко, Е.Н. Федорова, А.В. Бугаков

Эффективность термоэлектрических генераторных батарей, помимо свойств полупроводника, определяется величинами контактного сопротивления и адгезии на границе раздела полупроводник-металл, которые, в свою очередь, зависят от материала, структуры коммутационных и антидиффузионных слоев, физико-химического взаимодействия на межфазной границе твердый раствор теллурида висмута - коммутационный контакт, модификации поверхности ветвей полупроводника перед нанесением металлических слоев. Цель данной работы – реализация разных технологических вариантов подготовки поверхности полупроводниковых ветвей n-типа ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ) и оценка их влияния на величину адгезии металлизации из молибдена и никеля.

Методами рентгеновской дифрактометрии, атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования проведены исследования фазового состава, морфологии и твердости полупроводниковых ветвей n-типа проводимости твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  после разных вариантов подготовки поверхности (механическая обработка, импульсная фотонная обработка (ИФО), электрохимическая полировка, ультразвуковое диспергирование). Методом испытания на сдвиг определяли величину адгезии коммутационных барьерных слоев Mo/Ni на модифицированных поверхностях полупроводниковых ветвей. Показано, что механическая полировка термоэлектрических ветвей упрочняет приповерхностный слой твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  n-типа, повышает адгезию коммутационных барьерных слоев Mo/Ni более чем в 4 раза. ИФО, выполняемая после механической полировки, несущественно повышает адгезию коммутационных барьерных слоев, а последующая электрохимическая полировка снижает адгезионные свойства поверхности твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Установлено, что ИФО увеличивает толщину упрочненного приповерхностного слоя полупроводниковой ветви, что способствует эффективной и стабильной работе термоэлектрической генераторной батареи

Ключевые слова: термоэлектричество, теллурид висмута, барьерный слой, адгезия

### Введение

Увеличение эффективности термоэлектрических устройств возможно в двух аспектах: это поиск новых материалов и разработка новых технологий реализации коммутационного соединения металл – полупроводник. Если первое направление практически исчерпано, то второе богато разнообразными ресурсами. Сегодня основная технологическая проблема – создание контактов, обеспечивающих высокую адгезию при низком контактном сопротивлении. Высокие адгезия и электропроводность на

границе металл-полупроводник – необходимое условие обеспечения надежности и конкурентно способных электрических параметров термоэлектрических генераторных батарей [1].

Величина адгезии зависит от толщины, состава и структуры нарушенного слоя, а также морфологии и рельефа поверхности. Например, электрохимическая полировка, ультразвуковая обработка, сушка в парах толуола или изопропилового спирта и отжиг в вакууме позволили увеличить адгезию металлизации до  $19 \text{ Н/мм}^2$  и получить омические контакты с сопротивлением не более  $10^{-10} \text{ Ом/мм}^2$  на образцах твердых растворов халькогенидов висмута [2]. В работе [3] показано, что комплексное применение различных видов и режимов полировки позволяет снизить до 2 нм шероховатость поверхности полупроводниковой ветви. Однако создание гладкой и химически чистой поверхности полупроводниковых ветвей само по себе не является достаточным условием для надежных, прочных и воспроизводимых электрических характеристик контакта. Шероховатость, реализованная в работе [3], целесообразна для термоэлементов, используемых в микроэлектронике. В то же время в ветвях для мощных силовых термогенераторных батарей развитая поверхность более эффективна, так как позволяет увеличить не только адгезию барьерного слоя, но и повысить доб-

---

Белоногов Евгений Константинович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: ekbelonogov@mail.ru  
Дыбов Владислав Анатольевич – ВГТУ, аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: dybovvlad@gmail.com  
Костюченко Александр Викторович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, e-mail: av-kostuchenko@mail.ru  
Кушев Сергей Борисович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: kushev\_sb@mail.ru  
Сериков Дмитрий Владимирович – ВГТУ, аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: dmitriy.tut@mail.ru  
Солдатенко Сергей Анатольевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: cossack408@mail.ru  
Федорова Елена Николаевна – ВГТУ, младший научный сотрудник, e-mail: en-fedorova@mail.ru  
Бугаков Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: abugakov2011@yandex.ru



ротность термоэлемента [4, 5]. Несмотря на актуальность проблемы, ее решению уделяется сравнительно малое внимание. В научной литературе практически отсутствуют систематические исследования зависимости величины адгезии от чистоты, структуры, морфологии и шероховатости поверхности. Решая задачи повышения адгезии, следует уделить внимание потенциальной возможности упрочнения приповерхностных слоев полупроводниковых ветвей за счет модификации поверхности. Ранее авторами данной статьи была показана возможность и эффективность применения метода импульсной фотонной обработки ИФО для повышения твердости поверхностных слоев [6].

Прочные, но уступающие монокристаллам по эффективности образцы твердых растворов халькогенидов висмута получают методом экструзии и прессования. Для достижения высокой, как у монокристаллов, эффективности термоэлектрических устройств на основе поликристаллических образцов халькогенидов висмута необходимы такие условия их получения, при которых плоскости спайности расположены в одной плоскости, что позволит максимально реализовать анизотропию электрофизических свойств ромбоэдрической кристаллической решетки. Однако текстура ухудшает механические свойства, приводя к трещинам по плоскостям спайности. Эффективность термоэлектрических генераторных батарей, помимо свойств полупроводника, определяется величинами контактного сопротивления и адгезии на границе раздела полупроводник – металл, которые, в свою очередь, зависят от материала, структуры коммутационных и антидиффузионных слоев, физико-химического взаимодействия на межфазной границе твердый раствор халькогенида висмута - коммутационный контакт, модификации поверхности ветвей полупроводника перед нанесением металлических слоев. Поэтому цель данной работы – реализация разных технологических вариантов подготовки поверхности полупроводниковых ветвей n-типа ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ ) и оценка их влияния на величину адгезии металлизации из молибдена и никеля.

#### Методика эксперимента и методы исследования

Полупроводниковые кольца n-типа проводимости на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  получали путем изостатического прессования порошков соответствующего состава в атмосфере аргона при температуре около 630 -

650 К. Затем кольца подвергали резке алмазным диском на ветви.

Виды подготовки поверхности полупроводниковых ветвей перед нанесением металлических пленок Mo и Ni применяемые в данной работе приведены в табл. 1.

Сначала все образцы проходили механическую обработку, которую проводили на диске с наждачной бумагой с карбидокремниевым абразивом различной зернистостью (от P2000 до P5000), до получения зеркальной поверхности. Часть образцов затем подвергалась ультразвуковой обработке.

Таблица 1

Виды обработки поверхности полупроводниковых ветвей

| Номер группы                                                                                                        | Обработка                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1                                                                                                                   | Механическая полировка + УЗД      |
| 2                                                                                                                   | Механическая полировка + УЗД+ИФО  |
| 3                                                                                                                   | Механическая полировка + ЭХП+ УЗД |
| УЗД - ультразвуковое диспергирование;<br>ИФО - импульсная фотонная обработка;<br>ЭХП - электрохимическая полировка. |                                   |

Для этого образцы помещали в колбу с дистиллированной водой и на предметный столик ультразвукового диспергатора УЗД-2Т. Обработку проводили на частоте 44 кГц в течение 5 минут с каждой стороны. Затем проводили импульсную фотонную обработку мощным излучением ксеноновых ламп (длина волны 0,2 -1,2 мкм) в атмосфере Ar при следующих режимах: двукратное облучение пакетом импульсов длительностью  $10^{-2}$  с за 1,0 с, что соответствовало энергии излучения, поступающей на образец ( $E_{\text{и}}$ ),  $\sim 125 \text{ Дж/см}^2$ .

Другая часть образцов с целью удаления поврежденного механической обработкой поверхностного слоя полупроводника, а также очистки поверхности от оксидов и адсорбированных загрязнений проходила ЭХП. Для осуществления ЭХП обрабатываемую ветвь помещали в ванну с электролитом в качестве анода. Ветвь располагали между двумя графитовыми электродами, служащими катодами. Для ЭХП использовали электролит состава: NaOH – 83 г/л;  $\text{H}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ – 67 г/л,  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$  – 100 мл/л., дистиллированная вода 750 г/л [3]. Процесс ЭХП проводили при комнатной температуре в течение 1 мин. при плотности тока  $120 \text{ мА/см}^2$  и напряжении 9 В. После ЭХП ветви промывали в дистиллированной воде. Затем для удаления продуктов реакции образцы проходили ультразвуковую обработку в изопропиловом спирте.

В качестве коммутационного слоя использовали никель, а в качестве барьерного – мо-

либден. Послойное нанесение металлических слоев Mo и Ni на подготовленные поверхности полупроводниковых ветвей наносили методом магнетронного распыления соответствующих мишеней в среде Ar ( $4,2 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст.) на установке УВН-74М. Нагрев ветвей до 470 К осуществляли с помощью ИК ламп. Мощность магнетрона с Mo мишенью составляла 900 Вт, магнетрона с Ni мишенью 600 Вт, соответственно. Скорость конденсации молибдена при этих параметрах составляла 3,3 нм/с, никеля – 1,8 нм/с.

Исследование фазового состава образцов производили методом рентгеновской дифрактометрии (Bruker D2 Phaser). Рельеф и шероховатость поверхности образцов исследовали методами атомно-силовой микроскопии (NT-MDT Solver P47) и растровой электронной микроскопии (JEOL JSM6380LV). Твердость образцов исследовали методом измерительного наноиндентирования на нанотвердомере Nano Hardness Tester (CSM Instruments) с алмазным индентором Берковича. Максимальная величина нагрузки на индентор составляла 10,0 мН и 200,0 мН. Скорость нагружения при индентировании составляла 15 и 300 мН/мин., соответственно. Значения твердости по Мейру и модуля Юнга поверхностного слоя образцов определяли по методу Оливера и Фара согласно ГОСТ Р 8.748-2011. Данный блок обработки результатов входит в математический пакет программы «Indentation», прилагаемой к нанотвердомеру. Измерение адгезии покрытий к ветвям осуществляли методом испытаний на сдвиг согласно ГОСТ Р 52641-2006 на разрывной машине РПМ-10МГ4. Нагрузку осуществляли при постоянной скорости поперечного перемещения, равной 1,0 мм/мин. Вычисление адгезии покрытий производили по формуле  $R=P/F$ , где  $P$  – максимальное значение нагрузки,  $F$  – площадь клеевого соединения.

## Результаты и обсуждение

### 1. Фазовый состав, морфология и твердость поверхности полупроводниковых ветвей, прошедших различные виды обработки

**Фазовый состав.** На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы, характеризующие фазовый состав поверхностных слоев полупроводниковых ветвей до и после разных вариантов обработки поверхности.

На дифрактограмме исходной ветви (кривая 1) присутствуют отражения, соответствующие только ромбэдрической решетке  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$

( $R\bar{3}m$ ) [7]. Относительно высокая интенсивность отражений (006) и (0015)  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  свидетельствует о наличии преимущественной текстуры с осью зоны  $\langle 0001 \rangle$ .

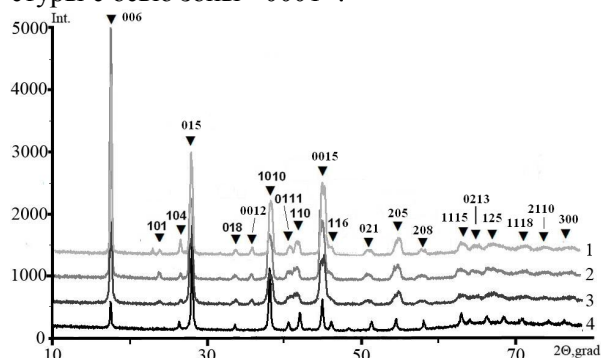


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы ветвей на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (n-тип) до (кривая 1) и после механической полировки (кривая 2), механической полировки + ЭХП + УЗД (кривая 3) и механической полировки + УЗД + ИФО (кривая 4)

Как видно из рис. 1, фазовый состав поверхности ветвей в результате различных обработок не изменялся. Наблюдается только снижение относительной интенсивности отражений (006) и (0015)  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$  как после механической полировки, так и после последующей обработки поверхности методом ИФО. Кроме того, для образцов прошедших механическую полировку, наблюдается уширение дифракционных пиков, что свидетельствует о наличии напряжений, возникающих в результате деформации поверхностного слоя. Для ветвей, прошедших ИФО, происходит уменьшение ширины пиков. Поскольку при данных режимах ИФО на поверхности ветвей создаются температуры  $\sim 800$  К, очевидно, что данные изменения связаны с процессом рекристаллизации зерен и образованием зерен с произвольной ориентацией и, как следствие, уменьшением напряжений в приповерхностных слоях.

**Морфология поверхности.** На рис. 2 приведены АСМ сканы и гистограммы распределения высот для исходных образцов и после разных вариантов обработки. Данные анализа приведены в табл. 2.

По данным исследования методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) исходная поверхность образцов имеет бимодальный характер неоднородностей рельефа. Во-первых, это неоднородности с размерами существенно более 3 мкм, как в латеральном направлении, так и по высоте, а во-вторых, - неоднородности размером до 1 мкм в плоскости и не более 0,3 мкм по вертикали. Очевидно, что дефекты первого типа обусловлены дисперсностью исходного порошка твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и морфологией кристаллитов, формируемой в процессе изо-

статического прессования. Дефекты второго типа – места концентрации напряжений в результате пластической деформации (экструзии), когда изменяются геометрия и размеры кристаллитов, структура и шероховатость поверхности.

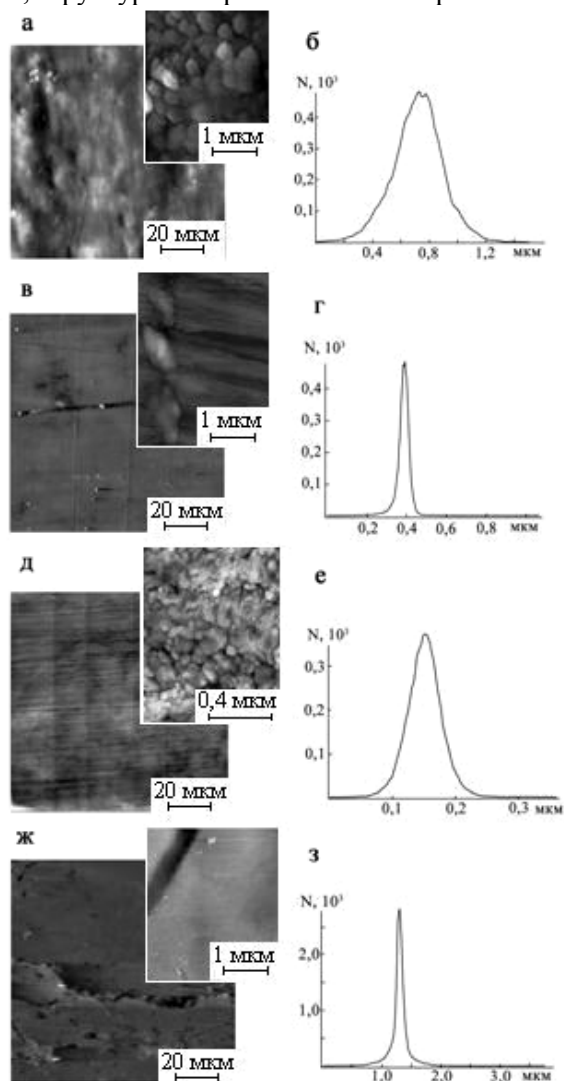


Рис. 2. АСМ сканы (а, в, д, ж) и гистограммы распределения высоты рельефа (б, г, е, з) поверхности ветви теллурида висмута после прессования (а, б), механической полировки + УЗД (в, г), механической полировки + УЗД + ИФО (д, е) и механической полировки + ЭХП (ж, з)

Таблица 2

Параметры рельефа поверхности полупроводниковых ветвей теллурида висмута до и после обработок

| Обработка поверхности             | Перепад высоты, нм | Шероховатость на площади 0,01мм <sup>2</sup> , нм |
|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------|
| Исходный образец                  | 1508               | 137                                               |
| Механическая полировка            | 1074               | 23                                                |
| Механическая полировка + УЗД+ИФО  | 363                | 22                                                |
| Механическая полировка + ЭХП+ УЗД | 3700               | 90                                                |

На рис. 2а представлен АСМ скан области, которая содержит только дефекты второго типа. Морфология поверхности ветвей  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  наследует неровности (шероховатость) пресс формы.

Асимметрия гистограммы распределения высоты рельефа (рис. 2б) указывает на превалирование впадин над выступами, т.е. дефектов обусловленных экструзией материала по плоскостям спайности (перпендикулярно поверхности образца), не выявлено.

После механической полировки поверхность ветви  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  имеет неоднородный рельеф (см. рис. 2в), перепад высоты не превышает 0,15 мкм, что существенно меньше размеров зёрен абразивов P2000 и P5000, используемых при полировке. Как и в предыдущем случае, асимметрия гистограммы (рис. 2г) указывает на доминирование впадин над выступами, но в большей степени, следовательно, полировка успешно устранила дефекты, выступающие над поверхностью материала. Артефактами механической полировки служат царапины, а также мелкие крупцы на поверхности ветви, которые в процессе УЗД успешно удаляются (см. рис. 2д).

Рельеф поверхности ветви  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  после механической полировки, УЗД и ИФО представлен на рис. 2д. После ИФО происходит изменение характера рельефа, а именно, формируется однородный рельеф, содержащий однотипные дефекты, морфология которых указывает на возможную природу их появления – рекристаллизация кристаллитов и изменение структуры приповерхностного слоя полупроводника. Перепад высоты не превышает 0,1 мкм, гистограмма (рис. 2е) отражает нормальное распределение неоднородностей по высоте, что свидетельствует об однородной кристаллической структуре поверхностного слоя материала.

На АСМ скане (рис. 2ж) поверхности образцов после ЭХП и УЗД выявлены протяженные углубления с перепадом высоты более 0,5 мкм. Асимметрия гистограммы распределения высоты рельефа указывает на преобладание протяженных углублений над остальными дефектами поверхности. Использование ЭХП при подготовке поверхности ветвей показало исключительную селективность скорости травления прессованной поверхности материала.

**Механические свойства.** В таблице 3 представлены величины твердости (Н) и модуля упругости (Е) приповерхностного слоя полупроводниковых ветвей, прошедших различные виды обработки.

Известно, что твердость высокодисперсных покрытий из твердых растворов на основе теллурида висмута до 2,5 раз выше твердости монокристаллов соответствующего состава [8]. Модуль Юнга в крупнозеренном (размер зерен около 20 мкм) теллуриде висмута с одноосной текстурой [0001] минимален вдоль направления [0001] и составляет около 32 ГПа; а при высокой дисперсности зеренной структуры (средний размер зерен около 0,2 мкм) и произвольной ориентации зерен модуль Юнга теллурида висмута составляет около 48 ГПа [9].

Таблица 3

Твердость и модуль упругости приповерхностного слоя полупроводниковой ветви, прошедшей различные виды обработки

| F, мН                      | 10     |        | 200    |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                            | H, ГПа | E, ГПа | H, ГПа | E, ГПа |
| Без обработки              | 1,1    | 29,7   | 0,9    | 29,5   |
| Мех. полировка + УЗД       | 1,3    | 26,9   | 0,7    | 21,6   |
| Мех. полировка + УЗД + ИФО | 1,3    | 31,2   | 0,9    | 32,8   |
| Мех. полировка + ЭХП + УЗД | 1,0    | 21,9   | 0,6    | 21,7   |

Как следует из табл. 3, в результате механической полировки наблюдается возрастание твердости и модуля Юнга приповерхностного слоя ветвей при нагрузке 10 мН и их снижение при нагрузке 200 мН. Наблюдаемый результат можно связать с удалением в процессе механической полировки находящегося в приповерхностной области исходных ветвей нарушенного слоя, отличающегося от внутренних областей как химическим составом, так и отсутствием текстуры [0001]. Вместо удаленного слоя формируется относительно тонкий деформированный слой, имеющий дисперсную зеренную структуру. Полученные при малой нагрузке на индентор (10 мН) величины H и E характеризуют только приповерхностный слой, а при нагрузке 200 мН в случае полированной ветви вклад в величины H и E вносят внутренние слои с крупнозеренной структурой и текстурой [0001].

ИФО механически полированных ветвей приводит к формированию приповерхностных слоев с произвольной ориентацией зерен относительно большей толщины по сравнению с глубиной проникновения индентора. Следствием этого являются близкие для обеих нагрузок индентирования и возросшие по сравнению с механически полированными ветвями величина

ны E и возросшая при нагрузке 200 мН величина H.

ЭХП приводит к удалению деформированного приповерхностного слоя, поэтому наблюдаемые при обеих нагрузках величины H и E отражают упругие свойства слоев ветвей, состоящих из плоских микрочастиц с текстурой [0001].

## 2. Адгезионные свойства приповерхностного слоя ветвей

Исследование фазового состава методом рентгеновской дифрактометрии гетероструктур полупроводниковые ветви - металлические слои (Mo, Ni) показало, что фазовый состав для всех видов обработки поверхности полупроводниковых ветвей одинаков. На рис.3 представлена характерная рентгеновская дифрактограмма, полученная от полупроводниковой ветви, поверхность которой была подготовлена механической полировкой, УЗД и ИФО, с нанесенными коммутационными барьерными слоями Ni и Mo.

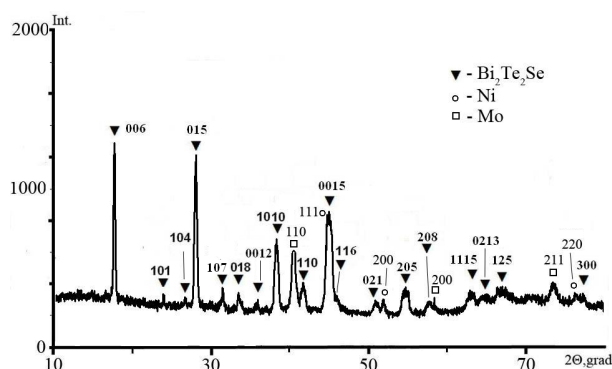


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма, полученная от полупроводниковой ветви поверхность, которая была подготовлена механической полировкой, УЗД и ИФО, с нанесенными коммутационными барьерными слоями Ni и Mo

Анализ показал, коммутационные, барьерные и приповерхностные слои полупроводниковой ветви содержали только чистые металлические фазы Mo, Ni и фазу  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ . Полученные данные свидетельствуют о том, что при конденсации металлических слоев на поверхность полупроводниковой ветви на межфазной границе полупроводниковая ветвь - металлические слои химического взаимодействия атомов с образованием каких-либо кристаллических фаз не происходит.

В результате испытаний на сдвиг фазовый состав поверхности отрыва на ветви представлен только  $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$ , что свидетельствует о разрушении гетероструктуры по межфазной границе полупроводниковая ветвь - металлические слои

(адгезионное разрушение) или по объему полупроводника (когезионное разрушение). В табл. 4 представлены величины адгезии покрытий и характер разрушения гетероструктур полупроводниковая ветвь - металлические слои, установленный по результатам СЗМ поверхности отрыва со стороны покрытия.

Для покрытий, полученных на немодифицированной поверхности ветвей, величина адгезии минимальная. Это может быть связано с наличием примесей и большого количества объемных дефектов (трещины, поры) в приповерхностном слое.

Таблица 4

Величины адгезии покрытий и характер разрушения гетероструктур полупроводниковая ветвь - металлические слои

|                            | $R_{сдвиг}$ , МПа | Характер разрушения |
|----------------------------|-------------------|---------------------|
| Без обработки              | 1,3               | когезионный         |
| Мех. полировка + УЗД       | 5,6               | смешанный           |
| Мех. полировка + УЗД + ИФО | 5,5               | адгезионный         |
| Мех. полировка + ЭХП + УЗД | 2,3               | когезионный         |

Адгезия покрытий на поверхности ветвей после механической полировки, а также механической полировки и ИФО, более чем в четыре раза превышает адгезию покрытий на исходной ветви. Повышение величины адгезии коррелирует с данными наноиндентирования и может быть связано с наличием в приповерхностной области полупроводника упрочненного слоя с дисперсной зеренной структурой. Адгезия покрытий на поверхности ветвей после ЭХП превышает адгезию на необработанных ветвях практически в 2 раза. Повышению адгезии покрытий способствуют особенности рельефа, представленного протяженными углублениями по границам зерен. В то же время по сравнению с ветвями, подвергнутыми механической полировке и механической полировке с последующей ИФО, адгезия покрытий на ветвях после ИХТ существенно ниже. Такой результат связан с тем, что в монокристаллах  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{Se}$  разрушение наиболее легко происходит по плоскостям спайности (0001) [9]. Наличие крупных зерен с текстурой [0001] в приповерхностном слое ветвей после ИХТ может приводить к снижению величины сдвиговых напряжений, приводящих к его разрушению по сравнению с приповерхностным слоем с мелкокристаллической структурой с произвольной ориентацией зерен.

## Выводы

Механическая полировка поверхности термоэлектрических ветвей на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  n-типа упрочняет приповерхностный слой и повышает адгезию коммутационных барьерных слоев из Mo и Ni более чем в 4 раза.

ИФО увеличивает толщину упрочненного слоя полупроводниковой ветви твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  n-типа после механической полировки, что способствует эффективной и стабильной работе данных ветвей.

ИФО после механической полировки не приводит к значительному изменению величины адгезии коммутационных барьерных слоев Mo/Ni.

ЭХП после механической полировки снижает величину адгезии покрытия Mo/Ni.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. №218 (Договор № 03.G25.31.0246).*

## Литература

1. Изучение структурных механизмов нарушения адгезии антидиффузионного покрытия никеля на ТЭМ Bi-Sb-Te / В.Б. Освенский, В.В. Каратаев, Н.В. Малькова, В.Т. Бублик, Ю.В. Гостев и др. // Материалы электронной техники.- 2002. - С.70 – 73.
2. Technology and Investigation of Ohmic Contacts to Thermoelectric Materials / Y.I. Shtern, R.E. Mironov, M.Y. Shtern, A.A. Sherchenkov and M.S. Rogachev // Acta physica polonica A. - 2016.-V.129.-N.4.- P.785-787.
3. Studies on surface preparation and smoothness of nanostructured  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based alloys by electrochemical and mechanical methods / H.-P. Feng, B. Yu, Sh. Chen, K. Collins, C. He, Z.F. Ren, G. Chen // Electrochimica Acta. - 2011. V.56.- P. 3079–3084.
4. Влияние состояния контактной поверхности на адгезионную прочность коммутационных слоев термоэлементов на основе экструдированного теллурида висмута / А.В. Симкин, А.В. Бирюков. Н.И. Репников, О.Н. Иванов // Термоэлектричество.- 2012. – №2. – С.76-82.
5. Марченко О.В. Методы расчета термоэлектрических генераторов / О.В. Марченко, А.П. Кашин, В.И. Лозбин. - Сибирская издательская фирма «Наука» РАН.- 1995.- С. 222.
6. Модификация поверхности термоэлектрических ветвей на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  методом импульсной фотонной обработки / Е.К. Белоногов, В.А. Дыбов, А.В. Костюченко, С.Б. Кушев, В.Н. Санин, Д.В. Сериков, С.А. Солдатенко // Конденсированные среды и межфазные границы.- 2017.- Т.19.-№4.
7. Powder Diffraction File, Alphabetical Index Inorganic Compounds / JCPDS, Pennsylvania 19081,U.S.A.- 1977.- P.17.
8. Nanomechanical properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  thin films by nanoindentation / C.-H. Tasi, Y.-C. Tseng, S.-R. Jian, Y.-Y. Liao, C.-M. Lin, P.-F. Yang, D.-L. Chen, H.-J. Chen, C.-W. Luo, J.-Y. Juang // Journal of Alloys and Compounds.- 2015.- V.619.- P.834-838.

Воронежский государственный технический университет

## ADJECTION PROPERTIES INCREASE OF SWITCHING LAYERS ON N-TYPE SEMICONDUCTOR BRANCHES OF THERMOELECTRIC GENERATOR BATTERIES

**E.K. Belonogov<sup>1</sup>, V.A. Dybov<sup>2</sup>, A.V. Kostyuchenko<sup>3</sup>, S.B. Kushchev<sup>4</sup>, D.V. Serikov<sup>5</sup>, S.A. Soldatenko<sup>6</sup>,  
E.N. Fedorova<sup>7</sup>, A.V. Bugakov<sup>8</sup>**

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: ekbelonogov@mail.ru

<sup>2</sup>Graduate student, Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: dybovvlad@gmail.com

<sup>3</sup>PhD, Laboratory Head, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: av-kostuchenko@mail.ru

<sup>4</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: kushev\_sb@mail.ru

<sup>5</sup>Graduate student, Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: dmitriy.tut@mail.ru

<sup>6</sup>PhD, Senior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: cossack408@mail.ru

<sup>7</sup>Junior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: en-fedorova@mail.ru

<sup>8</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: abugakov2011@yandex.ru

The efficiency of thermoelectric generator panels, in addition to the properties of the semiconductor, is determined by the values of the contact resistance, and adhesion at the interface “semiconductor – metal”, which in turn depend on the material, the structure of the commutation and anti-diffusion layers, physico-chemical interaction at the interface “solid solution of bismuth telluride - switching contact”, surface modification of semiconductor legs prior to deposition of metal layers. Therefore, the aim of this work is the implementation of different technological variants of preparation of the surface the leg of the Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> n-type and evaluation of their influence on the value of the adhesion metallization of molybdenum and nickel.

X-ray diffractometry, atomic force microscopy, and nanoindentation were used to study the phase composition, morphology, and hardness of the surface of semiconductor legs of n-type conductivity, based on a solid Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> solution, which underwent various types of surface preparation (mechanical treatment, pulsed photon treatment PPT, electrochemical polishing, ultrasonic dispergation). The adhesion properties of commutation barrier layers based on Mo and Ni on the modified surfaces of semiconductor legs are investigated by shear testing. It is shown that mechanical polishing of the surface of thermoelectric legs on the basis of a n-type solid solution of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> leads to hardening of surface layers and an increase in the adhesion properties of switching barriers on the basis of Mo and Ni by more than 4 times. Subsequent pulsed photon treatment with incoherent light does not lead to a significant change in the adhesion properties of the switching barrier layers, while subsequent electrochemical polishing leads to a decrease in the adhesion properties of the coatings. It is established that PPT leads to an increase in the thickness of the hardened layer on the surface of a semiconductor leg that has undergone mechanical polishing, which can contribute to thermal stability in the operation of these legs

Key words: thermoelectricity, bismuth telluride, barrier layer, adhesion

### References

1. Osvenskii V.B., Karataev V.V., Mal'kova N.V. "Study of the Structural Mechanism of Adhesion Failure in Antidiffusion Nickel Coating on Thermoelectric Bi-Te-Sb Materials", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Materialy Electronnoy Tekhniki*, 2002, no. 2, pp. 70-73.
2. Shtern Y.I., Mironov R.E., Shtern M.Y., Sherchenkov A.A. and Rogachev M.S. "Technology and Investigation of Ohmic Contacts to Thermoelectric Materials", *Acta physica polonica A*, 2016, vol.129, no. 4, pp.785-787.
3. Feng H.-P., Yu B., Chen Sh., Collins K., He C., Ren Z.F., Chen G. "Studies on surface preparation and smoothness of nanostructured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based alloys by electrochemical and mechanical methods", *Electrochimica Acta*, 2011, vol. 56, pp. 3079–3084.
4. Simkin A.V., Biryukov A.V., Repnikov N.I., Ivanov O.N. "Effect of contact surface condition on the adhesion strength of interconnect layers of thermoelements based on extruded bismuth telluride", *Journal of Thermoelectricity*, 2012, no.2, pp. 76-82.
5. Marchenko O.V., Kashin A.P., Lozbin V.I. "Thermoelectric generators design methods", Siberian publishing «Nauka» of RAS, 1995, pp. 22.
6. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostyuchenko A.V., Kushev S.B., Sanin V.N., Serikov D.V., Soldatenko S.A. "Modification of the surface of thermoelectric branches on the basis of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> solid solution by pulse photon treatment method", *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2017, vol. 19, no. 4.
7. Powder Diffraction File, Alphabetical Index Inorganic Compounds, 1977, JCPDS, Pensilvania 19081, U.S.A.
8. Tasi C.-H., Tseng Y.-C., Jian S.-R., Liao Y.-Y., Lin C.-M., Yang P.-F., Chen D.-L., Chen H.-J., Luo C.-W., Juang J.-Y. "Nanomechanical properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films by nanoindentation", *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 619, pp. 834-838.
9. Santamaría J.A., Alkorta J., Sevilano J.G. "Microcompression tests of single-crystalline and ultrafine grain Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thermoelectric material", *J. Mater. Res.*, 2015, vol. 30, no.17, pp. 2593-2604.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОЗАКАЛИВАЮЩИХСЯ ЧУГУНОВ

© 2017 Л.С. Печенкина

Детали экскаваторов подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию. Для таких условий работы оптимально использовать комплексно-легированные белые чугуны. Повышенными износостойкостью и механическими свойствами будут обладать белые чугуны со специальными эвтектиками, которые стали объектом исследования. За счет расположения фаз в них обеспечивается получение композиционной структуры. Сочетание в структуре сплавов мягкой металлической матрицы и твердых упрочняющих включений фаз внедрения придает этим сплавам свойства антифрикционности и износостойкости. Исследования зависимости износостойкости комплексно-легированных белых чугунов от структуры металлической основы показали, насколько важно обеспечивать мартенситную или мартенситно-аустенитную структуру основы в отливках деталей экскаваторов, подвергающихся интенсивному износу, а во многих случаях еще и большим динамическим нагрузкам.

Задачей исследования является получение требуемой структуры в чугунных отливках, способных получить мартенситную (или мартенситно-аустенитную) структуру металлической основы и высокую твердость непосредственно в литом состоянии без упрочняющей термической обработки (самозакаливающиеся белые чугуны - СБЧ), за счет оптимизации химического состава.

Для выбора оптимального состава чугуна проведена серия плавок. Исследованы структура и свойства СБЧ. Научно обосновано и экспериментально определено: при мартенситной структуре матрицы и высокой твердости (HRC<sub>2</sub> 60-63) детали характеризуются высокой износостойкостью ( $K_n \approx 6$ ), однако отливки часто поражены микротрещинами. На опытном производстве втулок гидрораспределителя экскаватора найден оптимальный химический состав самозакаливающегося белого чугуна, при котором указанные дефекты в отливках исключаются. Установлено, что максимальной износостойкостью обладают сплавы, в структуре которых содержится 20-35% аустенита. В целом можно сделать вывод, что с увеличением количества углерода повышается износостойкость чугуна, но при этом снижается ударная вязкость. Поэтому для обеспечения достаточной износостойкости отливок при повышенной ударной вязкости рекомендуется малоуглеродистый комплексно-легированный белый чугун, содержащий 2,3% углерода, 4,2% марганца, 6,5% хрома

Ключевые слова: самозакаливающийся белый чугун, аустенит, ударная вязкость, легирование, износостойкость

### Введение

Интенсивному абразивному изнашиванию подвергаются многие детали экскаваторов. Для таких условий работы оптимально использовать комплексно-легированные белые чугуны. Повышенными износостойкостью и механическими свойствами будут обладать белые чугуны со специальными эвтектиками. За счет расположения фаз в них обеспечивается получение композиционной структуры [1]. Эффект композиционного упрочнения – это положительный эффект, обусловленный чисто геометрическими факторами: взаимным расположением составляющих, геометрической формой и размерами включений, ориентацией их относительно действующих напряжений и т.д. при резко различающихся свойствах составляющих. Эвтектические композиции в белых чугунах могут формироваться на основе специальных карбидов (типа  $M_7C_3$ , MC) и их сочетания.

Сочетание в структуре сплавов мягкой металлической матрицы и твердых упрочняю-

щих включений фаз внедрения придает этим сплавам свойства антифрикционности и износостойкости. По данным [2], износостойкость сплавов монотонно повышается с увеличением количества упрочняющей фазы, но при этом растет износ контртела, а кривая суммарного износа обнаруживает минимум вблизи эвтектического состава.

Очень сильное влияние на износостойкость чугунов оказывают количество, размеры и форма включений карбидной фазы. При увеличении количества карбидной фазы до 30-35% значительно повышается износостойкость у чугунов, имеющих в структуре (на поверхности трения) карбиды в виде мелких изолированных включений, равномерно распределенных в металлической основе.

Как показано в работе [3], металлическая основа белых износостойких чугунов слабее влияет на механические свойства чугунов, чем карбидная фаза. Однако структурное состояние матрицы оказывает большое влияние на износостойкость белых чугунов.

Исследования зависимости износостойкости комплексно-легированных белых чугунов от структуры металлической основы показали, насколько важно обеспечивать мартенситную

---

Печенкина Лариса Степановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: pls-7@mail.ru



или мартенситно-аустенитную структуру основы в отливках деталей экскаваторов, подвергающихся интенсивному износу, а во многих случаях еще и большим динамическим нагрузкам. Получение требуемой структуры возможно в чугунах, способных получить мартенситную (или мартенситно-аустенитную) структуру металлической основы и высокую твердость непосредственно в литом состоянии (самозакаливающиеся белые чугуны - СБЧ).

Целесообразность получения и использования СБЧ объясняется несколькими факторами:

- значительное упрощение технологического процесса получения износостойких деталей;
- резкое снижение трудоемкости, материалоемкости и энергоемкости процесса;
- уменьшение брака деталей из-за исключения или сокращения операций термической обработки;
- возможность полной механизации и автоматизации процесса.

По влиянию закаленной структуры металлической основы (мартенсит, мартенсито-аустенит, аустенит) на износостойкость единого мнения пока нет.

Данные [4] позволяют сделать вывод, что удельная нагрузка определяет оптимальный тип структуры. Наиболее благоприятной является аустенито-мартенситная матрица. Это связано с тем, что сопротивляется износу именно мартенсит, а вот противодействует выкрашиванию карбидов - аустенит. Большое значение имеет при этом способность аустенита упрочняться под действием абразива. Матрица на основе мартенсита подходит для тех случаев, когда характер износа приближается к эрозии. Аустенитная матрица выгодна в условиях высоких давлений, при больших углах атаки и наличии ударов. Целью исследования является получение требуемой структуры в чугунных отливках, способных получить мартенситную (или мартенситно-аустенитную) структуру металлической основы и высокую твердость непосредственно в литом состоянии без упрочняющей термической обработки, за счет оптимизации химического состава.

### Методика эксперимента

Плавку чугуна в лабораторных условиях проводили в индукционной печи ИСТ-0,06 с основной хромагнетитовой футеровкой. В качестве шихтовых материалов использовали стальной лом (сталь 3), ферромарганец, метал-

лический марганец, феррохром, феррованадий, ферросилиций. Науглероживание проводили электродным боем. Стальной лом представлял собой отходы стальных труб диаметром 30-100 мм, прутков диаметром 10-30 мм, отходы листовой стали  $\delta=1-5$  мм, сталь угловую №2,5-10. Кроме стального лома в составе металлической части шихты часто использовали стальную и чугунную стружку (до 40% от общего веса шихты). Стальную и чугунную стружку вводили в печь после расплавления стального лома. Оптимальная температура перегрева жидкого металла в печи емкостью 60 кг составляла 1450-1470°C. В заводских условиях плавку проводили в печах ИСТ-0,25 с кислой футеровкой на шихте, состоящей из стального лома, ферросплавов и электродного боя. Жидкий чугун перегревали до 1520-1550°C и разливали ковшами емкостью 100 кг.

Образцы для испытаний на разрыв отливали в сухих песчано-глинистых формах по модельным комплектам из пенополистирола. Плоские образцы для испытаний на износ и ударный изгиб также отливали в сухих песчано-глинистых формах и вырезали из тела отливки. Литники и прибыли удаляли с отливок с помощью вулканикового круга на специальной установке маятникового типа.

Плоские образцы подвергали механической обработке путем шлифования.

Для проведения металлографического исследования на микроскопе Neophot32 была использована стандартная методика подготовки шлифов.

Экспериментальные данные по износу в условиях сухого трения (без смазки) металл по металлу получены на машине МИ-1М (контртело – сталь 45 с твердостью HRC 45-46). Эталон – сталь ШХ 15, термообработанная на твердость HRC 61.

### Проведение исследования

Исходя из указанных выше рекомендаций для изготовления отливок маслост, втулок гидрораспределителя экскаватора был предложен СБЧ (рис.1). Ранее тонкостенные втулки изготавливали из стального проката (сталь 12ХН3А) путем его механической обработки, причем более половины металла уходило в стружку. Втулки запрессовывались в корпус гидрораспределителя. Для обеспечения износостойкости внутренняя поверхность втулки подвергалась цементации, закалке и отпуску. Весь процесс изготовления деталей отличался сложностью, громоздкостью и очень высокой



трудоемкостью (11 часов занимала только термообработка).

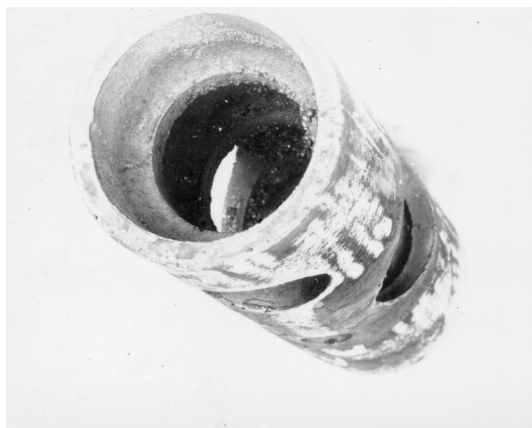


Рис. 1. Отливка «Маслота» (масса 1,4 кг).

На основе результатов термодинамического анализа и исследования микроструктуры выполнена ориентировочная оценка оптимального химического состава чугуна. Для выбора оптимального состава чугуна была проведена серия плавов.

Для всех сплавов рассчитано содержание аустенита в структуре матрицы А (%) по формуле:

$$A = \exp (K \cdot P_A), \quad (1)$$

где  $P_A$  – параметр аустенизации, являющийся функцией химического состава, %;

$K$  – коэффициент пропорциональности.

$$P_A = C + Mn + 0,5Cr + 0,2V - 0,5Si. \quad (2)$$

Значение коэффициента  $K$  принято равным 0,35, что соответствует охлаждению отливок в литейной форме.

Из всех отлитых образцов были изготовлены микрошлифы.

На рис. 2, 3 показана микроструктура СБЧ при 2,2% С, 2,2% Mn, 6,0 % Cr, 6,1%V, 0,83% Si, состоящая из мартенсита и тройной эвтектики  $A + MC + M_7C_3$ , выделяющейся в виде сетки по границам колоний двойной эвтектики и зерен избыточного аустенита.

Научно обосновано и экспериментально определено: при мартенситной матрице СБЧ и с высокой твердостью (HRC, 60-63) детали характеризуются высокой износостойкостью ( $K_{и} \approx 6$ ), однако отливки часто поражены микротрещинами.



Рис. 2. Микроструктура отливки, х 300

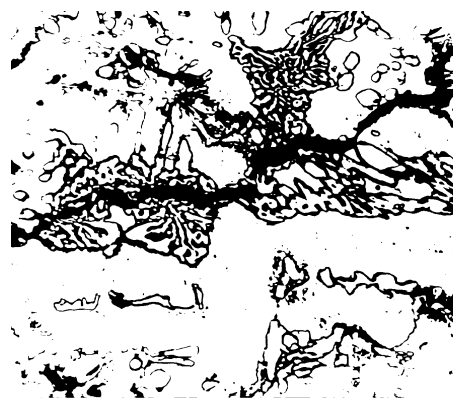


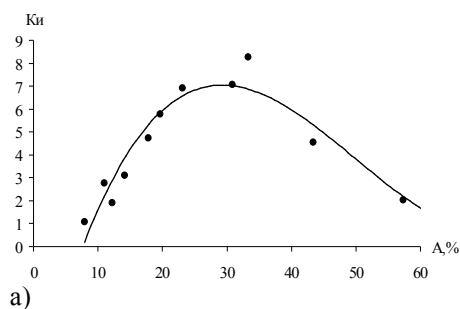
Рис. 3. Микротрещина в отливке, х 1200

Так как сетка тройной эвтектики является наиболее хрупкой составляющей в структуре сплава, именно в участках тройной эвтектики происходит формирование трещин критической длины, приводящих к хрупкому разрушению сплава (рис. 3). Особенно характерно это явление при динамическом нагружении деталей. Поэтому сетка тройной эвтектики является нежелательной структурной составляющей.

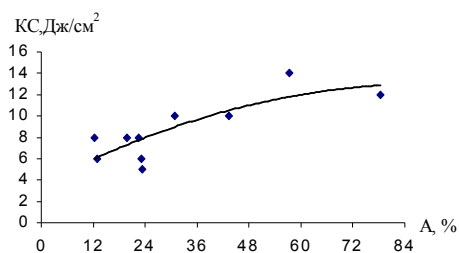
Этот дефект полностью устраняется при переходе на мартенситно-аустенитный чугун с содержанием в структуре 40-50% аустенита. Твердость такого чугуна несколько ниже (HRC, 46-52), но по износостойкости он вполне отвечает предъявляемым требованиям ( $K_{и} \approx 4$ ) и обеспечивает надежную работу втулок гидрораспределителя.

Результаты экспериментов обработаны с использованием регрессионного анализа в виде однофакторных зависимостей.

Основные зависимости ударной вязкости КС и коэффициента износостойкости  $K_{и}$  от содержания углерода и аустенита приведены на рис.4-6.



а)



б)

Рис. 4. Зависимости коэффициента износостойкости  $K_n$  (а) и ударной вязкости  $K_C$  (б) от содержания аустенита

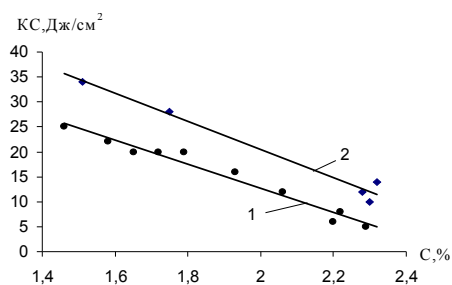


Рис. 5. Зависимость ударной вязкости от содержания углерода: 1 – при 1,8-2,2% Mn, 2- при 4,2-5,5% Mn

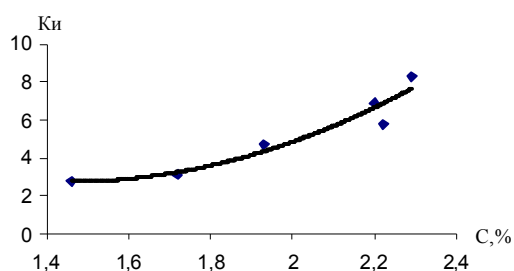


Рис. 6. Зависимость коэффициента износостойкости от содержания углерода

## Закключение

Анализ зависимостей показал следующее. Углерод снижает ударную вязкость в двух группах сплавов примерно с одинаковой интенсивностью. В наибольшей степени это связано с формированием сетчатой структуры. Наблюдается значительное снижение ударной вязкости при 12-25% А или при 1,8-2,2% Mn, что соответствует максимальной степени мартенситного превращения в сплавах. Максимальной износостойкостью обладают сплавы, в структуре которых содержится 20-35% А. В целом можно сделать вывод, что с увеличением количества углерода повышается износостойкость чугуна, но при этом снижается ударная вязкость. Поэтому для обеспечения достаточной износостойкости отливок при повышенной ударной вязкости рекомендуется малоуглеродистый комплексно-легированный белый чугун (2,2% С, 4,2% Mn, 6,5% хрома, 6,9% V, 0,58% Si).

## Литература

1. Печенкина Л.С. Разработка износостойких самозакаливающихся сплавов для тонкостенных точнолитых деталей: Дис. канд. техн. наук: 05.16.01 : защищена 20.06.2000 : утв. 12.12.2000 / Л.С. Печенкина– Курск, 2000. – 193 с.
2. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства/ И.И. Цыпин.– М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
3. Печенкина Л.С. Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов/ Л.С. Печенкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т.13. - № 3. – С.134-138.
4. Гарбер М.Е. Износостойкие белые чугуны: свойства, структура, технология, эксплуатация/ М.Е. Гарбер. – М.: Машиностроение, 2010. – 112 с.

Воронежский государственный технический университет

## COMPOSITION OPTIMIZATION OF SELF-HARDENING CAST-IRON

L.S. Pechenkina

PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: pls-7@mail.ru

Details of the excavators are subjected to intensive abrasive wear. For such operating conditions, it is optimal to use complex-alloyed white cast irons. White cast iron with special eutectics, which have become the object of the study, has increased wear resistance and mechanical properties. A composite structure is obtained due to the arrangement of phases. The combination of a soft metal matrix in the structure of the alloys and solid hardening inclusions of the phases gives these alloys the properties of anti-friction and wear resistance. Investigations of the wear resistance of complex-alloyed white cast iron

from the structure of the metal substrate have shown how important it is to provide a martensitic or martensitic-austenite structure of the base in the castings of parts of excavators subjected to intensive wear, and in many cases also to large dynamic loads.

The aim of the study is to obtain the required structure in cast iron foundings capable of obtaining a martensitic (or martensitic-austenitic) structure of the metal substrate and a high hardness directly in the cast state without hardening heat treatment (air-hardening white cast irons), by optimizing the chemical composition.

For the selection of the optimal composition of cast iron, a series of melting was carried out. The structure and properties of the air-hardening white cast irons are investigated. It has been scientifically justified and experimentally determined: with martensitic structure of the matrix and high hardness ( $HRC_e$  60-63), the parts are characterized by high wear resistance ( $K_i \approx 6$ ), however the castings are often affected by microcracks. On the experimental production of the bushings of the hydraulic distributor of the excavator, the optimum chemical composition of self-hardening white iron was found, in which these defects in the castings are excluded. It is established that alloys with a structure of 20-35% of austenite have maximum wear resistance. In general, it can be concluded that as the amount of carbon increases, the wear resistance of cast iron increases, but the impact elasticity decreases. Therefore, to ensure sufficient wear resistance of castings with increased impact elasticity, low-carbon complex-alloyed white iron is recommended, containing 2.3% of carbon, 4.2% of manganese, 6.5% of chromium

Key words: air-hardening white cast iron, austenite, impact elasticity, alloying, wear resistance

### References

1. Pechenkina L.S. Development of wear-resistant self-hardening alloys for thin-walled precision parts: Dis. Cand. Tech. Sciences: 05.16.01: it is protected 20.06.2000: it is approved. 12.12.2000 ("Razrabotka iznosostojkih samozakalivajushhihsja splavov dlja tonkostennyh tochnolityh detalej: Dis. kand. tehn. nauk: 05.16.01 : zashhishhena 20.06.2000 : utv. 12.12.2000"), Kursk, 2000, 193 p.
2. Tsypin I.I. "White wear-resistant cast iron. Structure and properties" ("Belye iznosostojkie chuguny. Struktura i svojstva"), Moscow, Metallurgy, 1983, 176 p.
3. Pechenkina L.S. "The Influence of content of core components on hardness of low carbon white cast irons", *Bulletin of Voronezh state technical University*, vol. 13, no. 6, 2017, pp.13-17.
4. Garber M.E. "Wear-resistant white cast irons-properties, structure, technology, and operation" ("Iznosostojkie belye chuguny: svojstva, struktura, tehnologija, jekspluatacija"), Moscow, Mashinostroenie, 2010, 112 p.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА БЕСКИСЛОРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

© 2017 Т.В. Трегубова, О.В. Стогней, И.М.Трегубов, В.В. Кирпан, К.Г. Королев

Исследованы электрические и магниторезистивные свойства тонких пленок  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в широком интервале концентрации металлической фазы ( $14 \leq x, \text{ ат.}\% \leq 62$ ) в исходном состоянии и после термических отжигов в вакууме. Установлено, что порог перколяции для системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  соответствует интервалу 30-36 ат. % Co. Исследован характер изменения магниторезистивного эффекта композитов при термическом воздействии в зависимости от концентрации металлической фазы. Магниторезистивный эффект исследуемых образцов в исходном состоянии достигает 7 % в поле 10 кЭ при концентрации кобальта равной 25 ат. %. Проведенный нагрев меняет величину магниторезистивного эффекта. В композитах, расположенных до порога протекания, величина магнитосопротивления увеличивается, в то время как в композитах, расположенных за порогом - снижается. Установлено, что матрица системы устойчива к воздействию термического нагрева до 250° С, однако дальнейшей нагрев до 350°С приводит к изменениям свойств системы – магниторезистивный эффект практически утрачивается. Термический отжиг при 350 °С приводит к увеличению среднего размера кобальтовых гранул, что сказывается как на магниторезистивном эффекте, так и на величине электросопротивления

Ключевые слова: тонкопленочные нанокompозиты, магниторезистивный эффект, термический отжиг

### Введение

Одним из наиболее характерных свойств наногранулированных композитов ферромагнитный металл-диэлектрик является туннельное магнитосопротивление (TMR) [1, 2]. Высокие значения TMR проявляют системы на основе кобальта [3]: в композитах Co-Al-O магнитосопротивление достигает – 7-8 % [3], а в отдельных случаях 10 % [4]. Однако несмотря на высокие значения TMR, наблюдаемые в композитах, наличие оксидной матрицы приводит к некоторым нежелательным явлениям. В частности, при получении и последующем хранении композитов происходит окисление металлической фазы, что влияет на свойства формируемых структур, как правило, ухудшая их.

Целью работы было получение двухфазного нанокompозита металл-диэлектрик на основе кобальта и бескислородной матрицы, способного проявлять высокие значения магниторезистивного эффекта и сохранять эти значения при термическом воздействии.

### Методика

В ходе работы проведен синтез композиционных образцов на основе кобальта с мат-

рицей из фторида магния. Фторид магния выбран в качестве диэлектрической фазы, поскольку формирование  $\text{MgF}_2$  значительно более энергетически выгодно, чем образование  $\text{CoF}_2$ , что гарантировало получение композитной структуры. Все образцы были получены ионно-лучевым распылением составной мишени, изготовленной из кобальтовой основы и навесок  $\text{MgF}_2$ , несимметрично расположенных на поверхности мишени [5]. Напыление образцов проводили на стеклянные и ситалловые подложки.

Элементный состав композитов определялся при помощи электронно-зондового энерго-дисперсионного микроанализа. Измерения проводились на сканирующем рентгеновском микроанализаторе JXA-840 с погрешностью не превышающей 1,5 % от содержания измеряемого элемента. Толщина полученных образцов контролировалась с помощью интерферометра МИИ-4. Для проведения фазового анализа образцов был использован дифрактометр BRUKER D2 Phaser.

Исследование магниторезистивного эффекта осуществлялось непосредственным измерением электросопротивления образцов при изменении внешнего магнитного поля. Измерение сопротивления образцов проводилось потенциометрическим методом по двух-зондовой схеме на постоянном токе. Погрешность измерения электросопротивления не превышала 0,1% [5]. Отжиги образцов проводились в вакууме с остаточным давлением не хуже чем  $10^{-3}$  Торр.

Трегубова Татьяна Викторовна – ВГТУ, аспирант, e-mail: ttv1507@ya.ru

Стогней Олег Владимирович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sto@sci.vtn.ru

Трегубов Илья Михайлович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ilia.tregubov@mail.ru

Кирпан Вероника Валерьевна – ВГТУ, студент, e-mail: kirpanVV@mail.ru

Королев Константин Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: korolevKG@mail.ru

## Результаты

В результате напыления были получены мелкодисперсные тонкопленочные образцы системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ . Толщина исследуемых пленок составляла 1–3 мкм в зависимости от состава.

Энерго-дисперсионный анализ выявил, что состав полученных образцов плавно меняется: процент металлической фазы (Co) растет от 14 до 62 ат. %.

Анализ дифрактограмм, полученных от исходных образцов на стеклянных подложках, свидетельствует о наличии двухфазной (композитной) структуры для всех полученных составов. На дифрактограммах присутствуют пики, соответствующие двум фазам: фторида магния (II) и кобальта. Как видно из рис.1, на дифрактограммах, соответствующих меньшей концентрации металла, наблюдаются пики, соответствующие только фазе  $\text{MgF}_2$ . По мере увеличения концентрации металла на соответствующих дифрактограммах заметно уменьшается интенсивность пиков от диэлектрической составляющей и становятся более выраженными пики от кристаллического Co с гексагональной структурой.

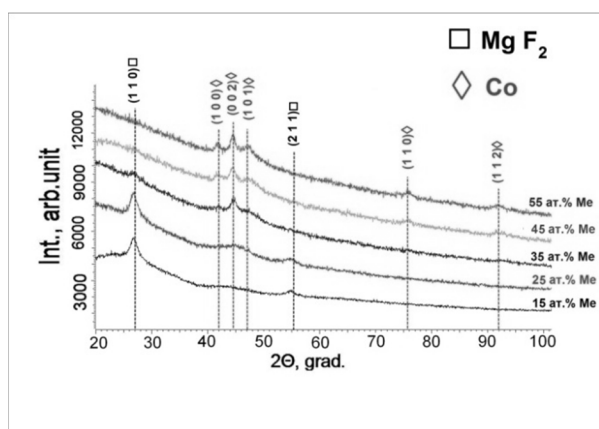


Рис. 1. Дифрактограммы образцов системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)$  с разной концентрацией металлической фазы. Концентрация кобальта (ат. %) указана вдоль кривых

Концентрационная зависимость удельного сопротивления композитов  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в исходном состоянии типична для композитных систем металл – диэлектрик (рис. 2) [5].

Наблюдаются три участка, отличающиеся друг от друга углом наклона. Второй участок отличается резким уменьшением сопротивления на фоне сравнительно небольшого изменения концентрации Co. Таким образом, можно заключить, что эта область концентрационной зависимости соответствует порогу перколяции [6].

Оценка концентрационного положения порога протекания для системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$ , соответствует интервалу 30–36 ат. % Co (рис. 2).

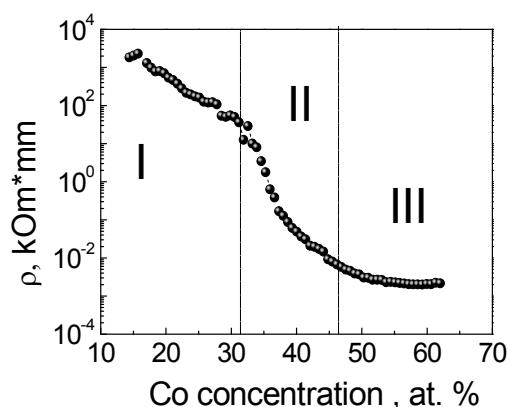


Рис. 2. Концентрационная зависимость электрического сопротивления образцов системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Образцы, расположенные до и на пороге перколяции, проявляют магниторезистивный эффект, который в поле 5 кЭ составляет 4–6 %. Увеличение внешнего поля до 10 кЭ позволяет достигнуть более высоких значений (7 %), однако следует учесть, что даже в этих полях полного насыщения эффекта не достигается (рис. 3, вставка). Наличие магниторезистивного эффекта свидетельствует о гетерогенности исследуемых образцов и подтверждает их наногранулированную морфологию.

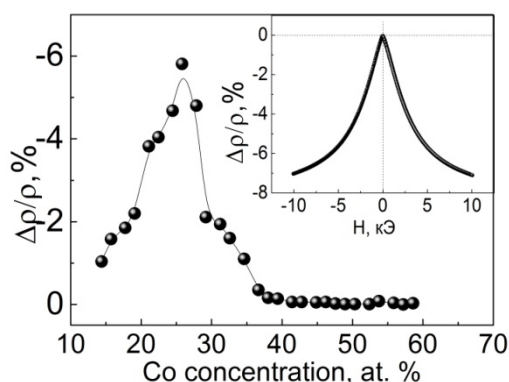


Рис. 3. Концентрационная зависимость магниторезистивного эффекта системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в исходном состоянии. Измерения проводились в поле 5 кЭ. На вставке – полявая зависимость для образца  $\text{Co}_{25}(\text{MgF}_2)_{75}$

Наногранулированные композиты, полученные методом напыления, имеют неравновесную структуру, поэтому термическое воздействие должно изменять физические свойства материала. Для определения термической стабильности композитов проведено исследование темпера-

турной зависимости электрического сопротивления образцов с разной концентрацией металлической фазы (см. рис. 4). Как следует из представленных данных, нагрев образцов до температуры 250 °С по-разному влияет на их электрическое сопротивление. Сопротивление образцов с концентрацией, соответствующей допороговому интервалу, увеличивается при увеличении температуры и после их охлаждения оказывается выше, чем в исходном состоянии (например,  $\text{Co}_{24}(\text{MgF})_{76}$ ). В образцах с более высокой концентрацией кобальта (31 ат.% Co и выше) сопротивление при нагреве начинает снижаться и после охлаждения оказывается ниже, чем в исходном состоянии (см. рис. 4).

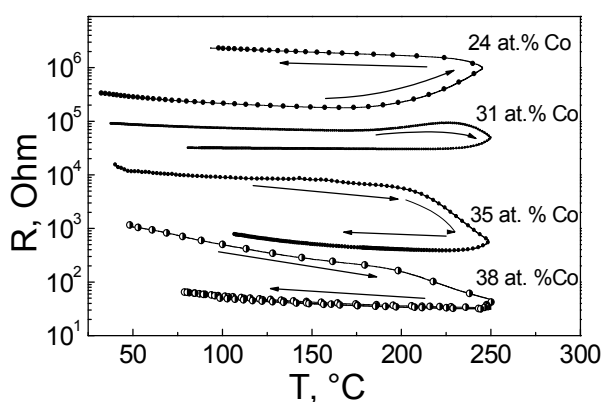


Рис. 4. Температурные зависимости сопротивления системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$

Также анализ полученных данных свидетельствует о том, что вплоть до 200 °С в композитах не происходит никаких структурных изменений. Это следует из того, что сопротивление образцов меняется в этом температурном интервале практически линейно, без каких-либо аномалий.

Более существенным доводом в пользу того, что структура композитов не претерпевает никаких изменений в этом интервале, является отсутствие изменения значений магниторезистивного эффекта (рис. 5). Отжиг, проведенный при 180 °С, не привел ни к каким изменениям значений TMR. Данный факт свидетельствует об устойчивости как диэлектрической матрицы образцов, так и композитной структуры в целом. Неизменность значений TMR также может свидетельствовать о низком уровне дефектности фторидной матрицы (в противном случае, при отжиге должно происходить уменьшение концентрации дефектов и, как следствие, возрастание значений MR [7], чего не наблюдается в эксперименте).

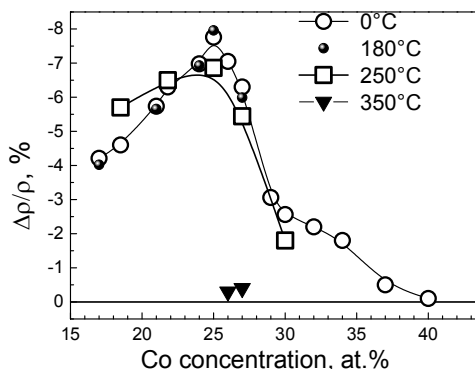


Рис. 5. Концентрационные зависимости магниторезистивного эффекта системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в исходном состоянии и после нагрева. Магнитосопротивление измерялось в поле 10 кЭ

Нагрев образцов до 200 – 210 °С инициирует начало структурных изменений, результатом которых становится существенное изменение сопротивления (при комнатной температуре сопротивление образцов в исходном состоянии и после нагрева до 250 °С различается почти на порядок, см. рис. 4). Более того, проведенный нагрев меняет величину магниторезистивного эффекта. Изменение TMR носит систематический характер: в композитах, расположенных до порога протекания, величина TMR увеличивается, в то время как в композитах, расположенных за порогом, она снижается (см. рис. 5). Подобная реакция композитов на термическое воздействие наблюдалась ранее в композитах на оксидной основе ( $\text{CoFeB-SiO}_2$ ) [8]. Магнитосопротивление композитов, находящихся за порогом перколяции, уменьшалось после отжига, а в доперколяционных композитах, напротив, увеличивалось.

Увеличение температуры нагрева до 350 °С приводит к более существенному изменению сопротивления композитов. В доперколяционной области электросопротивление композитов возрастает на несколько порядков, достигая значений сотен МОм, что не позволяет проводить потенциометрические измерения. В композитах, расположенных за порогом перколяции, сопротивление резко снижается, причем знак температурного коэффициента электросопротивления меняется с отрицательного на положительный, что характерно для металлического типа проводимости. Такие значительные изменения сопротивления свидетельствуют либо о наличии межфазного взаимодействия, либо о значительных изменениях свойств самих фаз при условии сохранения гетерогенности образцов.

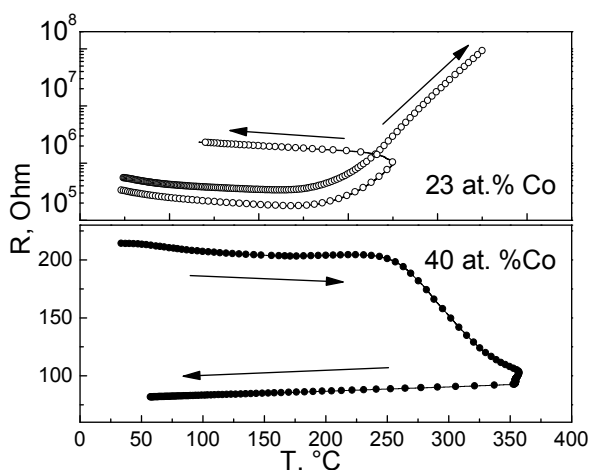


Рис. 6. Температурные зависимости электрического сопротивления образцов  $\text{Co}_{23}(\text{MgF}_2)_{77}$  (а) и  $\text{Co}_{40}(\text{MgF}_2)_{60}$  (б)

Для обнаружения возможных изменений структуры композитов при термических воздействиях были проведены рентгеноструктурные исследования образцов, отожженных при  $350^\circ\text{C}$  в течение 10 мин. На рис. 7 показаны дифрактограммы образцов в исходном состоянии и после отжига при  $350^\circ\text{C}$ . Очевидно, что воздействие температуры не влияет на форму дифрактограмм: наблюдается только увеличение интенсивности пиков и изменение их формы. В результате отжигов интенсивность всех дифракционных пиков стала выше, а ширина - меньше, что указывает на увеличение размеров областей когерентного рассеяния.

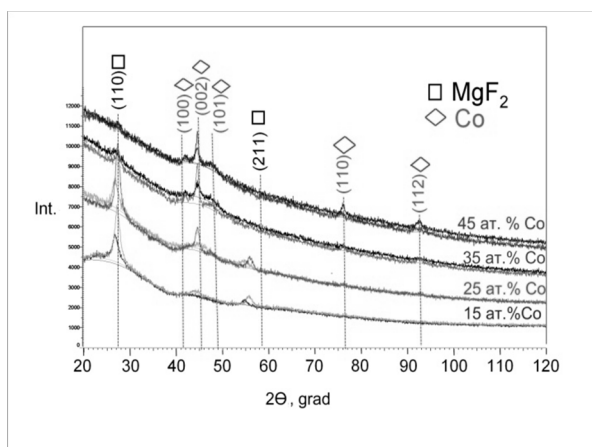


Рис. 7. Дифрактограммы образцов системы  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  в исходном состоянии и после отжига при  $T = 350^\circ\text{C}$  с разной концентрацией металлической фазы. Концентрация кобальта (ат.%) указана у кривых

Используя метод Шеррера, который учитывает полуширину дифракционного максимума, длину волны источника, а также угол дифракции Брэгга, для кобальтовой фазы были рассчитаны значения областей когерентного рассеяния ( $L$ ). Представляется

вполне разумным предположить, что областями когерентного рассеяния в металлической фазе являются наногранулы кобальта. Результаты расчетов представлены в таблице

Размер областей когерентного рассеяния в металлической фазе для исходного состояния и после отжига.

| Композит                            | $L$ , нм           |                                      |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
|                                     | Исходное состояние | После отжига $T = 350^\circ\text{C}$ |
| $\text{Co}_{25}(\text{MgF}_2)_{75}$ | 4,5                | 10,6                                 |
| $\text{Co}_{35}(\text{MgF}_2)_{65}$ | 8,5                | 13,3                                 |
| $\text{Co}_{45}(\text{MgF}_2)_{55}$ | 11,3               | 15,6                                 |

Из анализа полученных данных (см. таблицу) следует, что отжики приводят к росту среднего размера гранул кобальта, причем для композита, расположенного на пороге перколяции, увеличение (согласно расчетам) достигает более 100 %. Такое увеличение размеров металлических гранул объясняет снижение магниторезистивного эффекта практически до нуля в композитах, расположенных за порогом перколяции после их нагрева до  $350^\circ\text{C}$  (рис. 5). Действительно, при увеличении размера металлических гранул (и уменьшения, соответственно, ширины диэлектрического барьера) между ними возможно возникновение взаимодействия, приводящего к формированию больших магнитных доменов (магнитных кластеров). В пределах такого домена магнитные моменты отдельных гранул являются скоррелированными независимо от наличия или отсутствия внешнего магнитного поля. Следовательно, эта локальная область композита не вносит вклада в формирование магниторезистивного эффекта (проводимость через такой домен не зависит от магнитного поля). Второй причиной уменьшения TMR после отжига является образование электрических перколяционных кластеров, внутри которых проводимость осуществляется за счёт обычной металлической проводимости и туннелирования не происходит. Образование перколяционных кластеров и изменение механизма электропереноса подтверждается зависимостями  $R(T)$  композитов, расположенных за порогом перколяции (рис. 6).

В доперколяционных композитах ситуация иная – в результате отжигов их сопротивление выросло до таких высоких значений, что это не позволяло корректно определить величину TMR эффекта. Возможным объяснением этого факта



является значительное уменьшение степени дефектности диэлектрической матрицы в результате отжига. Известно, что в композитах помимо непосредственного туннелирования электронов между гранулами существует прыжковая проводимость по дефектам диэлектрической матрицы [9]. В нашем случае такими дефектами являются оборванные связи атомов магния и растворенные во фториде атомы кобальта. В процессе отжига атомы кобальта диффундируют к гранулам, увеличивая их размер, а оборванные связи магния могут связываться кислородом, содержащимся в остаточном газе вакуумной камеры. В результате этих процессов должен происходить рост электросопротивления композитов, что и наблюдается в наших экспериментах (рис. 6). Также результатом этих процессов должен быть рост магниторезистивного эффекта. Следует отметить, что нагрев доперколяционных композитов до более низкой температуры (250 °, рис. 4, рис.5) приводит именно к такому результату: рост сопротивления и рост магниторезистивного эффекта.

### Выводы

Установлено, что в процессе совместного ионно-лучевого распыления кобальта и фторида магния и последующего осаждения выбитых атомов на подложку происходит формирование гранулированной двухфазной композитной структуры Co-MgF<sub>2</sub>.

Экспериментальным путем зафиксировано, что в исследованных тонкопленочных композитах Co<sub>x</sub>(MgF)<sub>100-x</sub> концентрационный порог перколяции соответствует интервалу 30-36 ат. % Co.

Установлено, что композиты системы Co<sub>x</sub>(MgF)<sub>100-x</sub> проявляют туннельное магнитосопротивление, которое достигает 7 % в поле 10 кЭ при концентрации кобальта равной 25 ат. %.

Установлено, что высокотемпературное воздействие в вакууме на образцы композитов системы Co<sub>x</sub>(MgF)<sub>100-x</sub> практически не меняет величину магниторезистивного эффекта вплоть до 250 °C.

Показано, что термический отжиг при 350 °C приводит к увеличению среднего размера кобальтовых гранул в полтора – два раза, что радикально сказывается как на магниторезистивном эффекте, так и на величине электросопротивления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010г. №218 (Договор № 03.G25.31.0246).*

### Литература

1. Structural and electrical properties of granular metal films / B. Abeles, P. Sheng, M.D. Coutts, Y. Arie // *Advances in Physics*. - 1975. - V.24. - P.407-461.
2. Helman J.S. Tunneling of Spin-Polarized Electrons and Magnetoresistance in Granular Ni Films / J.S. Helman, B. Abeles // *Phys. Rev. Lett.*-1976.-V.37. - N.21.-P.1429-1433.
3. Berkowitz A.E. Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys / A.E. Berkowitz, J.R. Mitchell, M.J. Carey // *Phys.Rev.Lett.*-1992.-V.68.-P.3745-3748
4. Yakushiji K. Composition dependence of particle size distribution and giant magnetoresistance in Co-Al-O granular films / K. Yakushiji, S. Mitani, K. Takanashi // *JMMM*.-2000.-V.212.-P.75-81.
5. Калинин Ю.Е. Физические свойства нанокompозитов металл-диэлектрик с аморфной структурой / Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // *Альтернативная энергетика и экология*. - 2007. - №10. - С.9-21
6. Транспортные и магнитные явления в наногетерогенных структурах / А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2015. - № 20(184).- С.53-73.
7. Mitani S. Temperature dependence of tunnel-type GMR in insulating granular systems / S. Mitani, H. Fujimori, S. Ohnuma // *JMMM*.-1998.-V.177-181. - P. 919-920.
8. Change of the electrical properties of the granular CoFeB-SiO nanocomposites after heat treatment / O.V. Stogney, V.A. Slyusarev, Yu.E. Kalinin et al // *Microelectronics Engineering*. - 2003. - V.69. - N.2-4.- P.476-479.
9. Авдеев С.Ф. Особенности электрических и магниторезистивных свойств нанокompозитов Co<sub>x</sub>(CaF)<sub>100-x</sub> и Co<sub>x</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub> / С.Ф. Авдеев, О.В. Стогней, А.В.Ситников // *ФТТ*. – 2007. – Т. 49. - № 1. – С. 158 – 164

Воронежский государственный технический университет

## ELECTRICAL AND MAGNETIC-RESISTANCE PROPERTIES OF Co<sub>x</sub>(MgF<sub>2</sub>)<sub>100-x</sub> ANOXIC COMPOSITES T.V. Tregubova<sup>1</sup>, O.V. Stogney<sup>2</sup>, I.M. Tregubov<sup>3</sup>, V.V. Kirpan<sup>4</sup>, K.G. Korolev<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: [ttv1507@ya.ru](mailto:ttv1507@ya.ru)



<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: sto@sci.vrn.ru

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: ilia.tregybov@mail.ru

<sup>4</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: kirpanVV@mail.ru

<sup>5</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: korolevKG@mail.ru

The electrical and magnetoresistive properties of thin films of  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  in a wide range of the concentration of the metallic phase ( $14 \leq x$ , at.%  $\leq 62$ ) in the initial state and after thermal annealing in vacuum are studied. It was found that the percolation threshold for a  $\text{Co}_x(\text{MgF}_2)_{100-x}$  system corresponds to the interval of 30-36 at.% Co. The character of the change in the magnetoresistive effect of composites under thermal action as a function of the concentration of the metallic phase is investigated. The magnetoresistive effect of the samples under study in the initial state reaches 7% in epy field of 10 kOe at cobalt concentration of 25 at. %. The conducted heating changes the magnitude of the magnetoresistive effect. In composites located before the percolation threshold, the magnetoresistance increases, while in composites located after the threshold it decreases. It is established that the matrix of the system is resistant to the effect of thermal heating to 250 °C, but further heating to 350 °C leads to changes in the properties of the system - the magnetoresistive effect is practically lost. Thermal annealing at 350 °C leads to an increase in the average size of cobalt granules, which affects both the magnetoresistive effect and the magnitude of the electrical resistivity

Key words: thin-film nanocomposite, magneto-resistive effect, thermal annealing

### References

1. Abeles B., Sheng P., Coutts M.D., Arie Y. "Structural and electrical properties of granular metal films", *Advances in Physics*, 1975, vol. 24, pp. 407-461.
2. Helman J.S., Abeles B. "Tunneling of Spin-Polarized Electrons and Magnetoresistance in Granular Ni Films", *Phys. Rev. Lett.*, 1976, vol. 37, no 21, pp.1429-1433.
3. Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Carey M.J. "Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys", *Phys.Rev.Lett.*, 1992, - vol. 68, - pp. 3745-3748
4. Yakushiji K., Mitani S., Takanashi K. "Composition dependence of particle size distribution and giant magnetoresistance in Co-Al-O granular films", *JMMM*, 2000, vol. 212, pp.75-81.
5. Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stogney O. "The physical properties of the nanocomposite metal-insulator with an amorphous structure", *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2007, no 10, pp.9-21
6. Granovskiy A.B. Kalinin Y.E., Sitnikov A.V., Stogney O.V. "The physical properties of the nanocomposite metal-insulator with an amorphous structure", *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2015, no 20(184), pp.53-73.
7. Mitani S. Fujimori H., Ohnuma S. "Temperature dependence of tunnel-type GMR in insulating granular systems", *JMMM*, 1998, vol. 177-181, pp. 919-920.
8. Stognei O.V., Slyusarev V.A., Kalinin Yu.E. et al. "Change of the electrical properties of the granular CoFeB-SiO nanocomposites after heat treatment", *Microelectronics Engineering*, 2003, vol. 69, no. 2-4, pp.476-479.
9. Avdeev S.F., Stognej O.V., Sitnicov A.V. "Features of electrical and magnetoresistive properties of nanocomposites  $\text{Co}_x(\text{CaF})_{100-x}$  and  $\text{Co}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ ", *SSF*, 2007, vol. 49, no 1, pp. 158 – 164

## СТАТИСТИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Re-Tb

© 2017 А.В. Бондарев, И.Л. Батаронов, И.М. Пашуева

Методом молекулярной динамики построены компьютерные модели атомной структуры аморфных сплавов системы Re-Tb в широком интервале концентраций. Межатомное взаимодействие описывалось эмпирическим полиномиальным потенциалом. Функции радиального распределения, рассчитанные для моделей, находятся в хорошем согласии с результатами рентгенодифракционного эксперимента.

Локальное атомное окружение исследовалось с помощью многогранников Вороного. Рассчитаны распределения многогранников Вороного по топологическим индексам. Среди многогранников, построенных вокруг атомов рения, значительную долю составляют многогранники с топологическим индексом 0–0–12–0, характерные для локального икосаэдрического окружения. Построена зависимость доли многогранников Вороного 0–0–12–0, характеризующих икосаэдрический ближний порядок, среди многогранников, построенных вокруг атомов рения, от концентрации атомов тербия. Эта зависимость является нелинейно возрастающей. Рассчитаны распределения многогранников Вороного по числу граней и граней по числу сторон. Изучена зависимость указанных распределений от состава сплава. Рассчитаны средние значения числа граней, определяющие геометрическое координационное число, и среднее число сторон граней многогранников Вороного. С ростом концентрации атомов Tb для многогранников Вороного, построенных как вокруг атомов Re, так и вокруг атомов Tb, среднее число граней и среднее число сторон граней многогранников Вороного линейно уменьшаются

Ключевые слова: аморфные сплавы, рений, тербий, многогранники Вороного, икосаэдры

### Введение

Значительный научный интерес, проявляемый к аморфным металлическим сплавам, обусловлен их уникальным комплексом физико-химических свойств. Для лучшего понимания этих свойств и разработки теорий аморфного состояния необходимо исследование атомной структуры аморфных сплавов (АС). Атомная структура АС обычно исследуется экспериментально методами дифракции рентгеновских лучей, нейтронов и электронов. Однако эти методы позволяют получить лишь усредненную информацию о структуре (функции радиального распределения и параметры ближнего порядка). Поэтому в последнее время широкое распространение получили методы компьютерного моделирования атомной структуры АС [1]. В частности, мощным средством изучения локального атомного окружения в некристаллических веществах является анализ многогранников Вороного [2, 3].

### Методика компьютерного моделирования

Методом молекулярной динамики были построены компьютерные модели атомной структуры АС системы  $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$  ( $x=18-89$

ат. %). В качестве начальной конфигурации выбиралось случайное расположение 10000 атомов двух сортов в кубической ячейке с периодическими граничными условиями. Межатомное взаимодействие описывалось эмпирическим полиномиальным потенциалом [4]. Парные функции радиального распределения  $g(r)$  и параметры топологического ближнего порядка, рассчитанные для моделей, находятся в хорошем согласии с результатами рентгенодифракционного эксперимента [5, 6].

Многогранники Вороного строились как области пространства, все точки которых ближе к центру данного атома, чем к центру любого другого атома системы [2]. Центр каждого атома соединялся отрезками прямых со своими 30 ближайшими соседями, через середины этих отрезков проводились перпендикулярные плоскости, каждая из которых делит пространство на два полупространства. Искомый многогранник Вороного находится как пересечение всех полупространств, содержащих центр данного атома.

### Результаты компьютерного моделирования

Для моделей АС  $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$  ( $x = 18, 36, 53, 71, 89$  ат. %) построены многогранники Вороного трех типов: общие и “парциальные”, построенные вокруг атомов рения и вокруг атомов тербия, после чего исследовались их топологические характеристики. В дальнейшем будем проводить анализ только “парциальных” МВ с целью выявить сходства и различия локального окружения атомов рения и тербия, т.к.

---

Бондарев Алексей Владимирович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: bondarev\_a\_v@mail.ru  
Батаронов Игорь Леонидович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: ibat@mail.ru  
Пашуева Ирина Михайловна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vapushka@yandex.ru

в данных сплавах атомные диаметры компонентов значительно различаются:  $d_{\text{Re}} = 0,274$  нм,  $d_{\text{Tb}} = 0,354$  нм.

Рассчитаны распределение МВ по топологическим индексам  $n_3-n_4-n_5-n_6$ , где  $n_3$  – число треугольных граней,  $n_4$  – число четырехугольных граней и т.д. (рис. 1–3). На рисунках представлены только те типы МВ, доля которых превышает 2 % от общего числа многогранников. Общее же количество различных типов МВ в построенных моделях составляет несколько сотен.

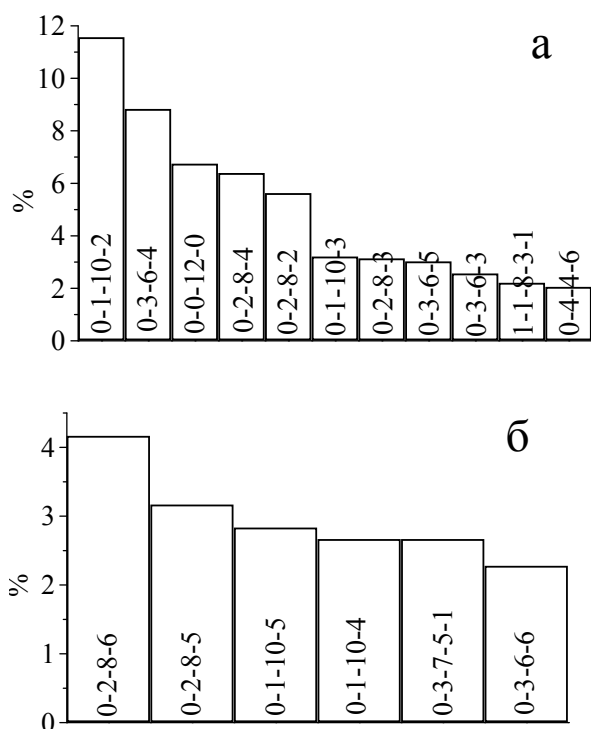


Рис. 1. Распределение наиболее часто встречающихся типов многогранников Вороного для модели AC Re<sub>82</sub>Tb<sub>18</sub>: а – для МВ, построенных вокруг атомов Re; б – для МВ, построенных вокруг атомов Tb

Среди МВ, построенных вокруг атомов рения, значительную долю (от 6,7 до 28,6 %) составляют МВ с топологическим индексом 0–0–12–0 (пентагональные додекаэдры), характерные для локального икосаэдрического окружения, а также МВ с индексами 0-1-10-2, 0-1-10-3, 0-2-8-2 и 0-2-8-4, которые получаются небольшой модификацией додекаэдра 0-0-12-0. Например, индекс 0-1-10-2 получается заменой одного ребра додекаэдра новой гранью, которая сама будет четырёхугольной и превратит две смежные пятиугольные грани додекаэдра в шестиугольники [2].

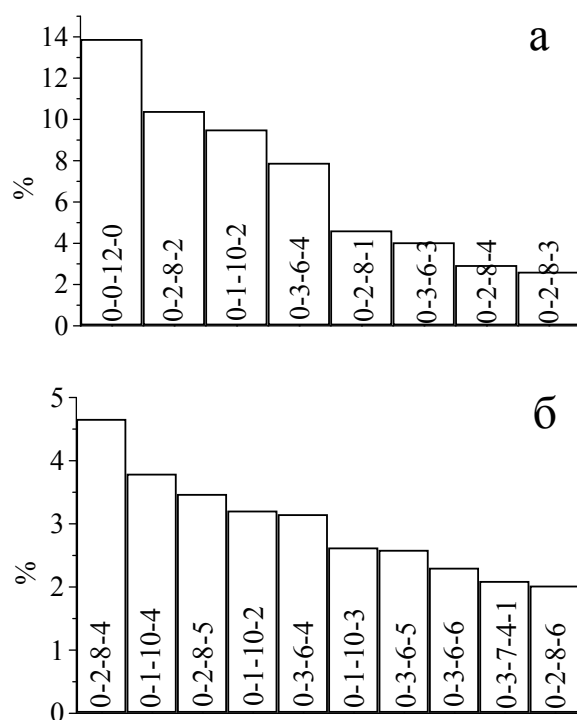


Рис. 2. Распределение наиболее часто встречающихся типов многогранников Вороного для модели AC Re<sub>47</sub>Tb<sub>53</sub>: а – для МВ, построенных вокруг атомов Re; б – для МВ, построенных вокруг атомов Tb

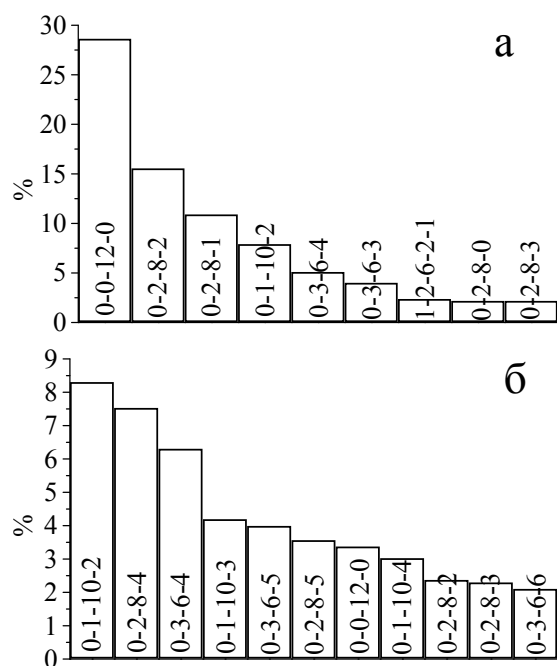


Рис. 3. Распределение наиболее часто встречающихся типов многогранников Вороного для модели AC Re<sub>11</sub>Tb<sub>89</sub>: а – для МВ, построенных вокруг атомов Re; б – для МВ, построенных вокруг атомов Tb

Указанные МВ соответствуют локальным координационным многогранникам, представляющим собой тем или иным образом искаженные икосаэдры. Таким образом, в AC

Re-Tb для атомов меньшего диаметра (рения) преобладает локальное икосаэдрическое окружение. На рис. 4 приведена зависимость доли МВ 0-0-12-0 (характеризующих икосаэдрический ближний порядок) среди МВ, построенных вокруг атомов рения, от концентрации атомов тербия в АС Re-Tb.

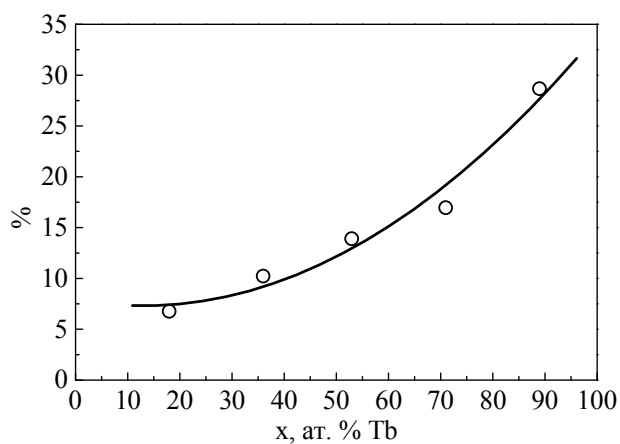


Рис. 4. Доля многогранников 0-0-12-0 среди многогранников Вороного, построенных вокруг атомов Re, в зависимости от состава АС  $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$

Эта зависимость является нелинейно возрастающей. С увеличением концентрации атомов тербия среднее координационное число атомов рения приближается к 12 (см. таблицу), что и приводит к увеличению доли МВ с 12 гранями, наиболее энергетически выгодным из которых является многогранник 0-0-12-0.

Среди МВ, построенных вокруг атомов тербия, многогранники с топологическим индексом 0-0-12-0 составляют очень незначительную часть. Наиболее часто встречаются МВ 0-2-8-4, 0-1-10-2, 0-3-6-4, 0-3-6-5, 0-2-8-5, 0-2-8-6, 0-1-10-4. Однако ни один из типов МВ не является явно преобладающим, частота каждого МВ для всех составов не превышает 9 %. Отсутствие икосаэдрического ближнего порядка вокруг атомов Tb можно объяснить тем, что атомы большего диаметра (тербия) в сплаве окружены как атомами того же сорта, так и атомами меньшего диаметра (рения), вследствие чего атомы Tb имеют в среднем по 14–16 соседей (см. таблицу), что приводит к преобладанию других координационных многогранников, отличных от икосаэдров.

Рассчитаны распределения МВ по числу граней  $n_F(F)$  (рис. 5) и граней по числу сторон  $n_S(S)$  (рис. 6).

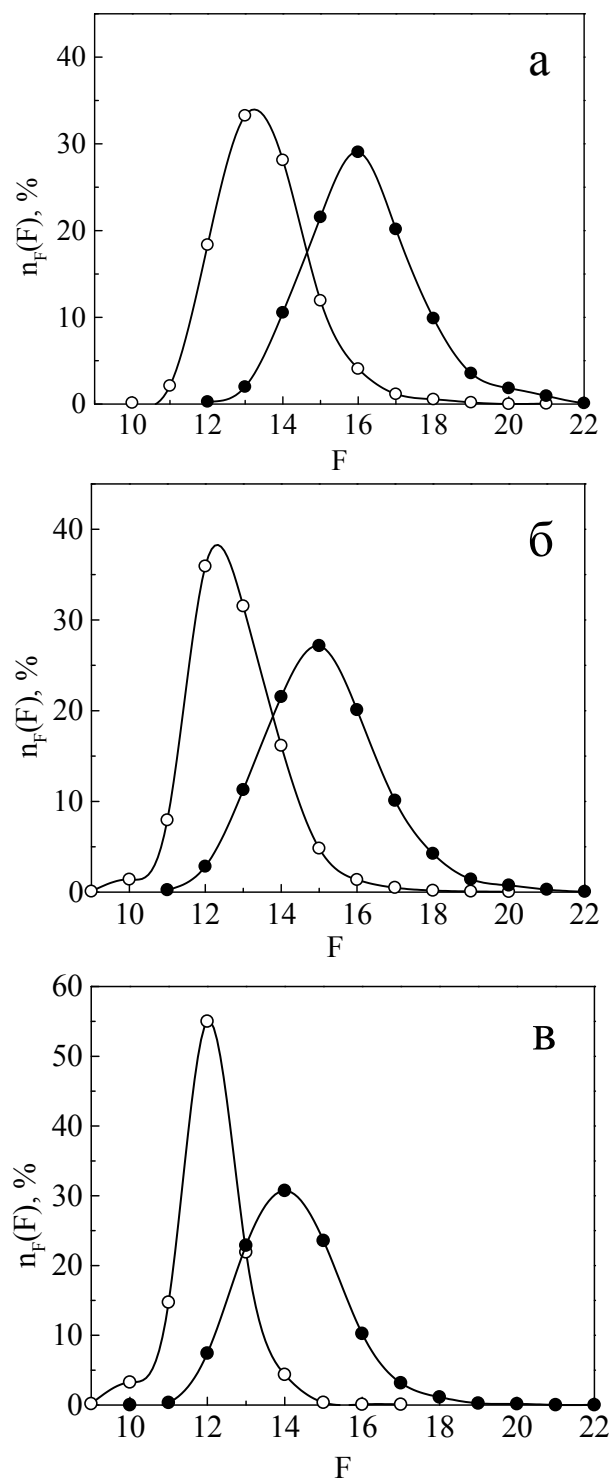


Рис. 5. Распределения многогранников Вороного по числу граней для моделей АС  $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$ : а –  $x = 18$ , б –  $x = 53$ , в –  $x = 81$  ат. % Tb. Белые кружки соответствуют многогранникам, построенным вокруг атомов Re, черные кружки – вокруг атомов Tb

Для сплавов всех составов распределения МВ по числу граней имеют почти симметричную форму. При приближении к середине концентрационного интервала распределение многогранников по числу граней и граней по числу сторон качественно не изменяется, а

общее количество типов многогранников Вороного увеличивается.

Последнее объясняется увеличением топологического беспорядка в расположении атомов и коррелирует с увеличением среднеквадратического отклонения положений атомов в первой координационной сфере.

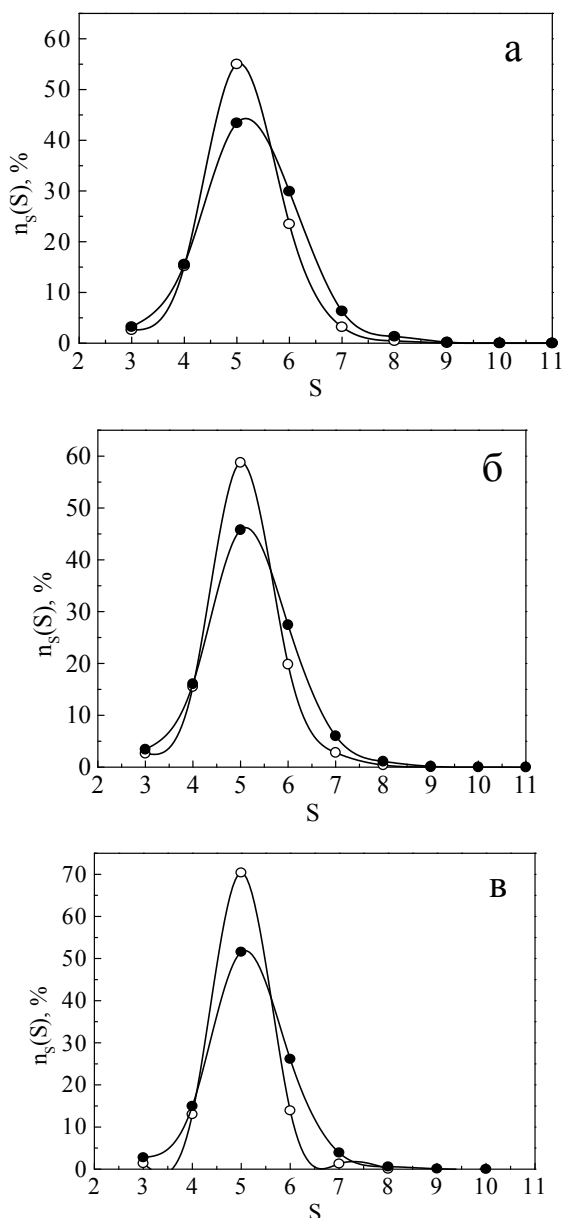


Рис. 6. Распределение граней многогранников Вороного по числу сторон для моделей АС  $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$ : а –  $x = 18$ , б –  $x = 53$ , в –  $x = 81$  ат. % Tb. Белые кружки соответствуют многогранникам Вороного, построенным вокруг атомов Re, черные кружки – вокруг атомов Tb

Распределения граней МВ по числу сторон типичны для аморфных систем. В частности, повышенная доля пятиугольных граней и малое число треугольных граней есть устойчивое свойство аморфной фазы [2].

В таблице приведены средние значения числа граней МВ  $\langle F \rangle$ , определяющие геометрическое координационное число, и среднее число сторон граней МВ  $\langle S \rangle$ . Из таблицы видно, что с ростом концентрации атомов тербия для МВ, построенных как вокруг атомов рения, так и вокруг атомов тербия, среднее число граней и среднее число сторон граней МВ линейно уменьшаются.

Среднее число граней  $\langle F \rangle$  и среднее число сторон  $\langle S \rangle$  граней многогранников Вороного для моделей АС Re-Tb

| Сплавы                         | $\langle F \rangle$ |           | $\langle S \rangle$ |           |
|--------------------------------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
|                                | Вокруг Re           | Вокруг Tb | Вокруг Re           | Вокруг Tb |
| $\text{Re}_{82}\text{Tb}_{18}$ | 13,50               | 16,14     | 5,11                | 5,26      |
| $\text{Re}_{64}\text{Tb}_{36}$ | 13,12               | 15,56     | 5,09                | 5,23      |
| $\text{Re}_{47}\text{Tb}_{53}$ | 12,77               | 15,11     | 5,06                | 5,21      |
| $\text{Re}_{29}\text{Tb}_{71}$ | 12,44               | 14,66     | 5,03                | 5,18      |
| $\text{Re}_{11}\text{Tb}_{89}$ | 12,11               | 14,22     | 5,01                | 5,16      |

### Заключение

В работе проведен статистико-геометрический анализ атомной структуры аморфных сплавов системы Re-Tb в широком интервале концентраций. Среди многогранников, построенных вокруг атомов рения, значительную долю составляют многогранники с топологическим индексом 0–0–12–0, характерные для локального икосаэдрического окружения. Построена зависимость доли многогранников Вороного 0–0–12–0, характеризующих икосаэдрический ближний порядок, среди многогранников, построенных вокруг атомов рения, от концентрации атомов тербия. Эта зависимость является нелинейно возрастающей. Среди многогранников Вороного, построенных вокруг атомов тербия, лишь незначительная часть имеет топологический индекс 0–0–12–0. Различие в локальном окружении атомов рения и тербия обусловлено значительным различием диаметров атомов данных типов.

### Литература

1. Белашенко, Д.К. Компьютерное моделирование жидких и аморфных веществ / Д.К. Белашенко. – М.: МИСиС, 2005. – 408 с.
2. Медведев, Н.Н. Метод Вороного–Делоне в исследовании структуры некристаллических систем / Н.Н. Медведев. – Новосибирск: Изд. СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. – 214 с.

3. Полухин, В.А. Моделирование аморфных металлов / В.А. Полухин, Н.А. Ватолин. – М.: Наука, 1985. – 288 с.

4. Батаронов, И.Л. Компьютерное моделирование атомной структуры аморфных металлических сплавов / И.Л. Батаронов, А.В. Бондарев, Ю.В. Бармин // Известия РАН. Серия физическая. – 2000. – Т. 64. – № 9. – С. 1666-1670.

5. Бондарев, А.В. Рентгенодифракционное исследование атомной структуры аморфных сплавов Re-Tb / А.В.

Бондарев, И.Л. Батаронов, Ю.В. Бармин // Вестник ВГТУ. Серия Материаловедение. – 2004. – Вып. 1.15. – С. 39-42.

6. Анализ атомной структуры аморфных сплавов в рамках теории протекания / И.Л. Батаронов, А.В. Бондарев, Д.В. Уразов, Ю.В. Бармин // Известия РАН. Серия физическая. – 2005. – Т. 69. – № 8. – С. 1162-1167.

Воронежский государственный технический университет

## STATISTICAL GEOMETRY ANALYSIS OF ATOMIC STRUCTURE OF Re-Tb SYSTEM AMORPHOUS ALLOYS

**A.V. Bondarev<sup>1</sup>, I.L. Bataronov<sup>2</sup>, I.M. Pashueva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
email: [bondarev\\_a\\_v@mail.ru](mailto:bondarev_a_v@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
email: [ibat@mail.ru](mailto:ibat@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
email: [yapushka@yandex.ru](mailto:yapushka@yandex.ru)

Using the molecular dynamics method, the computer models of atomic structure of amorphous alloys of the Re-Tb system in the wide compositional region were constructed. Interatomic interaction was described by the empirical polynomial potential. The radial distribution functions calculated for the models are in good agreement with the results of the X-ray diffraction experiment.

The local atomic arrangement was studied with the help of Voronoi polyhedra. The distributions of the Voronoi polyhedra by the topological indices were calculated. Among the polyhedra constructed around the rhenium atoms, the significant part is polyhedra with the topological index 0–0–12–0 typical for the local icosahedral surrounding. We constructed the dependence of the fraction of the Voronoi polyhedra 0–0–12–0 characterizing the local icosahedral short-range order among the polyhedra constructed around the rhenium atoms on the concentration of terbium atoms. This dependence is nonlinearly increasing. The distributions of the Voronoi polyhedra by the number of faces and the distributions of the faces by the number of sides were calculated. The dependencies of these distributions on the composition of the alloys were studied. We calculated the average values of the number of faces determining the geometrical coordination number and the average number of sides of the faces of the Voronoi polyhedra. With the increase of concentration of the Tb atoms for the Voronoi polyhedra constructed around the Re atoms as well as around the Tb atoms, the average number of faces and the average number of sides of the faces of the Voronoi polyhedra decrease linearly

Key words: amorphous alloys, rhenium, terbium, Voronoi polyhedra, icosahedra

### References

1. Belashchenko, D.K. "Computer simulation of liquid and amorphous substances" ("Komputernoye modelirovaniye zhidkikh i amorfnykh veshchestv"), Moscow, MISiS, 2005, 408 p.
2. Medvedev, N.N. "The Voronoi–Delauney method in the study of the structure of non-crystalline systems" ("Metod Voronogo–Delone v issledovanii struktury nekrystallicheskich sistem"), Novosibirsk: SO RAN, NITS OIGGM, 2000, 214 p.
3. Polukhin, V.A., Vatin N.A. "Simulation of amorphous metals" ("Modelirovaniye amorfnykh metallov"), Moscow, Nauka, 1985, 288 p.
4. Bataronov I.L., Bondarev A.V., Barmin Yu.V. "Computer simulation of atomic structure of amorphous metallic alloys", *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya*, 2000, vol. 64, no. 9, pp. 1666-1670.
5. Bondarev A.V., Bataronov I.L., Barmin Yu.V. "X-ray diffraction study of atomic structure of the Re-Tb amorphous alloys" *Bulletin of Voronezh State Technical University, Seriya Materialovedeniye*, 2004, no. 1.15, pp. 39-42.
6. Bataronov I.L., Bondarev A.V., Urazov D.V., Barmin Yu.V. "Analysis of atomic structure of amorphous alloys in the framework of percolation theory", *Izvestiya RAN, Seriya fizicheskaya*, – 2005, vol. 69, no. 8, pp. 1162-1167.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКИХ СХЕМ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

© 2017 И.М. Голев, Е.А. Никитина, А.М. Агеев, А.В. Сергеев

Градиентные измерения используются для уточнения характеристик полей близкорасположенных источников на фоне магнитных полей удаленных источников, имеющих меньшие значения градиента в измеряемой точке. Для определения характеристик поля помех, вносимых подвижным объектом, необходимо решить обратную задачу – провести измерения магнитного поля Земли, источники которого находятся на большом расстоянии от измерительной аппаратуры, на фоне близкорасположенных собственных источников магнитных полей. В работе предложен способ разделения источников магнитных полей, характеризующихся различными пространственными зависимостями вектора магнитной индукции и его компонент. Рассмотрена схема градиентометрической системы, позволяющая проводить измерения компоненты вектора магнитной индукции, а также ее первой и второй производных по выбранному направлению. Описана структурная схема магнитометрической системы, реализующая выделение полезного источника магнитного поля на фоне помехи. Анализ проведен для случая, когда модель полезного сигнала неизвестна, а моделью помехи для простоты является магнитный диполь с переменным значением магнитного момента. Для реализации рассмотренной магнитометрической схемы возможно применение СКВИД-магнитометров, квантовых магнитометров с оптической накачкой, а также феррозондовых магнитометров, обладающих высокой чувствительностью и стабильностью, большим динамическим диапазоном. Предложенный принцип разделения источников полей может быть востребован для решения задач навигации подвижных объектов по магнитному полю Земли, а также при решении задач обнаружения объектов, имеющих собственный магнитный момент

Ключевые слова: магнитное поле, градиентометр, магнитометр, подавление магнитных помех, навигация по магнитному полю, магнитный диполь

### Введение

Магнитометрические датчики нашли широкое применение не только для непосредственного измерения параметров магнитного поля, но и для решения задач навигации [1-4], позиционирования, обнаружения [5], в медицинской и технической диагностике [6], в автомобильной промышленности.

Системы магнитного позиционирования активно реализуются и в бортовых системах летательных аппаратов: в наשלемных системах, системах центровки самолета, для детектирования опасного сближения летательного аппарата с линиями электропередач [7]. Особенно актуальными в настоящее время являются задачи навигации и обнаружения в магнитном поле, причем магнитометрические системы, обрабатывающие информацию о магнитном поле, его компонентах и их производных, как

правило, должны быть установлены на подвижных объектах. Известно, что подвижный объект в магнитном поле Земли вносит существенные девиации в показания магнитометрической аппаратуры, поэтому при обработке навигационной информации, привязанной к изменению общего вектора магнитной индукции и его компонент, необходимо не только разделять нормальное поле, аномальное поле и поле магнитных вариаций [8], но и корректно учитывать магнитные поля, создаваемые элементами конструкций подвижного объекта [9, 10]. Задача компенсации или учета собственных магнитных помех подвижного объекта не всегда может быть решена с требуемой точностью, поэтому для проведения высокоточных измерений магнитометрическая аппаратура зачастую устанавливается на выносных конструкциях, что позволяет уменьшить девиацию магнитометров. Однако такой способ не всегда применим, поскольку выносные конструкции могут снижать эксплуатационные характеристики подвижных объектов, поэтому в настоящее время ищутся способы интеграции магнитометрической аппаратуры непосредственно в корпус подвижного объекта [11].

Одним из способов разделения полей от различных источников, позволяющих не только определить направление на источник и расстояние до него, но и оценить его протяженность, является использование информации о пространственной зависимости некоторых харак-

---

Голев Игорь Михайлович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: imgolev@gmail.com  
 Никитина Елизавета Андреевна – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. физ.-мат. наук, преподаватель, e-mail: lis211290@mail.ru  
 Агеев Андрей Михайлович – ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, начальник отдела, e-mail: ageev\_bbc@mail.ru  
 Сергеев Александр Викторович – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, инженер, e-mail: sergeev-av@bk.ru

теристик полей источников, то есть проведение измерений их градиентов и извлечение информации о параметрах создаваемых полей. Для магнитного поля такой характеристикой является вектор индукции магнитного поля и его компоненты.

### Постановка задачи

Для решения конкретной практической задачи в магнитометрических схемах могут быть применены как векторные, так и скалярные магнитометры [12]. Показания векторных магнитометров зависят от их ориентации в пространстве, такие магнитометры измеряют проекцию вектора магнитной индукции на ось чувствительности магнитометра. Скалярные магнитометры позволяют измерить модуль полного вектора магнитной индукции, их показания не зависят от ориентации магнитометра. Классическая градиентная магнитометрическая схема первого порядка представляет собой два магнитометрических датчика, расположенных на расстоянии  $d$ , называемом базой, и включенных дифференциально. Если применены скалярные магнитометрические датчики, на выходе снимаются следующие характеристики магнитного поля: модуль вектора магнитной индукции, производная модуля вектора магнитной индукции по направлению осей  $x$ ,  $y$  или  $z$  в зависимости от взаимного расположения магнитометров. В случае построения градиентометрической схемы на векторных магнитометрах осуществляется измерение следующих характеристик:  $x$ -,  $y$ - или  $z$ -компоненты вектора магнитной индукции, а также ее изменение по выбранному направлению.

На рис. 1 представлена градиентометрическая схема второго порядка на векторных магнитометрах, реализующая измерение  $z$ -компоненты вектора магнитной индукции в точке расположения референтного датчика  $B_z(0)$ , первую производную этой компоненты по направлению  $z$   $\left(\frac{\partial B_z}{\partial z}\right)_{z=0}$ , а также и производную последней по  $z$   $\left(\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}\right)$ .

Как правило, градиентные измерения используются для уточнения характеристик полей близкорасположенных источников на фоне магнитных полей удаленных источников, имеющих меньшие значения градиента в измеряемой точке. Для определения характеристик поля помех, вносимых подвижным объектом,

необходимо решить обратную задачу – провести измерения магнитного поля Земли, источники которого находятся на большом расстоянии от измерительной аппаратуры, на фоне близкорасположенных собственных источников магнитных помех. Использование градиентометрических схем позволяет решать подобные задачи.

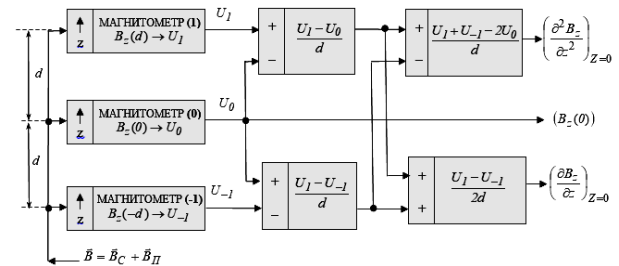


Рис. 1. Пример градиентометрической системы, измеряющей  $z$ -компоненту вектора магнитной индукции, а также первую и вторую производные  $z$ -компоненты по направлению

### Модельные представления

Для качественной оценки применимости метода рассмотрим модель двух источников магнитного поля - полезного сигнала  $\vec{B}_c$  и помехи  $\vec{B}_n$ . Пусть модель полезного сигнала неизвестна, а модель помехи для простоты является магнитный диполь с переменным значением магнитного момента  $M$  (например, такой моделью может быть задан электродвигатель, находящийся на известном расстоянии от магнитометрической аппаратуры, сила тока в котором зависит от режима работы):

$$\vec{B}_n = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \left( \frac{3(\vec{M}, \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{M}}{r^3} \right), \quad (1)$$

где  $\vec{r}$ ,  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{M}$  и  $\vec{r}$ ,  $\beta$  - угол между вектором  $\vec{r}$  и осью  $z$ ,  $\gamma$  - угол между вектором  $\vec{M}$  и осью  $z$  полагаются известными.

Тогда при измерении, производимом векторным магнитометром, с осью чувствительности вдоль оси  $z$  будет получено следующее значение:

$$B_z = B_{cz} + B_{nz}; \quad (2)$$

$$B_z = B_{cz} + \frac{M}{r^3} (\cos \alpha \cdot \cos \beta - 3 \cos \gamma). \quad (3)$$



Измерение первой производной компоненты  $B_z$  по направлению  $z$ , в свою очередь, определяется следующей величиной:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{\partial B_{cz}}{\partial z} + \frac{\partial B_{nz}}{\partial z}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} \approx -\frac{3M \cdot \cos \beta}{r^4} (\cos \alpha \cdot \cos \beta - 3 \cos \lambda) \quad (5)$$

Очевидно, что если выполняется условие  $\frac{\partial B_{cz}}{\partial z} \ll \frac{\partial B_{nz}}{\partial z}$ , то система измерений (2, 3) позволяет определить и аппаратно вычесть неизвестную  $z$ -компоненту поля помехи и получить на выходе  $z$ -компоненту поля полезного сигнала, не имея при этом модели поля полезного сигнала. Аналогичные измерения можно произвести и для остальных компонент, располагая нужным образом оси чувствительности векторных магнитометров. Градиентные измерения с целью компенсации помехи следует проводить вдоль направления максимального изменения поля помехи.

Однако в задачах навигации, как правило, полезным сигналом является характеристика аномального поля Земли, первые производные вектора магнитной индукции по направлению которого могут быть соизмеримы с соответствующими градиентами поля помехового сигнала. Поэтому практическое применение могут получить градиентометрические схемы второго порядка. Используя уже описанную модель, для которой  $\frac{\partial^2 B_{cz}}{\partial z^2} \ll \frac{\partial^2 B_{nz}}{\partial z^2}$  (вместо компоненты  $z$  проводятся измерения и остальных компонент, градиентные измерения выбираются вдоль осей максимального изменения с расстоянием поля помехи), для производных по направлению второго порядка получим следующие выражения:

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 B_{cz}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 B_{nz}}{\partial z^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} \approx -\frac{12M \cdot \cos^2 \beta}{r^5} (\cos \alpha \cdot \cos \beta - 3 \cos \lambda) \quad (7)$$

Поскольку в описанной модели магнитный момент  $M$  совместно с  $\vec{r}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  однозначно определяют характеристики магнитного поля помехи, зная эти характеристики можно восстановить как  $z$ -компоненту индукции магнитного поля помехи, так и ее производную по направлению  $z$ , что позволяет получить харак-

теристики полезного сигнала на выходе градиентометрической установки (рис. 2).

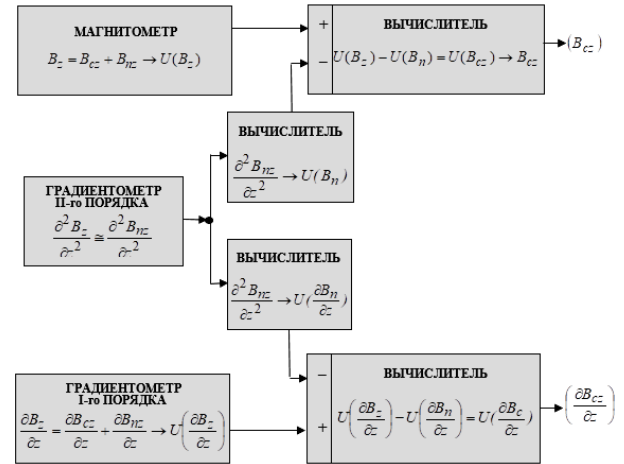


Рис. 2. Градиентометрическая система, реализующая выделение полезного источника магнитного поля на фоне помехи

Отметим, что вышеизложенная модель разделения полей с различными градиентами может быть востребована для решения задач навигации летательных аппаратов по магнитному полю Земли. Поскольку аномальное магнитное поле, являющееся источником «полезной» навигационной информации, создается намагниченными породами, залегающими на километровых глубинах, а источники помех летательного аппарата находятся на метровых расстояниях от градиентометрической аппаратуры, при сопоставимых модулях аномального и помехового магнитных полей в точке измерения и сонаправленности магнитных моментов источников аномального и помехового полей их градиенты будут уже соотноситься как  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ , тогда как вторые производные вдоль направлений максимального ослабления поля будут относиться как  $10^{-4}$ - $10^{-6}$ .

Вместе с тем, градиентные схемы измерения магнитных полей должны быть сконструированы на градиентометрических приборах, к которым предъявляются более высокие требования по динамическому диапазону, стабильности и чувствительности по сравнению с соответствующими приборами, используемыми для измерений модуля и компонент вектора магнитной индукции поля. Использование градиентометрических датчиков с высоким динамическим диапазоном обуславливается необходимостью выделения слабых магнитных полей на фоне сильных (к примеру, выделения аномальной компоненты поля Земли и поля помех на фоне нормального поля [13]). Более высокие

требования к чувствительности и стабильности магнитометров, используемых в градиентных измерениях, связаны с накоплением погрешностей при синхронизации измерений и восстановлении полезного сигнала. В настоящее время существуют магнитометрические датчики, удовлетворяющие указанным требованиям: СКВИД-магнитометры, квантовые магнитометры с оптической накачкой, феррозондовые магнитометры [14]. Выбор датчиков для конкретной измерительной системы совершается исходя из поставленной научно-технической задачи.

### Заключение

Таким образом, схема разделения источников магнитных полей градиентометрическим способом может быть реализована на базе современных магнитометрических датчиков. Описанный подход может эффективно применяться как в задачах навигации, так и в задачах обнаружения.

### Литература

1. Работы в интересах создания пассивных систем навигации на основе магнитного и гравитационного полей земли по материалам зарубежных источников / К.В. Епшин, Д.В. Зернуков, И.М. Комаров, Е.Л. Хицунтов // Инноватика и экспертиза. – 2016. – Вып.2. – С. 195-206.
2. Каршаков Е.В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата / Е.В. Каршаков // Управление подвижными объектами и навигация. – 2011. – Вып. 35. – С. 265-281.
3. Militarily Critical Technologies List – MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA. – 2014. – 87 p.
4. Слепокуров Ю.С. Система навигации промышленного транспортного робота / Ю.С. Слепокуров, В.В.

Пешков, А.В. Кузовкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №12.3. – С. 15-18.

5. Магнитоградиентные измерения в задачах обнаружения / А. К. Волковицкий и др. // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2016. – Вып. 11. Ч. 3. – С. 134 -144.

6. Голев И.М. Установка для измерения комплексной магнитной проницаемости высокотемпературных сверхпроводников / И.М. Голев, А.А. Гребенников, А.В. Сергеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12. – № 4. – С. 71-77.

7. Желамский М. В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов / М. В. Желамский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 320 с.

8. Белоглазов И. Н. Основы навигации по геофизическим полям / И. Н. Белоглазов, Г. И. Джанджава, Г. П. Чигин. – М.: Наука, 1985. – 328 с.

9. Задача компенсации девиации эромагнитометра: дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.02.01 / Харичкин Максим Викторович. – МГУ, 2009. – 106 с.

10. Малеев П.И. Перспективы развития магнитометрических систем для морских подвижных объектов/ П.И. Малеев // Навигация и гидрография. – 2010. – № 29. – С. 18-26.

11. Голев И. М. Технические аспекты измерения магнитного поля Земли в задаче воздушной навигации / И. М. Голев, Е. А. Никитина // Воздушно космические силы. Теория и практика. – 2017. - №1. – С. 272-278.

12. Бабаханов И.Ю. Новые магнитометры GSM-19FD(GEMSystems) и Mag-01H(Bartington Instruments Ltd) на обсерваториях ИКИР ДВО РАН и их возможности в геофизических исследованиях/ И.Ю. Бабаханов // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: VI междунар. конф. Паратунка, Камчатский край, 2013. – С.234-238.

13. Киселев С.К. Корреляционно-экстремальная навигация по полю магнитных аномалий протяженных ориентиров/ С.К. Киселев // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1997. – №6. – С.56-61.

14. Ницак Д. А. Аспекты создания систем навигации с использованием геомагнитного поля Земли / Д. А. Ницак, И. М. Голев, Е. А. Никитина // Радиолокация, навигация, связь: XXIII междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017.- С.1046-1053.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Воронежский государственный технический университет

### APPLICATION OF GRADIENTOMETRIC SCHEMES FOR DETECTING THE CONTRIBUTIONS OF DIFFERENT MAGNETIC FIELDS SOURCES

I.M. Golev<sup>1</sup>, E.A. Nikitina<sup>2</sup>, A.M. Ageev<sup>3</sup>, A.V. Sergeev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: imgolev@gmail.com

<sup>2</sup>PhD, Assistant Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russia Federation,  
e-mail: lis211290@mail.ru

<sup>3</sup>PhD, head of department, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russian Federation,

e-mail: ageev\_bbc@mail.ru

<sup>4</sup>PhD, engineer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation,

e-mail: sergeev-av@bk.ru

Gradient measurements are used to refine the characteristics of the fields of closely located sources against the background of magnetic fields of remote sources with smaller values of the gradient at the measured point. To determine the characteristics of the interference field made by a mobile object, it is necessary to solve the inverse problem - to conduct measurements of the Earth's magnetic field, whose sources are at a great distance from the measuring equipment, against a background of closely located sources of magnetic interference. A method for separating of sources of magnetic fields characterized by the different magnetic induction vector and its components spatial dependences was proposed in the article. The scheme of the gradientometric system which makes it possible to measure the components of the magnetic induction vector and its first and second derivatives in the chosen direction was considered. The structural magnetometric system that realizes the separation of magnetic field useful source from magnetic interference was proposed. The analysis was carried out for the case when the useful signal model is unknown, and the noise magnetic field model is a magnetic dipole with a variable value of the magnetic moment for simplicity. In the considered magnetometric scheme it is possible to use SQUID magnetometers, quantum magnetometers with optical pumping, as well as ferroprobe magnetometers with a high sensitivity, stability, and with a large dynamic range. The above model can be applied for solving the problems of mobile objects magnetic navigating as well as in solving problems of objects with their own magnetic moment detection

Key words: magnetic field, gradiometer, magnetometer, magnetic interference reduction, navigation by magnetic field, magnetic dipole

#### References

1. Epshin K.V., Zernyukov D.V., Komarov I.M., Hitsuntov E.Kh. "Works in the interests of creating passive navigation systems based on magnetic and gravitational fields of the earth based on materials from foreign sources", *Innovation and expertise*, 2016, vol. 2, pp. 195-206.
2. Karshakov, E.V. "Application of measurements of the parameters of the Earth's magnetic field gradient in the problem of navigation of an aircraft", *Control of mobile objects and navigation*, 2011, vol. 35, pp.265-281.
3. Militarily Critical Technologies List – MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA, 2014, 87 p.
4. Slepokurov Yu.S., Peshkov V.V., Kuzovkin A.V. "Navigation system of an industrial transport robot", *Bulletin of the Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no 12-3, pp.15-18.
5. Volkovitsky A.K. et al. "Magnitograde measures in detection problems", *Izv. TulGu. Techn. Science*, 2016, vol. 11, part 3, pp. 134 -144.
6. Golev I.M., Grebennikov A.A., Sergeev A.V. "A device for measuring the complex magnetic permeability of high-temperature superconductors", *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2016, vol. 12, no 4, pp. 71-77.
7. Zhelamsky M.V. "Electromagnetic positioning of moving objects" ("Jelektromagnitnoe pozicionirovanie podvizhnyh ob'ektov"), Moscow: FIZMATLIT, 2013, 320 p.
8. Beloglazov I.N., Dzhandzhgava G.I., Chigin G.P. "Fundamentals of navigation in geophysical fields" ("Osnovy navigacii po geofizicheskim poljam"), Moscow, Nauka, 1985, 328 p.
9. Harychkin M.V. "The problem of compensating the deviation of an eromagnetometer: diss. Cand. fiz.-mat. Sciences: 01.02.01" ("Zadacha kompensacii deviacii jeromagnetometra: diss. kand. fiz.-mat. nauk: 01.02.01"), Moscow State University, 2009, 106 p.
10. Maleev, P.I. "Prospects for the development of magnetometric systems for marine mobile objects", *Navigation and hydrography*, 2010, no. 29, pp. 18-26.
11. Golev I.M., Nikitina E.A. "Technical Aspects of Measuring the Earth's Magnetic Field in the Problem of Air Navigation", *Airborne Space Forces. Theory and practice*, 2017, no. 1, pp. 272-278.
12. Babakhanov I.Yu. "New magnetometers GSM-19FD (GEMSystems) and Mag-01H (Bartington Instruments Ltd) at the IKIR FEB RAS observatories and their capabilities in geophysical research", *VI International Conference "Solar-terrestrial connections and physics of earthquake precursors"*, Paratunka, Kamchatka, Russia, September 9-13, 2013, pp. 234-238.
13. Kiselev, S.K. "Correlation-extreme navigation in the field of magnetic anomalies of extended landmarks", *Izv. RAS. Theory and control systems*, 1997, no. 6, pp. 56-61.
14. Nitsak, D.A., Golev I.M., Nikitina E.A. "Aspects of creating navigation systems using the geomagnetic field of the Earth", *XXIII International Scientific and Technical Conference "Radiolocation, navigation, communication"*, 18 -20 April, 2017, Voronezh, pp. 1046-1053.

## ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ТЕРМОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛА ПОЛИМЕРНОГО КАНАЛЬНОГО ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЯ

© 2017 В.И. Рубинов, С.А. Гордиенко, А.А. Попов, А.В. Кушнырев

В настоящее время с целью предотвращения взрыва топливных баков воздушных судов применяется каналный огнепреградитель, который состоит из эластичных высокопористых ячеистых полимерных материалов с открытыми порами. Пожаростойкость такого полимерного каналного огнепреградителя определяется в основном морфологической структурой его ячеек. Проведенный анализ путей повышения пожаростойкости огнепреградителя позволил определить два направления: это изменение условий, в которых находится материал ячеек, и повышение термостойкости самого материала. Эксплуатация огнепреградителя в среде авиационного топлива приводит к изменению его морфологической структуры. С целью определения поведения материала полимерного каналного огнепреградителя в условиях развившегося пожара в топливном баке были проведены испытания трех образцов пенополиуретана марки ППУ-ЭО-100 на термостойкость, первый из которых в топливные баки не устанавливался, второй находился в среде авиационного керосина в течение трех лет, третий образец находился в среде авиационного керосина более 9 лет. Испытания проводились методами дериватографии, при этом образцы материала нагревались до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $10^{\circ}\text{C}$  в минуту. Полученные результаты испытаний подтвердили предположение о влиянии процесса старения на термостойкость полимерного каналного огнепреградителя при его эксплуатации в среде авиационного топлива и позволили определить оптимальные пути сохранения его морфологических свойств

Ключевые слова: дериватография, полимерный каналный огнепреградитель, пожаростойкость, пенополиуретан, термостойкость

### Введение

Для взрывозащиты топливных баков-отсеков воздушных судов (ВС) широко применяются засыпные и каналные огнепреградители. В настоящее время засыпные огнепреградители в авиации не используются в связи с возможностью нарушения порядка перекачки и подачи топлива в авиационный двигатель вследствие попадания сферических элементов взрывозащиты в перекачивающую топливную арматуру в условиях знакопеременных перегрузок. С целью предотвращения взрыва топливных баков современных ВС используются каналные огнепреградители из эластичных высокопористых ячеистых полимерных материалов с открытыми порами, таких как пенополиуретан ППУ ЭО 100. Полное или частичное заполнение топливных баков пористым материалом предотвращает

взрыв топливовоздушной смеси, но не исключает развитие пожара в пространстве над топливом.

Пожаростойкость полимерного каналного огнепреградителя во многом определяется содержанием газовой фазы, морфологической структурой огнепреградителя (материалом, формой, размером, строением и ориентацией) ячеек [1].

Эффективность взрывозащиты топливных баков зависит от степени заполнения надтопливного пространства пористым материалом.

Воздействие высоких температур в течение определенного промежутка времени приводит к потере устойчивости формы пористого наполнителя и уменьшению его надтопливного объема.

### Анализ путей повышения пожаростойкости высокопористых ячеистых материалов

В настоящий момент изыскание путей повышения пожаростойкости высокопористых ячеистых материалов осуществляется по двум направлениям:

1. Изменение условий, в которых находится материал ячеек.
2. Повышение термостойкости материала ячеек.

Актуальность *первого* направления обусловлена высоким значением коэффициента пористости ячеистых

---

Рубинов Владимир Иванович - ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, тел. 8(980) 3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru  
 Гордиенко Сергей Анатольевич - Краснодарское ВВАУЛ, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника кафедры, тел. 8(918)1950448, e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru  
 Попов Андрей Алексеевич - Краснодарское ВВАУЛ, старший преподаватель, тел. 8(903)4539154, e-mail: andrei\_.72@mail.ru  
 Кушнырев Александр Владимирович - Краснодарское ВВАУЛ, преподаватель, тел. 8(967)6608106, e-mail: a.v.kushnirev81@yandex.ru

материалов. Так, например, объем газовой фазы в ячейках пенополиуретана ППУ-ЭО-100 достигает 96...97%. В этом случае в газовую среду из материала ППУ-ЭО-100 полимерного канального огнепреградителя при нагреве выделяется инертный газ или пары, затрудняющие воспламенение газообразных продуктов разложения предохраняемого материала или снижающие температуру горения среды.

Реализация первого направления осуществляется с помощью добавления в композицию материала пенополиуретана (ППУ) добавки, выполняющей роль термостабилизатора. Примером такого антиперена может служить применяющаяся в настоящее время галогенсодержащая добавка - трихлорэтилфосфат (ТХЭФ), которая оказывает воздействие на газовую фазу.

*Второе направление* обусловлено приоритетом массы материала ячеек, соотношение которых к массе газовой фазы составляет 96,0% для воздуха и 92% для топливовоздушной смеси.

В этом случае повышение термостойкости материала ячеек осуществляется двумя способами [2]:

- химической модификацией рецептуры материала;
- введением в материал добавок полифункционального действия.

Введение добавок в композицию ППУ является менее дорогостоящим способом и может приводить к следующим эффектам:

- а) аккумуляция тепла в процессе фазовых переходов II рода в материале антипирена (тепловые эндозффекты);
- б) образование на поверхности материала ППН пленки, предохраняющей его от термического воздействия и препятствующей проникновению кислорода к материалу;
- в) образование дополнительных связей в материале.

Примером добавки полифункционального действия является оксиэтилидендифосфоновая кислота (ОЭДФ), сочетающая в себе свойства антипирена и термостабилизатора [3].

Эксплуатация канального огнепреградителя в среде авиационного топлива приводит к изменению его морфологической структуры.

Нормативными документами установлено, что пенополиуретан ППУ ЭО 100 сохраняет свои свойства при нахождении в авиационном топливе в течение 8 лет. Однако личный опыт авторов в области эксплуатации

авиационной техники показал, что изменение морфологической структуры материала пенополиуретана марки ППУ-ЭО-100 начинается ранее установленного срока.

Таким образом, можно предположить, что термостойкость полимерного канального огнепреградителя, находящегося в среде авиационного топлива, со временем изменяется вследствие влияния процесса старения.

### **Процедура испытания образцов полимерного канального огнепреградителя на термостойкость при высоких температурах**

С целью определения поведения материала полимерного канального огнепреградителя в условиях развившегося пожара в топливном баке были проведены испытания образцов на термостойкость при температурах, соответствующих горению топливно-воздушной смеси в замкнутом объеме.

В качестве полимерного канального огнепреградителя использовался пенополиуретан марки ППУ-ЭО-100, в состав которого входит трихлорэтилфосфат (ТХЭФ).

Испытывались 3 образца материала ППУ ЭО-100 массой по 0,12 г каждый из них:

1. Образец №1 в топливные баки не устанавливался.
2. Образец №2 находился в среде авиационного керосина в течение 3-х лет.
3. Образец №3 находился в среде авиационного керосина более 9 лет.

Испытания образцов материала проводились методами дериватографии (от латинского *derivatus* - отклонённый и греческого *grapho* - пишу).

Дериватография является комплексным методом исследования химических и физико-химических процессов. Дериватография основана на сочетании метода дифференциального термического анализа (ДТА) с методами термогравиметрии (ТГ) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ).

Объектами исследования методами дериватографии могут быть сплавы, минералы, керамика, древесина, резины и полимерные материалы [4].

Использование в испытаниях методов дериватографии обусловлено тем, что одновременное определение происходящих в веществе с тепловым эффектом превращений и изменений его массы позволяет однозначно

установить характер процессов, что невозможно сделать по результатам только ДТА или результатам другого термического метода. Например, когда фазовое превращение, сопровождаемое тепловым эффектом, происходит без изменения массы.

Прибор, регистрирующий термические и термогравиметрические изменения, называется дериватографом. Фирмы «Неч» (ФРГ), «МОМ» (Венгрия), «Дю Понт» (США) выпускают такие приборы для синхронного проведения анализа методами ДТА, ТГА и ДТГ. В частности, для исследования полимеров и ингредиентов резиновых смесей широко применяется дериватограф Эрдеи и Паулик фирмы «МОМ». Данный дериватограф позволяет записывать одновременно 4 зависимости: разности температур  $\Delta T$  анализируемого образца и эталона от времени (кривая ДТА); изменение массы  $\Delta m$  от температуры (термогравиметрическая кривая ТГ); скорости изменения массы (производные  $dm/dt$ ) от температуры (дифференциальная термогравиметрическая кривая ДТГ) и температуру (кривая Т). При этом удаётся установить последовательность превращений вещества и определить количество и состав промежуточных продуктов.

Исследование картины термодеструкции полимерного канального огнепреградителя проводилось с использованием лабораторного комплекса, состоящего из средств измерений параметров испытания, передачи, регистрации и обработки полученных данных.

В качестве средств измерений использовались дериватограф фирмы «МОМ» Q-1500D и весы лабораторные электронные ВЛР-200.

Образцы материала ППУ-ЭО-100 нагревались до температуры  $1000^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $100^{\circ}\text{C}$  в минуту.

Для передачи результатов измерений на ПЭВМ было использовано многофункциональное 8-канальное устройство Е-270. Для автоматизированной обработки полученных на испытаниях данных был применен специализированный программный продукт.

#### Результаты испытания образцов полимерного канального огнепреградителя на термостойкость при высоких температурах

Результаты испытаний первого образца показали, что:

1) изменение теплофизических свойств вещества началось при температуре  $212^{\circ}\text{C}$  (рис. 1);

2) значительное уменьшение массы образца – 75 % наблюдается в интервале температур  $212 \dots 440^{\circ}\text{C}$ ;

3) в интервале температур  $440 \dots 631^{\circ}\text{C}$  образец полностью сгорает;

4) в процессе нагрева образца произошло выделение теплоты в количестве 4,3272 Дж/кг.

5)

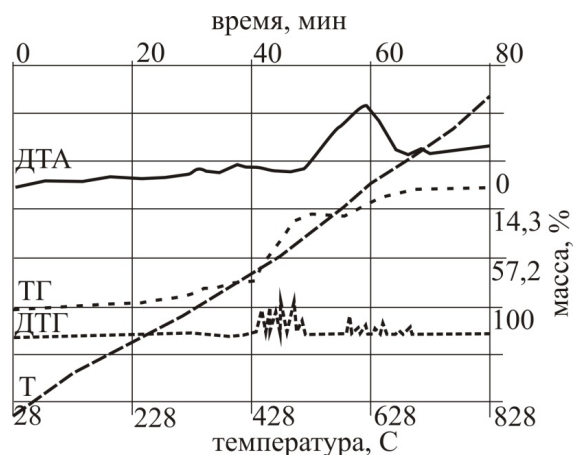


Рис. 1. Образец ППУ-ЭО-100, не находившийся в среде авиационного топлива

Результаты испытаний второго образца показали, что:

1) изменение теплофизических свойств вещества началось при температуре  $228^{\circ}\text{C}$  (рис. 2);

2) уменьшение массы образца – 17 % наблюдается в интервале температур  $228 \dots 328^{\circ}\text{C}$ ;

3) в интервале температур  $328 \dots 629^{\circ}\text{C}$  образец полностью сгорает;

4) в процессе нагрева образца произошло выделение теплоты в количестве 13,8424 Дж/кг.

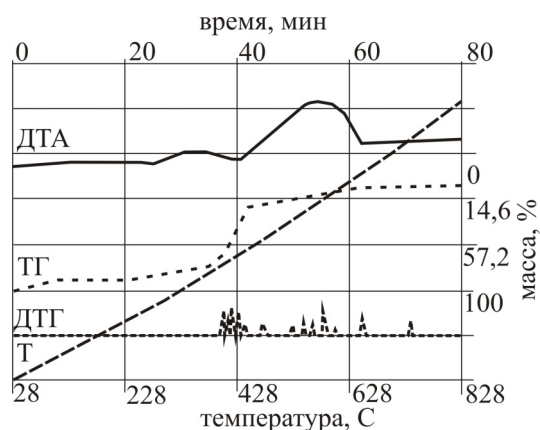


Рис. 2. Образец ППУ-ЭО-100, находившийся в среде авиационного топлива 3 года

Результаты испытаний третьего образца показали, что:

1) изменение теплофизических свойств вещества началось при температуре  $227^{\circ}\text{C}$  (рис. 3);

2) уменьшение массы образца – 19 % наблюдается в интервале температур  $227 \dots 381^{\circ}\text{C}$ ;

3) в интервале температур  $381 \dots 594^{\circ}\text{C}$  образец полностью сгорает;

4) в процессе нагрева образца произошло выделение теплоты в количестве 12,6796 Дж/кг.

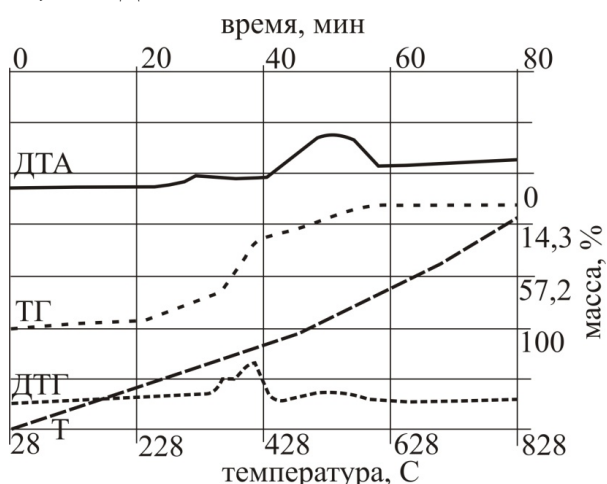


Рис. 3. Образец ППУ-ЭО-100, находившийся в среде авиационного топлива 9 лет

Достоверность результатов, полученных при испытаниях трех образцов ППУ-ЭО-100, подтверждается данными, приведенными в работе [3].

#### Анализ результатов испытаний образцов ППУ на термостойкость

Проведенные испытания показали, что:

1. Температура воспламенения ППУ - ЭО - 100 с ТХЭФ при старении материала смещается в область более низких температур, что объясняется нарушением внутренних связей в материале вследствие высокой адсорбционной способности ППУ-ЭО-100 и уменьшением концентрации огнегасящей добавки вследствие нахождения в среде авиационного топлива [2].

2. В процессе термической деструкции ППУ-ЭО-100 с ТХЭФ эндотермические эффекты в материале образцов не обнаружены, что подтверждает преимущественное воздействие антипирена на газовую фазу ячеек.

3. Воздействие выделяющихся галоидов антипирена ТХЭФ на газовую фазу не дало эффекта смещения разложения материала в область высоких температур, что позволяет предположить о недостаточности воздействия только на газовую фазу в случае с конкретным материалом с учетом его токсических свойств (выделения фосгена при разложении).

4. Для образца 2 материала ППУ-ЭО-100 с ТХЭФ в интервале температур  $300 \dots 400^{\circ}\text{C}$  обнаружен эффект увеличения термостойкости.

5. Для образца 3 остаток массы равный 50 % смещается в сторону низких температур вследствие уменьшения концентрации огнегасящей добавки (рис. 4).

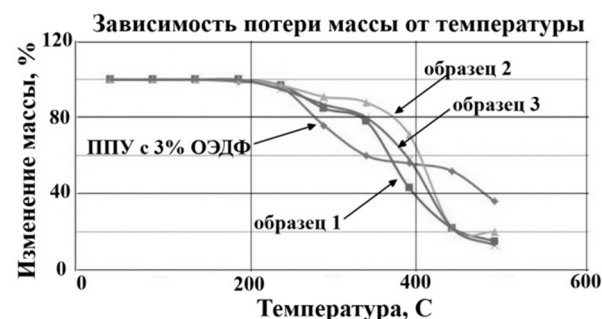


Рис. 4. Зависимость потери массы образца ППУ от температуры

Наличие оксидилендифосфоновой кислоты в испытуемых образцах ускоряет процесс разложения ППУ-ЭО-100 в области до  $400^{\circ}\text{C}$ , но при этом смещает его в более высокую температурную область, тем самым увеличивая термостабильность ППУ-ЭО-100 по сравнению с добавкой ТХЭФ.

Причина эффективности ОЭДФ в качестве ретарданта заключается в большом количестве обуглившегося остатка, препятствующего распространению теплового потока, который в условиях пожара защищает неразложившийся полимер [3].

#### Выводы

Таким образом, подтвердилось выдвинутое предположение о влиянии процесса старения на термостойкость полимерного канального огнепреградителя вследствие изменения его морфологических свойств при эксплуатации в среде авиационного топлива.

Можно предположить, что для сохранения морфологических свойств материала и получения желаемой зависимости



потери массы ППУ-ЭО-100 от температуры в процессе его старения необходимо [3]:

#### Литература

1) с целью своевременной замены блоков ППУ-ЭО-100 определить оптимальное время продолжительности эксплуатации полимерного канального огнепреградителя в среде авиационного топлива с учетом старения материала полимера;

2) на стадии изготовления изменять теплофизические свойства материала огнепреградителя путем добавления полифункциональных антипиренов, воздействующих преимущественно на материал огнепреградителя, например, борсодержащих присадок;

3) модифицировать структуру элементов ячейки полимерного канального огнепреградителя.

1. Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий / А.Н. Дмитриев. – М.: РГОТУПС, 2001. – 315 с.

2. Булатов Г.А. Пенополиуретаны и их применение на летательных аппаратах / Г.А. Булатов. – М.: Машиностроение, 1974. – 344 с.

3. Цыганова Е.А. Оксизтилидендифосфоновая кислота, её аминные соли и ангидрид борной и фосфорной кислот, как антипирены для жестких пенополиуретанов: дис. канд. хим. наук / Казань, 2001. – 103 с.

4. Новопольцева О.М. Современные физико-химические методы исследования органических веществ и полимеров [Электронный ресурс] / О.М. Новопольцева, Б.С. Орлинсон, О.В. Бычкова // Учебные пособия. Серия «Технические дисциплины»: сб. Волгоград: ВПИ (филиал) ВолгГТУ, 2012. Вып. 4.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А. К. Серова

## AGEING EFFECT ON THE THERMAL STABILITY OF THE POLYMER CHANNEL FLAME BARRIER MATERIAL

V.I. Rubinov<sup>1</sup>, S.A. Gordienko<sup>2</sup>, A.A. Popov<sup>3</sup>, A.V. Kushnyrev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces “N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy”, Voronezh, Russian Federation  
ph. 8(980) 3481953,  
e-mail: rubinov777@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots, Krasnodar, Russian Federation  
ph. 8 (918) 1950448,  
e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

<sup>3</sup>Assistant Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots, Krasnodar, Russian Federation  
ph. 8(906)4315414,  
e-mail: gordi.serhio2013@yandex.ru

<sup>4</sup>Assistant Professor, Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots, Krasnodar, Russian Federation  
ph. 8(967)6608106,  
e-mail: a.v.kushnyrev81@yandex.ru

Currently, in order to prevent the explosion of aircraft fuel tanks, a channel fire barrier is used, which consists of elastic, highly porous cellular polymers with open pores. The fire resistance of such a polymer channel fire barrier is determined mainly by the morphological structure of its cells. The analysis of ways to increase the fire resistance of the fire barrier has made it possible to determine two directions: a change in the conditions in which the material of the cells is located, and an increase in the thermal stability of the material itself. The operation of a flame barrier in an aviation fuel medium leads to a change in its morphological structure. In order to determine the behavior of the material of the polymer channel flame barrier in the conditions of a fire in the fuel tank, three samples of polyurethane foam of the PPU-EO-100 grade were tested for heat resistance, the first of which was not installed in the fuel tanks, the second was in aviation kerosene for 3 years, the third sample was in the aviation kerosene medium for more than 9 years. The tests were carried out using derivatography methods, and the material samples were heated to a temperature of 10000 C at a rate of 100 C per minute. The obtained test results confirmed the assumption about the effect of the aging process on the thermal stability of a polymer channel fire barrier during its operation in an aviation fuel medium and allowed to determine the optimal ways of keeping its morphological properties



Key words: derivatography, polymeric channel fire prevention device, fire resistance, polyurethane foam, thermal stability

### References

1. Dmitriev A.N. "Management of energy-efficient innovations in the construction of buildings" ("Upravlenie jenergosberegajushimi innovacijami v stroitel'stve zdaniy"), Moscow, RGOTUPS, 2001, 315 p.
2. Bulatov G.A. "Polyurethane foams and their application in aircraft" ("Penopoliuretany i ih primenenie na letatel'nyh apparatah"), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 344 p.
3. Cyganova E.A. "Hydroxyethylenediphosphonic acid, its amine salt and anhydride of boric and phosphoric acids as flame retardants for rigid polyurethane foams: dis. Cand. chem. of Sciences" ("Oksijetilendifosfonovaja kislota, ejoaminnye soli i angidrid bornoj i fosfornoj kislota, kak antipireny dlja zhestkih penopoliuretanov: dis.kand. him. nauk"), Kazan', 2001, 103 p.
4. Novopol'ceva O.M., Orlinson B.S., Bychkova O.V. "Modern physico-chemical research methods of organic substances and polymers" ("Sovremennye fiziko-himicheskie metody issledovaniya organicheskikh veshchestv i polimerov"), *Sbornik «Uchebnye posobia»*. Seriya «Tekhnicheskie discipliny», Vypusk 4, Electronic resource, (1 fail: 2,34 MB), Volgograd, VPI(filial) VolgGTU, 2012.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ Mg/NbO

© 2017 О.В. Стогней, А.Н. Смирнов, А.В. Ситников

Методом ионно-лучевого распыления оксидной (NbO) и металлической (Mg) мишеней с последующим осаждением материала через несимметричный экран на подложки, вращающиеся вокруг мишеней, получены многослойные наноструктуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ , содержащие 82 бислоя  $(\text{Mg}+\text{NbO})$ . Анализ результатов малоугловой рентгеновской рефлектометрии позволил определить, что толщина бислоев в полученных структурах меняется от 2,2 нм до 6,2 нм. При толщине бислоя менее 4 нм слои магния представляют собой совокупность дискретных наноразмерных металлических гранул, при больших толщинах бислоев магний формирует сплошные слои. Установлено, что в зависимости от морфологии слоёв магния температурная зависимость электросопротивления наноструктуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  существенно отличается. Для образцов с малым содержанием магния температурная зависимость сопротивления идентична температурной зависимости сопротивления для нанокompозитных пленок, находящихся до порога перколяции. Для образцов со сплошным слоем магния наблюдается иная картина, за счет окисления слоев металла при 430 °С происходит резкий рост электросопротивления многослойной структуры на 1 – 2 порядка. Показано, что наноструктура  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ , несмотря на интенсивное окисление магния, остается многослойной и не разрушается при отжигах, проведенных в вакууме в течение 4 часов при 450 °С

Ключевые слова: ионно-лучевое напыление, малоугловая рентгеновская рефлектометрия, многослойная наноструктура, термическая стабильность

### Введение

Хранение водорода в виде твердотельных гидридов считается одним из наиболее удобных и безопасных методов, благодаря способности ряда металлов обратимо поглощать значительные количества водорода. Система «металл-водород» обладает уникальным сочетанием свойств, включая возможность достижения высоких объемных плотностей атомов водорода в металле, широкий диапазон рабочих давлений и температур, селективность процессов поглощения/выделения и ряд других особенностей [1]. В последнее время вырос интерес к наноструктурным и нанокompозитным материалам в качестве сред для хранения водорода, поскольку наноразмерность металлической фазы может обеспечить значительное увеличение площади реакционной поверхности, а также значительно повысить химическую активность поверхности, что способствует ускорению процессов адсорбции водорода [2]. В этом контексте перспективной системой считается наноструктурированный материал на основе магния (в качестве гидридообразующего компонента) и оксида ниобия (в качестве каталитического компонента) [3,4]. Однако эту перспективную

систему чрезвычайно сложно получить вследствие высокой химической активности магния и более высокой склонности к окислению по сравнению с ниобием. В данной работе рассмотрена возможность получения слоистой наноструктурированной системы, содержащей металлический магний в объеме оксида ниобия.

### Образцы и методика эксперимента

Получение многослойных структур металл-диэлектрик осуществлялось методом ионно-плазменного распыления двух мишеней (металлической и диэлектрической) с последующим осаждением материала на подложки, совершающие круговое движение вокруг мишеней со скоростью 0,18 об./мин. Распыление мишеней проводилось в среде аргона с рабочим давлением  $7 \cdot 10^{-4}$  Торр. Схема распылительной камеры представлена на рис. 1.

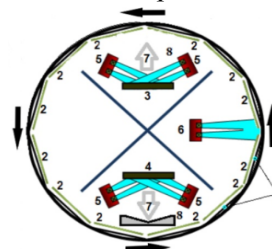


Рис. 1. Схема распылительной камеры (вид сверху). 1 - вращающееся основание держателей подложек (стрелками показано вращение держателя подложек); 2 - подложкодержатели; 3 - мишень из  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ; 4 - мишень из Mg; 5 - ионные источники, распыляющие мишени; 6 - ионный источник для очистки подложек; 7 - поток атомов, конденсирующихся на подложку; 8 - V - образный экран

Стогней Олег Владимирович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sto@sci.vrn.ru  
Смирнов Андрей Николаевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: deadpunk@inbox.ru

Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Напыление осуществлялось на подложки двух типов: покровное стекло и ситалловые полоски. Образцы, нанесенные на стекло, использовались для рентгеновской малоугловой рефлектометрии, образцы на ситалле служили для резистивных исследований. Структурные исследования проводились на рентгеновском дифрактометре D2 Phaser в геометрии Брегга-Брентано, в излучении с длиной волны  $\lambda=1,541$  А. Электрическое сопротивление многослойных образцов измерялось потенциометрическим методом по двухзондовой схеме при протекании тока вдоль сформированных слоев. Электрические контакты создавались на внешней (верхней) поверхности многослойной структуры.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Для исследования была получена многослойная структура  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  (индекс 82 означает количество бислоев). Получение многослойки осуществлялось последовательным осаждением магния и оксида ниобия на подложки, размещенные на вращающемся подложкодержателе (см. рис. 1). Осаждение оксида ниобия происходило непосредственно при распылении керамической мишени. Напыление магния осуществлялось при распылении магниевой мишени, однако осаждение выбитых атомов на подложки происходило через V-образный экран. На рисунке 2 показана схема распыления магния через такой экран. Очевидно, что благодаря изменяющейся ширине щели экрана интенсивность атомного потока, конденсирующегося на поверхность подложки, неравномерна. В верхней части подложкодержателя интенсивность атомного потока минимальна, в нижней максимальна. Если учесть, что подложки расположены на движущемся подложкодержателе, то понятно, что напыляемая пленка магния осаждается на поверхность подложки равномерным слоем, но в верхней части подложкодержателя толщина магниевой пленки оказывается значительно меньше, чем в нижней части.

Использование данного приема позволило получить многослойные структуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  с разной толщиной магниевых слоев (напыляемых через V-образный экран), но одинаковой толщиной слоев оксида ниобия (напыляемого без экрана).

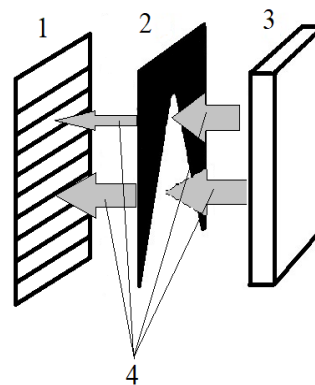


Рис. 2. Схема распыления магниевой мишени через V-образный экран. 1 – подложкодержатель с ситалловыми подложками (полосками), 2 – V-образный экран, 3 – магниевая мишень, 4 – поток атомов, движущийся от распыляемой мишени

Для подтверждения многослойности полученной структуры, а также для оценки толщины слоев, сформировавшихся при последовательном напылении на вращающуюся подложку, использовалась малоугловая рентгеновская рефлектометрия. На рис. 3 приведены результаты малоугловой рентгеновской рефлектометрии четырех многослойных образцов  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  с различной толщиной магниевой прослойки. Исследованные образцы при напылении размещались в разных областях подложкодержателя (см. рис. 2 позиция 1). Например, образец №1 располагался на расстоянии 42 мм от верхнего края подложкодержателя, а образец № 4 – на расстоянии 192 мм от верхнего края. Таким образом, увеличение номера образца соответствует возрастанию толщины прослойки магния в сформировавшейся структуре.

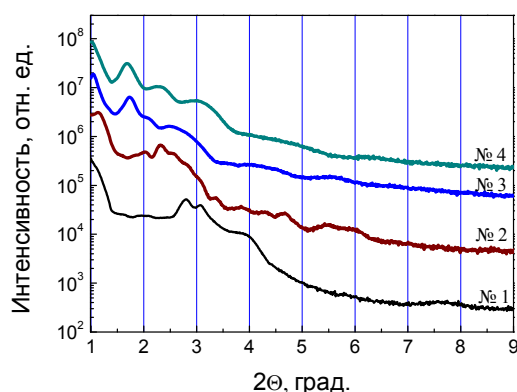


Рис. 3. Результаты малоугловой рентгеновской рефлектометрии образцов многослойной структуры  $\text{Mg}/\text{NbO}$  с различной толщиной магниевой прослойки (толщина возрастает от образца №1 к образцу №4)

По внешнему виду полученные зависимости можно разделить на две группы. Рентгенограммы, полученные от образцов № 3 и №4 (с большой толщиной слоёв магния), характеризуются общими особенностями: имеют осциллирующий вид и содержат несколько убывающих по амплитуде пиков. Увеличение толщины слоев Mg приводит к сдвигу пиков в область малых углов, что хорошо видно по положению симметричного пика, расположенного в области 1,6 – 2 градусов. Это в полной мере согласуется с законом Вульфа-Брэгга. Следует также отметить, что полученные зависимости отличаются от дифракционной картины наблюдаемой ранее для тонких пленок чистого магния и чистого оксида ниобия, напылённых по описанной выше технологии [5]. Малоугловые рефлектограммы от чистых пленок представляли собой регулярные осцилляции интенсивности с периодом 0,1 – 0,2 градуса в сравнительно широком интервале углов (1 – 5 град.).

Рассчитанные значения толщины бислоя Mg/NbO в зависимости от положения образца многослойной пленки (Mg/NbO)<sub>82</sub> на подложкодержателе

| Образец № | Расстояние от края подложкодержателя, мм | Рассчитанная толщина бислоя d, нм |
|-----------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| 1         | 42                                       | 2,9                               |
| 2         | 93                                       | 3,1                               |
| 3         | 150                                      | 4,5                               |
| 4         | 192                                      | 5,0                               |

Вид рефлектограмм, приведённых на рис. 3 от образцов № 3 и 4, позволяет предполагать, что в них сформирована многослойная структура Mg/NbO, и дифракция излучения осуществляется на периодической структуре, состоящей из бислоёв (магний+оксид ниобия) [6].

Рефлектограммы, полученные от образцов № 1 и № 2, имеют другой вид: осцилляции не выражены, наблюдается единственный пик с раздвоенной вершиной или несимметричными плечами. По всей видимости, это связано с тем, что в данных образцах толщина прослоек магния настолько низкая, что они не формируют сплошные слои, а образуют совокупность металлических наночастиц, наподобие того, что наблюдается в композитных материалах металл-диэлектрик. Таким образом, можно предположить, что полученная структура представляет собой слоисто-гранулированную систему. Дальнейшие исследования подтвердили это предположение.

Ранее проведенные исследования [5] пока-

зали, что при напылении чистого оксида ниобия в тех же режимах, что и при напылении многослойной структуры Mg-NbO (давление аргона, мощность, развиваемая ионным источником, скорость вращения подложкодержателя), толщина одного слоя оксида ниобия составляет 0,96 нм. Поэтому мы принимаем эту толщину фиксированной и полагаем, что в многослойной системе толщина прослойки из оксида ниобия также имеет это значение.

Результаты рентгеновской рефлектометрии (рис. 3) пересчитывались в соответствии с выражением Вульфа-Брэгга

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

где  $d$  - это толщина бислоя (магний + оксид ниобия),  $\theta$  - угол, соответствующий максимуму на рефлектограмме,  $n$  - порядок максимума. Следует подчеркнуть, что данное выражение корректно использовать для анализа многослойных структур лишь в том случае, когда толщина слоев не превышает нескольких нанометров [6, 7], в нашем случае это условие выполняется. В таблице приведены рассчитанные толщины бислоя (магний + оксид ниобия).

Качественно приведенные результаты хорошо согласуются с толщинами, полученными для слоёв пленок чистого магния и чистого оксида ниобия [5]. Количественное соответствие (сумма толщин слоев магния и оксида ниобия должна быть равна толщине бислоя Mg/Nb-O в многослойной структуре) не абсолютное, погрешность достигает 30 %. Однако этот результат вполне объясним, поскольку точность расчетов рефлектограмм в значительной степени зависит от структурного совершенства межфазной границы. Рассчитанные значения толщины бислоев позволили, во-первых, оценить толщину отдельных слоев магния, а во-вторых, рассчитать толщину бислоя для каждого из образцов, напыленных на ситалловые подложки и использованных для резистивных измерений.

На рис. 4 показана зависимость электрического сопротивления многослойной структуры Mg/NbO от номинальной толщины бислоя. Термин «номинальной» означает, что толщина для каждого образца рассчитана на основе четырех экспериментально определенных значений (см. таблицу), а не определена в результате измерения. Следует подчеркнуть, что увеличение толщины бислоя происходит за счет увеличения толщины слоя магния, прослойка из оксида ниобия во всех образцах оставалась постоянной (~0,96 нм).

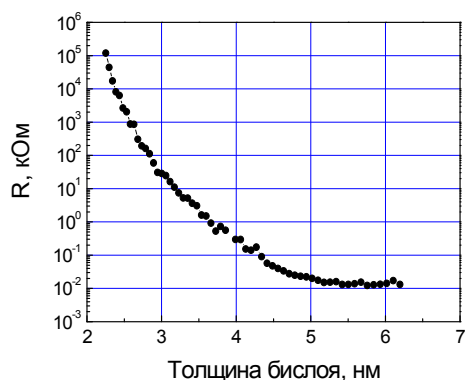


Рис. 4. Зависимость электрического сопротивления многослойной структуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  от номинальной толщины одного бислоя

Зависимость электрического сопротивления многослойной структуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  имеет нелинейный характер. Увеличение толщины одного бислоя в два раза (с 2,2 до 4,4 нм) уменьшает сопротивление структуры на шесть порядков. При дальнейшем росте толщины (от 5 нм) сопротивление практически не меняется. Данная зависимость аналогична зависимостям сопротивления композитных материалов  $\text{Ni}/\text{NbO}$  от концентрации металлической фазы [8]. В композитах подобный вид зависимости связывается с изменением механизма электропереноса при переходе концентрации металлической фазы через порог перколяции. Логично предположить, что в случае многослойной структуры  $\text{Mg}/\text{NbO}$  происходит нечто аналогичное. Очевидно, что в том случае, когда толщина бислоев составляет 5 нм и более, сопротивление многослойной структуры определяется переносом электронов по слоям магния. Тонкие слои оксида ниобия, полученного напылением, не вносят определяющий вклад в проводимость – слои магния шунтируют их. При толщинах бислоя менее 4 нм (т.е. при номинальных толщинах магния менее 3 нм) слои магния могут быть не сплошными. Это косвенно подтверждается данными малоугловой рефлектометрии (рис. 3, образец № 1 и № 2). В этом случае формируемая структура оказывается подобна композиту: металлическая фаза представляет собой не сплошные слои, а нанометровые области магния, расположенные изолированно друг от друга в объеме диэлектрика (рис. 5, а). Электроперенос такой структуры определяется прыжковой проводимостью, с соответствующими высокими значениями электросопротивления [11].

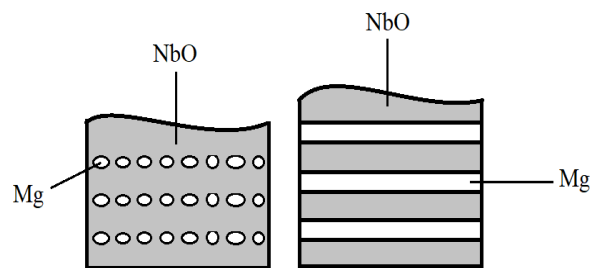


Рис. 5. Схема многослойной структуры  $\text{Mg}/\text{NbO}$  для различной толщины слоёв магния: а - дискретные слои из гранул магния; б - сплошные магниевые слои

Потенциальная область применения многослойной наноструктуры  $\text{Mg}/\text{NbO}$  – адсорбция водорода. Поскольку обычные методики наводороживания твердотельных материалов предполагают их нагрев – крайне важным является вопрос о термической стабильности полученной наноструктуры. Для её исследования проводилось измерение сопротивления многослойных пленок при нагреве в вакууме 0,1 Торр. Полученные температурные зависимости электросопротивления приведены на рис. 6.

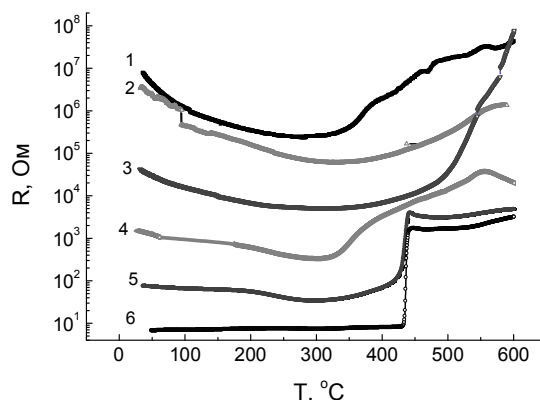


Рис. 6. Температурная зависимость сопротивления многослойной структуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  с различной толщиной бислоя: 1 - 2,3 нм; 2 - 2,5 нм; 3 - 2,8 нм; 4 - 3,4 нм; 5 - 4,4 нм; 6 - 6 нм.

Для образцов со сравнительно небольшой толщиной слоя магния ( $< 4$  нм) при увеличении температуры до 300 °C сопротивление монотонно уменьшается, после чего начинает возрастать и увеличивается с ростом температуры на всем интервале 300 – 600 °C. Первоначальное уменьшение сопротивления при нагреве связано с неметаллическим типом проводимости, что согласуется с утверждением об отсутствии сплошных слоёв магния. Иными словами, структура образцов представляет собой многослойный композиционный материал, в котором магний представлен в виде металлических гранул, расположенных между

слоями диэлектрика.

При достижении температуры 300 °С в образцах инициируются процессы миграции атомов металла, что приводит к существенному уменьшению дефектности диэлектрической матрицы (в данном случае – оксида ниобия). Об этом свидетельствует рост сопротивления образцов. Так как электроперенос в слоисто-композитных структурах осуществляется путем туннелирования носителей заряда между гранулами либо непосредственно, либо через дефекты диэлектрической матрицы, уменьшение числа структурных дефектов будет приводить к снижению интенсивности процесса туннелирования [9] и, как следствие, к росту сопротивления. В силу малой концентрации металла в образце, гранулы магния отделены друг от друга широким слоем диэлектрика, что в совокупности с низкой дефектностью матрицы обуславливает высокое значение сопротивления.

Другой причиной роста сопротивления в интервале температур 300 – 600 °С может быть окисление магния. Доказательствами данного предположения являются температурные зависимости сопротивления многослойных структур, в которых толщина слоёв магния превышает 4 нм и они представляют собой сплошные слои (кривые 5 и 6 на рис. 6). В интервале температур 20 - 300 °С сопротивление этих структур возрастает, что свидетельствует о металлическом характере проводимости через сплошные магниевые прослойки. Однако при нагреве этих образцов до 430 °С их электросопротивление резко возрастает на два - три порядка. При охлаждении этих образцов знак температурного коэффициента сопротивления меняется на противоположный (отрицательный, на рис. 6 не показано), что говорит об изменении типа электропереноса с металлического на неметаллический.

Несмотря на значительное изменение сопротивления исследованных образцов при нагреве до 400 - 450 °С, многослойность данных структур сохраняется. Этот вывод можно сделать на основе сопоставления данных по малоугловой рефлектометрии образцов, находящихся в исходном состоянии, и тех же образцов, подвергнутых 4-х часовому отжигу в вакууме 0,1 Торр при температуре 450 °С (рис. 7).

Очевидно, что характер представленных зависимостей слабо меняется после термической обработки, что свидетельствует о сохранении структуры, на которой происходит ди-

фракция рентгеновского излучения. В случае разрушения слоистой структуры, которая могла бы происходить вследствие межфазного взаимодействия или взаимодиффузии элементов между соседними слоями, малоугловая дифракция принимала бы совершенно другой вид - характерный для гомогенных образцов. При этом никакого подобия в дифракционной картине от исходных образцов и отожженных не наблюдалось бы.

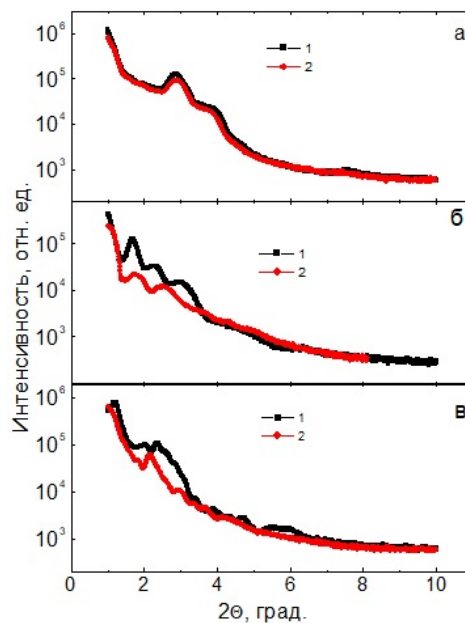


Рис. 7. Результаты малоугловой рентгеновской рефлектометрии образцов многослойной структуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  в исходном состоянии (1) и после отжига в вакууме при 450 °С (2): а – толщина бислоя 6 нм, б – толщина бислоя 4.1 нм, в – толщина бислоя 2,7 нм.

## Выводы

Последовательное осаждение магния и оксида ниобия на перемещающиеся подложки через V-образный экран позволяет формировать многослойную структуру  $\text{Mg}/\text{NbO}$  с изменяющейся толщиной прослоек магния. Используемая технология позволила получить многослойную наноструктуру  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ , в которой толщина бислоев  $(\text{Mg}+\text{NbO})$  меняется от 2,2 до 6,2 нм.

Установлено, что зависимость электрического сопротивления многослойной наноструктуры  $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$  от толщины бислоя аналогична концентрационной зависимости сопротивления в композитах  $\text{Ni}-\text{NbO}$ , что позволяет предполагать изменение морфологии полученных многослойных структур при увеличении номинальной толщины слоёв магния (переход от композитной морфологии к многослойной).



При толщинах бислоя менее 4 нм слои магния не являются сплошными, а сформированы из дискретных наноразмерных гранул металла. При толщине бислоя более 4 нм слои магния становятся сплошными.

Многослойная структура Mg/NbO термостойчива: отжиг при 450 °C в течение 4 часов не приводит к её разрушению.

Установлено, что электрическое сопротивление многослойной наноструктуры (Mg/NbO)<sub>82</sub> со сплошными слоями магния резко возрастает на два-три порядка при температуре 430 °C в вакууме 0,1 Торр. Предполагается, что это связано с окислением проводящих слоев магния.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-02-05920).*

#### Литература

1. Тарасов Б.П. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов / Б.П. Тарасов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. - №12. – С.14-37.
2. Андриевский Р.А. Водород в наноструктурах/ Р.А. Андриевский // УФН. – 2007. – Т.177. -№7.- С. 721-735.

3. Microscopic Study on Hydrogenation Mechanism of MgH<sub>2</sub> Catalyzed by Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / I. Shigehito, A. Umeda, T. Wakasugi, T. Ma, R. Yamagami // Materials transactions. – 2014. – V.55. – P. 1175-1178.

4. Kinetic investigation of the effect of milling time on the hydrogen sorption reaction of magnesium catalyzed with different Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents // G. Barkhordarian, T. Klassen, R. Bormann // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. - V. 407. – P. 249–255

5. Получение многослойных образцов Mg/NbO / О.В. Стогней, А.В. Ситников, А.Н. Смирнов, К.И. Семенов, В.В. Черниченко // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2006. - Т. 12- № 6. - С. 18 – 23.

6. Polarized neutron reflectometry: Recent developments and perspectives / G. P. Felcher, S. G. E. Te Velthuis, A. Rühm, W. Donner // Physica B. - 2001. - V.297. - P.87-93.

7. Als-Nielsen J. Elements of Modern X-ray Physics/ J. Als-Nielsen, D. McMorrow // New York: John Wiley & Sons, 2011. – 434 p.

8. Влияние типа матрицы на магнитотранспортные свойства композитных систем Ni-AlO и Ni-NbO / О.В. Стогней, А.Дж. Аль-Малики, А.А. Гребенников, К.И. Семенов, Е.О. Буловацкая // Физика и техника полупроводников. – 2016. - №6. - С.724-730.

9. Change of the electrical properties of the granular CoFeB-SiO nanocomposites after heat treatment / O.V. Stogney, V.A. Slyusarev, Yu.E. Kalinin et al // Microelectronics Engineering. -2003.-V.69.- №2-4.-P.476-479.

Воронежский государственный технический университет

## THERMAL STABILITY OF MULTILAYER Mg/NbO NANOSTRUCTURE

O.V. Stogney<sup>1</sup>, A.N. Smirnov<sup>2</sup>, A.V. Sitnikov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: sto@sci.vrn.ru

<sup>2</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: deadpunk@mail.ru

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail:sitnikov04@mail.ru

A multilayer (Mg/NbO)<sub>82</sub> nanostructure containing 82 bilayers (Mg + NbO) was obtained by ion beam-sputtering of oxide (NbO) and metal (Mg) targets followed by deposition of material through an asymmetric shield onto substrates rotating around the targets. According the results of small-angle X-ray reflectometry the thickness of bilayers in the obtained structures varies from 2.2 nm to 6.2 nm. When the bilayer thickness is less than 4 nm the magnesium layers are not continuous but are a collection of discrete nanoscale magnesium granules. In a case of larger thicknesses of the bilayers the magnesium forms solid layers. It was found that depending on the morphology of the magnesium layers the temperature dependence of the electrical resistivity of the (Mg/NbO)<sub>82</sub> nanostructure is significantly different. For samples with a low magnesium content the temperature dependence of the resistance is identical to the temperature dependence of the resistance of nanocomposite films which are before the percolation threshold. For samples with a continuous layer of magnesium a different picture is observed: due to the oxidation of metal layers at 430 °C the resistivity of the multilayer structure sharply increases by 1-2 orders of magnitude. It is shown that the (Mg/NbO)<sub>82</sub> nanostructure is thermally stable and is not be destroyed when is annealed in vacuum for 4 hours at 450 °C

Key words: ion beam deposition, small-angle X-ray reflectometry, multilayer nanostructure, thermal stability

## References

1. Tarasov B.P. "Method of hydrogen storage", *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya»*, 2005, № 12, pp. 14-37.
2. Andrievskij R.A. "Hydrogen in nanostructures", *UFN*, 2007, vol. 177, no. 7, pp. 721-735.
3. Shigehito I., Umeda A., Wakasugi T., Ma T., Yamagami R. "Microscopic Study on Hydrogenation Mechanism of MgH<sub>2</sub> Catalyzed by Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>", *Materials transactions*, 2014, vol. 55, pp. 1175-1178.
4. Barkhordarian G., Klassen T., Bormann R. "Kinetic investigation of the effect of milling time on the hydrogen sorption reaction of magnesium catalyzed with different Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> contents", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 407, 2006, pp. 249-255.
5. Stognei O.V., Sitnikov A.V., Smirnov A.N., Semenenko K.I., Chernichenko V.V. "Obtaining samples of multilayer Mg/NbO", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 6, pp. 18 – 23.
6. Felcher G.P., Te Velthuis S.G. E., Rühm A., Donner W. "Polarized neutron reflectometry: Recent developments and perspectives", *Physica B*, 2001, vol. 297, pp. 87-93.
7. Fedosyuk Als-Nielsen J., McMorro D. *Elements of Modern X-ray Physics*, New York: John Wiley & Sons, 2011, 434 p.
8. Stognei O.V., Maliki A.J., Grebennikov A.A., Semenenko K.I., Bulovatskaya E.O., Sitnikov A.V. "Matrix-type effect on the magnetotransport properties of Ni–AlO and Ni–NbO composite systems", *Semiconductors*, 2016, vol. 50 (6), pp. 709-714.
9. Stognei O.V., Slyusarev V.A., Kalinin Yu.E. et al. "Change of the electrical properties of the granular CoFeB-SiO nanocomposites after heat treatment", *Microelectronics Engineering*, 2003, vol. 69, no. 2-4, pp. 476-479.



## ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНОГО ОКСИДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА Р-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

© 2017 Ю.В. Панин, И.С. Ильяшев, Ю.Е. Калинин, А.А. Камынин, К.Г. Королев

В работе рассмотрены вопросы повышения термоэлектрической добротности известных термоэлектрических материалов. Существенный прорыв в достижении высокой термоэлектрической добротности ( $ZT$ ) материалов был осуществлен в 50-х годах прошлого века благодаря реализации выдвинутой А.Ф. Иоффе концепции полупроводниковых твердых растворов, которая в дальнейшем была реализована на практике. В последние годы наметился новый прорыв в повышении  $ZT$  термоэлектрических материалов, основанный на концепции создания наноструктурных термоэлектрических материалов.

С учетом последних тенденций повышения термоэлектрической добротности в работе исследовано влияние наноразмерного оксидного наполнителя на термоэлектрические характеристики композиционного материала на основе твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ , на основе теллурида висмута и сурьмы в интервале температур от 20 до 320 °С. Образцы для исследований синтезированы по керамической технологии методом горячего прессования с концентрацией наноразмерного оксидного наполнителя до 0.52 масс. %. Установлено, что введение оксидного наноразмерного наполнителя приводит к увеличению термоЭДС, электропроводности и снижению коэффициента теплопроводности. Показано, что термоэлектрическая добротность получаемых композитов достигает максимальных значений  $ZT = 1,2\text{--}1,43$  при концентрации оксидного наполнителя 0,1-0,3 масс. %

Ключевые слова: нанокompозиты, электрические свойства, термоЭДС, удельное электрическое сопротивление, коэффициент теплопроводности

### Введение

В последние годы весьма актуальным является применение термоэлектрических генераторов для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Принцип работы таких преобразователей основан на эффекте Зеебека, а коэффициент полезного действия ограничен крайне малой величиной термоэлектрической добротности известных в настоящее время термоэлектрических материалов [1]. Поэтому активно ведутся работы по синтезу новых термоэлектрических материалов с высокой добротностью [2]. Существенный прорыв в достижении высокой термоэлектрической добротности материалов был осуществлен в 50-х годах прошлого века благодаря реализации выдвинутой А.Ф. Иоффе концепции полупроводниковых твердых растворов, которая в дальнейшем была реализована на практике [3]. Тогда наибольшее значение термоэлектрической добротности ( $ZT$ )<sub>max</sub> составило 0.75. В настоящее время, скорее всего, метод твердых раство-

ров себя исчерпал, и за последующие 50 лет удалось повысить это значение лишь до 1.

Только в самом конце XX – начале XXI веков наметился новый прорыв в повышении  $ZT$  термоэлектрических материалов, основанный на концепции создания наноструктурных термоэлектрических материалов.

Особенности электронной структуры наноразмерных объектов могут приводить к значимому увеличению коэффициентов, характеризующих эффективность термоэлектрического преобразования.

Эти особенности обусловлены тем, что в наноразмерном состоянии увеличивается плотность энергетических состояний вблизи уровня Ферми, а также с возникновением большого числа границ раздела, атомных дефектов и других структурных несовершенств, которые эффективно рассеивают фононы, но при этом оказывают малое влияние на транспорт носителей заряда. За счет рассеяния фононов на точечных дефектах и на границах уменьшается решеточная теплопроводность. В результате этого добротность наноразмерного термоэлектрика возрастает в сравнении с монокристаллическим образцом [4,5]. Применение нанотехнологий актуально и в части повышения величины коэффициента Зеебека. Тогда, как предсказывает теория, если размеры зерен таких материалов будут <10 нм, возможно увеличение ( $ZT$ )<sub>max</sub> до 3.5 [2].

---

Панин Юрий Васильевич – ВГТУ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: yu.panin62@yandex.ru  
Ильяшев Илья Сергеевич – ВГТУ, студент, e-mail: zengaming@mail.ru

Калинин Юрий Егорович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: kalinin48@mail.ru

Камынин Алексей Александрович – ВГТУ, инженер, e-mail: silentcurve@gmail.com

Королев Константин Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: korolev.kg@mail.ru

Возможное повышение термоэлектрической добротности связано также с введением в поликристаллический материал наночастиц другого материала [6,7]. Решеточная теплопроводность в наноразмерном гетерофазном термоэлектрическом материале может быть снижена за счет рассеяния фононов на границах раздела фаз, а термоЭДС в таких структурах может быть увеличена при изменении плотности состояний вблизи уровня Ферми или благодаря эффекту энергетической фильтрации носителей заряда.

В связи с этим в последнее время появился новый тип термоэлектрических материалов на основе твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ , технология изготовления которых основана на армировании термоэлектрической матрицы наноразмерными частицами. Введение в термоэлектрическую матрицу высокодисперсных наполнителей преследует цель максимального повышения отношения электропроводности к теплопроводности получаемого композиционного материала. Технология получения термоэлектрического композиционного материала в этом случае должна обеспечивать равномерное распределение наполнителя в объеме термоэлектрической матрицы, а размер частиц наполнителя должен быть меньше длины свободного пробега фононов. Только в этом случае фононы будут интенсивно рассеиваться, что приведёт к снижению теплопроводности композита.

Получение в термоэлектрическом материале равномерного распределения термически стабильных и не взаимодействующих с матрицей наноразмерных частиц в температурном диапазоне эксплуатации термоэлектрического композита возможно только искусственным путём в результате применения специфических технологических приёмов получения композита. При этом активное воздействие на структуру получаемого композита позволяет в широких пределах регулировать не только термоэлектрические, но и физико-механические свойства при неизменном химическом составе матричного материала. Так, в работах [8,9] в качестве наполнителя термоэлектрической матрицы использовали наноразмерные порошки оксидов алюминия, кремния, олова, цинка, циркония, иттрия, кобальтаты лантана, карбиды, фуллерены, углеродные нанотрубки и др. Введение нанодисперсных наполнителей позволило повысить температуру рекристаллизации и снизить теплопроводность термоэлектрического

материала с 1,5 Вт/м·К до 0,6 Вт/м·К за счёт рассеяния фононов на границах раздела фаз. Таким образом, введение указанных наноразмерных наполнителей в матрицу на основе халькогенидов висмута позволяет повысить термоэлектрическую добротность и жаропрочность материала и, как следствие, расширить температурный диапазон эксплуатации. Однако несмотря на указанные достоинства, производство термоэлектрических композитов на основе халькогенидов висмута с различными нанодисперсными наполнителями не освоено. Основными причинами этого являются отсутствие совершенных способов изготовления и промышленной технологии.

Наиболее перспективным способом получения термоэлектрических композиционных материалов является проведение синтеза наноразмерных частиц наполнителя непосредственно в матрице термоэлектрического сплава. Этот способ может быть реализован методом механического легирования, включающим совместную обработку порошковых смесей матричного термоэлектрического материала и наполнителя в высокоэнергетической шаровой планетарной мельнице [10]. В процессе механического легирования образуются гранулы композиционного материала, состоящие из матрицы термоэлектрического материала и равномерно распределённых в ней наноразмерных частиц наполнителя. Полученные гранулы компактируются в заготовку методом горячего прессования.

Целью данной работы является исследование влияния оксидного наполнителя на термоэлектрические характеристики получаемых композитов с матрицей на основе стандартных сплавов теллурида висмута и сурьмы р-типа проводимости в интервале температур от 20 до 320 °С.

## 1. Образцы и методика эксперимента

Анализ известных способов армирования металлических матриц тугоплавкими соединениями и проведенные собственные исследования показали, что матрица стандартных термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута и сурьмы р-типа проводимости может быть армирована оксидами путём применения новых технологических приёмов, дополняющих традиционную технологию порошковой металлургии. Образцы для исследований получали по стандартной керамической технологии, включающей несколько этапов. Применительно

к стандартному термоэлектрическому материалу состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  p-типа проводимости были проведены исследования по наполнению его оксидами в количестве от 0,1 до 0,52 масс. %. После этого образцы подвергали горячему прессованию при температуре  $T = 643 \text{ K}$  и давлении  $P = 500 \text{ МПа}$  с выдержкой в течение 5 мин с получением заготовок размером  $34 \times 28 \times 15 \text{ мм}^3$ .

Исследования термоэлектрических свойств полученных образцов проводились на установке АЛТЕК – 10001. Для исследований термоэлектрических свойств использовали образцы размером  $(6 \times 10 \times 15) \text{ мм}^3$ , вырезанные в направлении, перпендикулярном оси сжатия.

## 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 представлены температурные зависимости термоЭДС для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя.

Наиболее высокие значения термоЭДС реализуются в термоэлектрике состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с величиной оксидного наполнителя  $\sim 0,19$  масс. % (кривая 2).

На рис. 2 представлены температурные зависимости электрической проводимости для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя.

С увеличением температуры электрическая проводимость всех исследованных образцов уменьшается, что характерно для вырожденных полупроводников.

Наиболее высокие значения электрической проводимости во всем интервале температур реализуются в термоэлектрике состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа с величиной оксидного наполнителя 0,31 % (кривая 4).

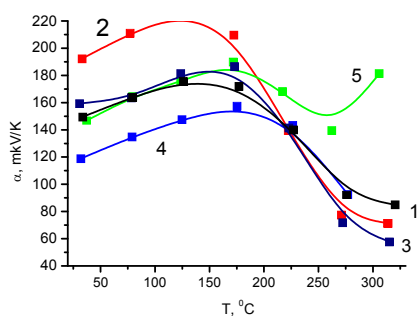


Рис. 1. Температурные зависимости термоЭДС для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя, масс. %: 1 - 0,13; 2 - 0,19; 3 - 0,25; 4 - 0,31; 5 - 0,52

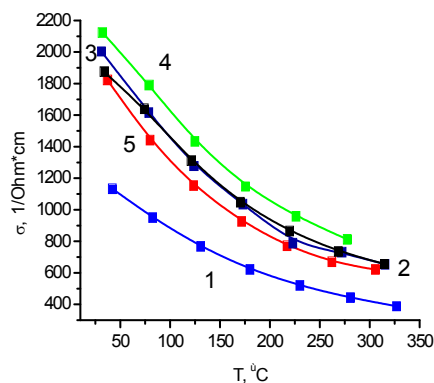


Рис. 2. Температурные зависимости электрической проводимости для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя, масс. %: 1 - 0,13; 2 - 0,19; 3 - 0,25; 4 - 0,31; 5 - 0,52

С ростом температуры теплопроводность падает для всех исследованных образцов. Наиболее низкие значения коэффициента теплопроводности реализуются в термоэлектрике состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с концентрацией оксидного наполнителя 0,2 % (кривая 2).

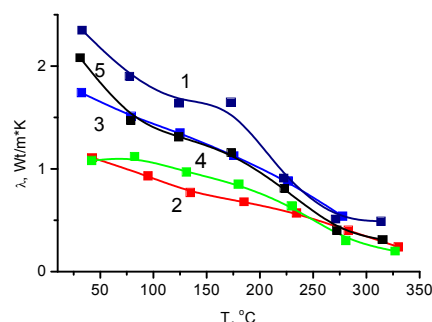


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности для образцов состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя, масс. %: 1 - 0,19; 2 - 0,2; 3 - 0,24; 4 - 0,25; 5 - 0,31

Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $Z$  исследуемых образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_3$  – p-типа проводимости с разной концентрацией оксидного наполнителя, рассчитанной по уравнению

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС;  $\sigma$  – удельная электрическая электропроводность;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, представлены на рис. 4.

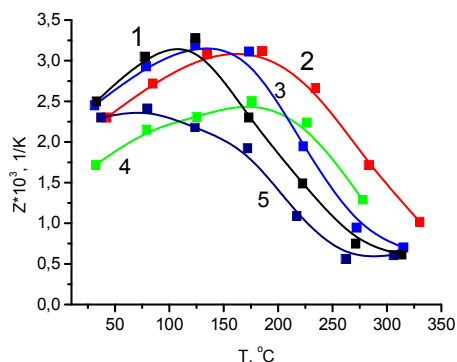


Рис. 4. Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $Z$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя, масс. %: 1 - 0,19; 2 - 0,20; 3 - 0,25 ; 4 - 0,31; 5 - 0,52

Наиболее высокие значения термоэлектрической добротности реализуются в термоэлектрике состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с концентрацией оксидного наполнителя: 0,19 масс. % (кривая 1), 0,25 масс. % (кривая 3) и 0,20 масс. % (кривая 2). Характерной особенностью представленных кривых является наблюдаемая закономерность смещения максимума термоэлектрической добротности с изменением условий введения и концентрации оксидного наполнителя.

Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $ZT$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя представлены на рис. 5. Наиболее высокие значения термоэлектрической добротности реализуются в термоэлектрике состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с концентрацией оксидного наполнителя 0,19 масс. % (кривая 3), 0,25 масс. % (кривая 4) и 0,20 масс. % (кривая 5).

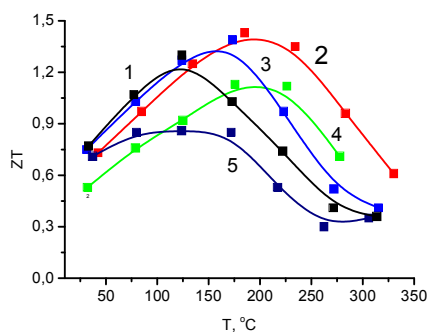


Рис. 5. Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $ZT$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя, масс. %: 1 - 0,19; 2 - 0,20; 3 - 0,25 ; 4 - 0,31; 5 - 0,52

Однако вследствие более высоких температур последнего максимума его значение на зависимости  $ZT(T)$  в отличие от рис. 4 оказывается более высоким по сравнению с другими. Закономерность смещения максимума термоэлектрической добротности с изменением условий введения и концентрации оксидного наполнителя сохраняется и в этом случае.

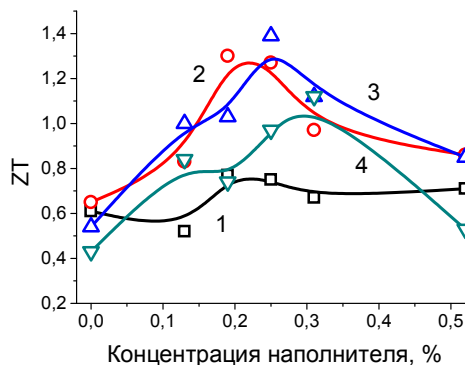


Рис. 6. Зависимости термоэлектрической добротности  $ZT$  от концентрации оксидного наполнителя образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости, измеренные при температурах исследований: 1- 35; 2- 125; 3- 180; 4 – 230 °C

Зависимости термоэлектрической добротности  $ZT$  от концентрации оксидного наполнителя образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости, измеренные при разных температурах, представлены на рис. 6. При концентрации оксидного наполнителя 0.2 - 0.31 масс. % наблюдается максимум термоэлектрической добротности при всех температурах исследований 35 °C (кривая 1), 125 °C (кривая 2), 180 °C (кривая 3) и  $T = 230$  °C (кривая 4). Наибольшие значения термоэлектрической добротности  $ZT$  в этом случае наблюдаются при температурах около 125 °C (кривая 2) и 180 °C (кривая 3).

Анализ полученных результатов показал, что введение оксидного наполнителя способствует росту термоЭДС, электропроводности и снижению коэффициента теплопроводности в результате рассеяния фононов на границах зерен, содержащих оксидный наполнитель. При этом наблюдается наиболее оптимальная концентрация оксидного наполнителя (0,1-0,3 масс. %), введение которого в традиционный термоэлектрический материал состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  р-типа проводимости позволяет повысить термоэлектрическую эффективность материала до  $ZT = 1,2-1,43$ .

## Закключение

Методом двухстадийного (холодного и горячего) прессования синтезированы образцы термоэлектрика состава  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  – р-типа проводимости с различной концентрацией оксидного наполнителя. Исследовано влияние концентрации оксидного наполнителя на термоЭДС, электрическую проводимость, коэффициент теплопроводности и термоэлектрическую добротность синтезированных образцов.

Установлено, что введение в состав термоэлектрика  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  р-типа проводимости оксидного наполнителя с концентрацией 0,1-0,3 масс. % позволяет повысить термоэлектрическую эффективность материала до  $ZT = 1,2-1,43$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 (Договор № 03.G25.31.0246).*

## Литература

1. Сорокин А.И. Составной генераторный термоэлемент на рабочий диапазон температур 30-320 °C / А.И. Сорокин // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 7. – С. 884-886.

2. Иванова Л.Д. Термоэлектрические материалы для различных температурных уровней / Л.Д. Иванова // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 7. – С. 948-951.

3. Гриднев С.А. Термоэлектрические материалы: учеб. пособие / С.А. Гриднев. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2014. – 130 с.

4. Термоэлектрические эффекты в наноразмерных слоях силицида марганца/ И.В. Ерофеева, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, Ю.М. Кузнецов, А.В. Здоровейцев, Е.А. Питиримова // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50. – Вып. 11. – С. 1456-1461.

5. Термоэлектрические свойства лент  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ , полученных методом спиннингования расплава/ А.Т. Бурков, С.В. Новиков, Х. Танг, Я. Ян // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1068-1070.

6. Enhanced thermoelectric performance of  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  by synergistical action of bromine substitution and copper nanoparticles/ Z. Liu et al // Nano Energy. – 2015. – V. 13. – P. 554-562.

7. Shi X. Recent advances in high-performance bulk thermoelectric materials/ X. Shi, L. Chen & C. Uher // International Materials Reviews. – 2016. – V. 61. – № 6. – P. 379-415.

8. Патент США №7309830, H01L 35/26, от 18.12.2007 Nanostructured bulk thermoelectric material.

9. Патент Китая CN 1807666, C22C 1/05, C22C 29/00, B22F 29/04, от 26.07.2006.

10. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твёрдых веществ/ В.В. Болдырев //Успехи химии. – 2006. – Т.75. – № 3. – С. 203-216.

Воронежский государственный технический университет

## NANOSIZED OXIDE FILLER INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF P-TYPE CONDUCTIVITY BISMUTH CHALCOGENIDES

**Yu.V. Panin<sup>1</sup>, I.S. Il'yashev<sup>2</sup>, Yu.E. Kalinin<sup>3</sup>, A.A. Kamynin<sup>4</sup>, K.G. Korolev<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Senior Researcher, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: yu.panin62@yandex.ru

<sup>2</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: zengaming@mail.ru

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalinin48@mail.ru

<sup>4</sup>Engineer, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: silentcurve@gmail.com

<sup>5</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: korolev.kg@mail.ru

The paper considers the issues of increasing the thermoelectric quality factor of the known thermoelectric materials. A significant breakthrough in achieving high thermoelectric Q (ZT) of the materials was carried out in 1950s, thanks to the introduction of Ioffe concept of semiconductor solid solutions, which was further implemented in practice. In recent years, there has been a new breakthrough in enhancing the ZT of thermoelectric materials based on the concept of creating nanostructured thermoelectric materials.

Taking into account the recent trends in increasing thermoelectric Q, we have studied the effect of nanosized oxide filler on thermal characteristics of composite material based on solid solutions of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  in the temperature range from 20 to 320 °C. Samples for studies are synthesized by the ceramic technology by hot pressing with the nanosized oxide filler concentration to 0.52 wt. %. It is established that the introduction of oxide nanoscale filler leads to an increase in the thermal electromotive force, electrical conductivity and lower coefficient of thermal conductivity was found to be related to

the introduction of oxide nanoscale filler. As it follows from the data obtained, the thermoelectric  $Q$  of composites obtained reaches the maximum values  $ZT = 1.2-1.43$  in case of oxide filler concentration 0.1-0.3 wt. %

Key words: nanocomposites, electrical properties, thermal electromotive force, electrical resistivity, thermal conductivity coefficient

### References

1. Sorokin A.I. "Segmented thermoelectric unicouple for an operating temperature range of 30-320A degrees C ", *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 7, - pp. 847-849.
2. Ivanova L.D. "Thermoelectric materials for different temperature levels ", *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no 7, pp. 909-912.
3. Gridnev S.A. "Thermoelectric materials " ("Termoelectricheskie materialy"), Voronezh, VGTU, 2014, 130 p.
4. Erofeeva, I. V.; Dorokhin V.V.; Lesnikov, V. P.; and al. "On the crystal structure and thermoelectric properties of thin  $\text{Si}_{1-x}\text{Mn}_x$  films", *Semiconductors*, 2016, vol. 50, no. 11, pp. 1453-1457.
5. Burkov, AT .; Novikov, SV .; Tang, X.; Yan, Y. "Thermoelectric properties of  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  ribbons prepared by melt spinning C", *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 8, pp. 1024-1026.
6. Liu, Z. et al. "Enhanced thermoelectric performance of  $\text{Bi}_2\text{S}_3$  by synergistical action of bromine substitution and copper nanoparticles ", *Nano Energy*, 2015, vol. 13, pp. 554-562.
7. X. Shi, L. Chen & C. Uher. "Recent advances in high-performance bulk thermoelectric materials", *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 6, pp. 379-415.
8. Patent USA №7309830, H01L 35/26, от 18.12.2007 Nanostructured bulk thermoelectric material.
9. Patent China CN 1807666, C22C 1/05, C22C 29/00, B22F 29/04, от 26. 07. 2006.
10. Boldyrev V.V. "Mechanochemistry and mechanical activation of solids", *Russian Chemical Reviews*, 2006, vol. 75, issue 3, pp. 177-189.