

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Нечеткое регулирование процесса подачи греющего пара в рамках автоматизированной системы управления технологическим процессом вулканизации автомобильных шин <b>А.А. Митрохин, В.Л. Бурковский</b> .....	7
Разработка модели функционирования обрабатывающего центра с применением нечетких временных сетей Петри <b>В.А. Мустафаев, М.Н. Салманова</b> .....	13
Программная реализация приложения с использованием нейронных сетей для восстановления изображений после сжатия с потерями <b>В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, С.Л. Кенин, Д.А. Юров</b> .....	20
Разработка системы управления строительным 3D-принтером на основе нейроконтроллера <b>В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский</b> .....	29
Схема коммутаций для выполнения парных операций в реконфигурируемом производственном устройстве <b>Е.А. Титенко</b> .....	34
Синтез нечеткого регулятора для медицинских приборов аспирации <b>Е.С. Шарапова, В.Л. Бурковский</b> .....	41

### Энергетика

Использование солнечного излучения при применении энергоэффективных ограждающих конструкций <b>Р.А. Шепс, Н.В. Портнова, Т.В. Щукина, И.И. Переславцева</b> .....	46
Экспериментальное сравнение водоохладителя с центробежным слоем насадки и вентиляторной градирни <b>Ю.Н. Агапов, Д.А. Давыдов</b> .....	52
К созданию клеевых соединений повышенной теплопроводности модифицированных совместным воздействием электрическими и виброволновыми полями <b>Н.В. Мозговой, В.М. Попов, Д.В. Попов</b> .....	56
Расчет неравномерности распределения компонента по охлаждающим каналам камеры жидкостного ракетного двигателя на основе моделирования в ANSYS CFX <b>А.В. Кретинин, Д.Н. Галдин, Е.Е. Спицына, А.Н. Попков</b> .....	61
Вопросы повышения уровня энергосбережения автоматизированных электроприводов насосного оборудования на основе компенсации реактивной мощности <b>В.Н. Крысанов, К.В. Иванов</b> .....	66
Экспериментальные исследования энергоэффективности работы систем климатизации в офисном помещении <b>Д.В. Лобанов, Р.А. Шепс, Н.В. Портнова</b> .....	71
Влияние условий теплообмена на длительность нестационарных тепловых режимов поверхностного теплообменника <b>С.В. Дахин, В.И. Ряжских</b> .....	80
Численное моделирование теплообмена в жидкостных каналах термоэлектрического блока охлаждения <b>А.В. Кретинин, Д.Н. Галдин, Е.Е. Спицына, А.Н. Попков</b> .....	86
Определение оптимизационных подходов при проектировании системы охлаждения газового термоэлектрического генераторного модуля <b>К.В. Кружаев, Д.П. Шматов, К.В. Зубарев, И.Г. Перевезенцев</b> .....	93

### Радиотехника и связь

Эффективная архитектура на основе ПЛИС для полностью параллельного стохастического LDPC-декодера	
<b>А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Д.С. Андреева.....</b>	<b>101</b>
Анализ статистических методов испытаний и оптимизация расчёта надёжности при производстве электронных средств	
<b>А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов.....</b>	<b>108</b>
Прототипы, моделирующие систему передачи дискретной информации и помех фазоманипулированным методом	
<b>И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко, Т.Д. Ижокина.....</b>	<b>115</b>
Сравнение сложности аппаратной реализации и исправляющей способности стохастических декодеров с памятью отслеживания прогнозов (TFM) и внешней памятью (EM)	
<b>И.В. Свиридова.....</b>	<b>120</b>
Модель восприимчивости печатных плат к внешним электромагнитным воздействиям	
<b>В.В. Готов.....</b>	<b>125</b>
Разработка моделей формирования фазоманипулированных сигналов	
<b>И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко, Д.С. Андреева.....</b>	<b>129</b>

### Машиностроение и машиноведение

Повышение ресурсных характеристик технического титана путем оптимизации параметров газонасыщенных слоев	
<b>А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Б.А. Коломенский, И.В. Зубарев.....</b>	<b>135</b>

### Физика

Об особенностях воздействия температуры приэлектродного слоя на процессы получения электролитических металлов и сплавов	
<b>Ю.Н. Шалимов, А.В. Звягинцева, Д.Л. Шалимов, А.В. Руссу.....</b>	<b>141</b>
Влияние газовых добавок Ar, N <sub>2</sub> и N <sub>2</sub> O на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме	
<b>И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, И.И. Бородкин....</b>	<b>150</b>
Использование градиентных измерений магнитного поля для задач навигации и обнаружения	
<b>Е.А. Никитина, И.М. Голев, А.В. Сергеев.....</b>	<b>156</b>
Электрохимические технологии реализации систем безопасного хранения водорода	
<b>Ю.Н. Шалимов, А.В. Звягинцева, А.В. Помигуев, А.В. Руссу.....</b>	<b>163</b>

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Fuzzy regulation of feeding heating steam in the framework of automated control system of technological process of automobile tires vulcanization	
<b>A.A. Mitrokhin, V.L. Burkovskiy .....</b>	<b>7</b>
Development of the model of operation center functioning with the application of the fuzzy timed Petri nets	
<b>V.A. Mustafayev, M.N. Salmanova.....</b>	<b>13</b>
Software implementation of application using neural network to restore images after lossy compression	
<b>V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, S.L. Kenin, D.A. Yurov.....</b>	<b>20</b>
Development of control system of building 3D printer on the basis of neurocontroller	
<b>V.Zh. Bocharov, V.L. Burkovskiy.....</b>	<b>29</b>
Plugging chart for performance of pair operations in a reconfigurable production device	
<b>E.A. Titenko.....</b>	<b>34</b>
Synthesis of fuzzy regulator for medical aspiration devices	
<b>E.S. Sharapova, V.L. Burkovskiy.....</b>	<b>41</b>

### Energetics

Use of solar radiation at application energy efficient fencing constructions	
<b>R.A. Sheps, N.V. Portnova, T.V. Shchukina, I.I. Pereslavytseva.....</b>	<b>46</b>
Experimental comparison of the water cooler with nozzle centrifugal bed and cooling tower	
<b>Yu.N. Agapov, D.A. Davydov.....</b>	<b>52</b>
Obtaining high thermal conductivity adhesive joints by combined effect of the electric and vibration fields	
<b>N.V. Mozhgovoy, V.M. Popov, D.V. Popov.....</b>	<b>56</b>
Calculation of nonuniformity of the distribution of the component along the cooling channels of a liquid rocket engine chamber based on modeling in ANSYS CFX	
<b>A.V. Kretinin, D.N. Galdin, E.E. Spitsyina, A.N. Popkov.....</b>	<b>61</b>
Issues of increasing the level of energy saving of automated electric drives of pumping equipment based on compensation of reactive power	
<b>V.N. Krysanov, K.V. Ivanov.....</b>	<b>66</b>
Experimental studies of energy efficiency of climate systems work in the office space	
<b>D.V. Lobanov, R.A. Sheps, N.V. Portnova.....</b>	<b>71</b>
Influence of heat exchange conditions on duration of the non-stationary thermal modes of the superficial heat exchanger	
<b>S.V. Dakhin, V.I. Ryazhskikh.....</b>	<b>80</b>
Numerical modeling of heat exchange in liquid channels of thermoelectric cooling unit	
<b>A.V. Kretinin, D.N. Galdin, E.E. Spitsyina, A.N. Popkov.....</b>	<b>86</b>
Determination of optimization approaches in the designing of the cooling system of the gas thermoelectric generator module	
<b>K.V. Kruzhaev, D.P. Shmatov, K.V. Zubarev, I.G. Perevezentsev.....</b>	<b>93</b>

### Radio engineering and communication

An area-efficient FPGA-based architecture for fully-parallel stochastic LDPC decoding	
<b>A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, D.S. Andreeva.....</b>	<b>101</b>

Analysis of statistical methods of tests and optimization of calculation of reliability at the production of electronic devices <b>A.C. Kostyukov, I.S. Bobylkin, L.N. Nikitin, A.A. Pirogov.....</b>	<b>108</b>
Prototypes modeling a system of discrete information transmission and interference by phase-compensating method <b>I.V. Ostroumov, M.A. Romashchenko, T.D. Izhokina.....</b>	<b>115</b>
Comparison of difficulty of hardware implementation and corrective capacity of stochastic decoders with TFM and EM memory <b>I.V. Sviridova.....</b>	<b>120</b>
Model of printed boards susceptibility to external electromagnetic exposure <b>V.V. Glotov.....</b>	<b>125</b>
Development of the models of phase-shift keyed pulses formation <b>I.V. Ostroumov, M.A. Romashchenko, D.S. Andreeva.....</b>	<b>129</b>

**Mechanical engineering and science of machines**

Increasing the resource characteristics of the technical titan by optimizing the parameters of the gas-saturated layers <b>A.B. Kolomenskiy, S.V. Shakhov, B.A. Kolomenskiy, I.V. Zubarev.....</b>	<b>135</b>
---	------------

**Physics**

On the features of the impact of the near-lectrode layer temperature on the processes of obtaining electrolytic metals and alloys <b>Yu.N. Shalimov, A.V. Zvyagintseva, D.L. Shalimov, A.V. Russu.....</b>	<b>141</b>
Influence of gas additives Ar, N <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O on the kinetics of etching of lithium tantalate in fluorinated plasma <b>I.V. Konyaev, L.N. Vladimirova, E.N. Bormontov, V.A. Buslov, I.I. Borodkin.....</b>	<b>150</b>
The use of the magnetic field gradient measurements for navigation and detection problems <b>E.A. Nikitina, I.M. Golev, A.V. Sergeev.....</b>	<b>156</b>
Electrochemical technologies of implementation of systems for safe storage of hydrogen <b>Yu.N. Shalimov, A.V. Zvyagintseva, A.V. Pomiguyev, A.V. Russu.....</b>	<b>163</b>



## *Информатика, вычислительная техника и управление*

УДК 681.3

### **НЕЧЕТКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ ГРЕЮЩЕГО ПАРА В РАМКАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ВУЛКАНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН**

© 2018 А.А. Митрохин, В.Л. Бурковский

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

**Аннотация:** рассматривается проблема управления технологическим процессом вулканизации автомобильных шин с позиции потенциально опасного процесса. Системы управления потенциально опасными технологическими процессами должны подвергаться постоянному развитию и совершенствованию в связи с неоспоримой важностью обеспечения должного контроля качества, так как потенциально опасные технологические процессы представляют собой сложно формализуемые системы, функционирующие в условиях неопределенности, неполноты знаний и нечеткости описаний как самой системы, так и действующих на нее сигналов. В этой связи для управления такими системами уже недостаточно применения классических методов теории управления и необходима разработка новых методов и подходов. Один из таких подходов базируется на нечетком множестве и нечеткой логике Л. Заде. Анализируется целесообразность использования нечеткого регулятора для регулирования температуры в контуре внешнего нагрева процесса вулканизации автомобильных шин за счет изменения объема подачи греющего пара. Рассматривается структура автоматизированной системы управления технологическим процессом вулканизации шины на основе аппарата нечеткой логики, а также приведены результаты двухпозиционного регулирования и пропорционально-интегрально-дифференциального регуляторов, применяемых при регулировании температуры в контуре внешнего нагрева процесса вулканизации автомобильных шин, проведен качественный анализ традиционных регуляторов относительно регулирования параметров сложных систем управления. Доказана необходимость и целесообразность использования нечеткого регулятора применительно к регулированию температуры в контуре внешнего нагрева процесса вулканизации автомобильных шин для улучшения качества выпускаемой продукции

**Ключевые слова:** нечеткий регулятор, опасное производство, вулканизация

#### **Введение**

В настоящее время системы автоматизированного управления потенциально опасными технологическими процессами представляют собой сложно формализуемые системы, функционирующие в условиях неопределенности, неполноты знаний и нечеткости описаний как самой системы, так и действующих на нее сигналов. Это привело к выводу, что для управления такими системами уже недостаточно применения классических методов теории управления и необходима разработка новых методов и подходов. Один из таких подходов базируется на нечетком множестве и нечеткой логике Л. Заде.

Это привело к большему освоению технологии искусственного интеллекта в системах автоматизированного управления потенциально опасными процессами.

Следует отметить, что все сложные системы в той или иной степени являются

неопределенными. Неопределенности могут быть:

- экзогенными, определяемыми внешними воздействиями;
- координатными (не полностью и не точно известен вектор состояния);
- параметрическими;
- структурными, связанными с наличием паразитной динамики.

Не учитываемые неопределенности ухудшают качество автоматизированных систем управления и могут привести к потере их работоспособности. Поэтому повышение эффективности функционирования современных автоматизированных систем управления процессом вулканизации приводит к необходимости выявления и учета следующих видов неопределенностей, характерных для процесса управления сложными системами:

- низкая точность оперативной информации, получаемая с полевых устройств объекта управления, возникающая ввиду большой погрешности замеров

технологических параметров, невысокой надежности датчиков, отказов каналов связи, запаздывания при получении информации о показателях и параметрах. Наличие такого вида неопределенности вызывает неточность в задании переменных величин в моделях, начальных и граничных условий;

- неточность моделей объектов управления, вызванная некорректно проведенной декомпозицией общей задачи управления, излишней идеализацией модели сложного процесса, разрывом существенных связей в технологическом комплексе, линеаризацией, дискретизацией, заменой фактических характеристик оборудования паспортными, нарушениями допущений, принятых при выводе уравнений (стационарности, изотермичности, однородности и т.д.);

- нечеткость в процессе принятия управленческих решений в системах, обусловленная тем, что процедура принятия решения базируется на неполной информации об объекте, включая качественную характеристику;

- неточность моделей, вызванная высокой вариабельностью показателей и параметров исходной среды;

- особенности решения задач в реальном масштабе времени приводят к тому, что недостаток вычислительных возможностей и статистических методов решения (несоответствие вычислительных ресурсов и методов сложности решаемой задачи) эквивалентен, в некотором смысле, недостатку информации об условиях задачи.

### **Особенности традиционных регуляторов**

В настоящее время в системах автоматизированного управления температурными режимами непрерывного потенциально опасного технологического процесса вулканизации применяются двухпозиционное регулирование, либо пропорционально-интегральные (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы и его модификации.

Традиционные ПИ- и ПИД-регуляторы интенсивно используются в промышленности благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой эффективности при управлении линейными системами. Однако традиционные ПИ- и ПИД-регуляторы обычно неэффективны

для систем, у которых неизвестна точная математическая модель или присутствуют неопределенности, а возникновение сильных помех приводит к наличию транспортных запаздываний, что в свою очередь может негативно сказаться на качестве переходных процессов. Проблемы усложняются еще и тем, что абсолютное большинство современных автоматизированных систем управления являются сложноструктурированными, а протекающие технологические процессы непрерывны. В подобных случаях целесообразным является замена классических ПИ- и ПИД-регуляторов нечетким регулятором, часто в связи с простотой использования это оказывается удобнее, чем применение усложненных регуляторов состояния или адаптивного подхода.

Нечеткий регулятор, построенный на базе нечетких множеств и нечеткой логики, в условиях неопределенности возмущающих воздействий, способен обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с традиционными регуляторами. Кроме того, используя технологию синтеза нечетких алгоритмов управления, возможно провести оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований. Проблема построения базы правил представляет одну из основных задач при создании аппарата нечеткой логики. Для её решения используются разные методы: анализ фиксированных решений, принимаемых оператором в определенных условиях, либо отслеживание желаемой траектории управления, полученной путем моделирования определенных условий системы.

### **Синтез нечеткого регулятора**

В данной работе представлен синтез нечеткого регулятора, основанный на анализе автоматизированной системы двухконтурного регулирования подачи пара для обогрева пресс-формы с коррекцией температурных режимов процесса вулканизации. Структурно схема замкнутой системы регулирования подачи пара выглядит следующим образом (рис. 1).

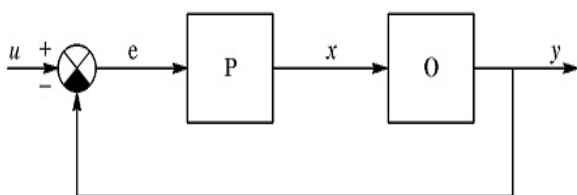


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы регулирования подачи пара

На рис. 1 представлена структурная схема замкнутой системы регулирования подачи пара, где  $O$  — это объект управления,  $P$  — регулятор, а переменные  $u$ ,  $y$ ,  $e$ ,  $x$  — это входной сигнал системы, выходной сигнал, сигнал ошибки (рассогласования), поступающий на вход регулятора, и выходной сигнал регулятора. В рассматриваемой системе регулятор вырабатывает управляющий сигнал  $x$  в соответствии с заданным алгоритмом регулирования.

Целью синтеза нечеткого регулятора является обеспечение высокого быстродействия и точности позиционирования объекта регулирования, который в данном случае представляет собой клапан подачи греющего пара в контур внешнего нагрева процесса вулканизации автомобильных шин. Клапан осуществляет регулирование проходного отверстия, через которое греющий пар подается в контур внешнего нагрева для поддержания заданной температуры пресс-формы, т.е. температуры плиты и конических колец при процессе вулканизации автомобильных шин. Общий вид нечеткого регулятора при этом представляется в виде следующей функциональной схемы (рис. 2).

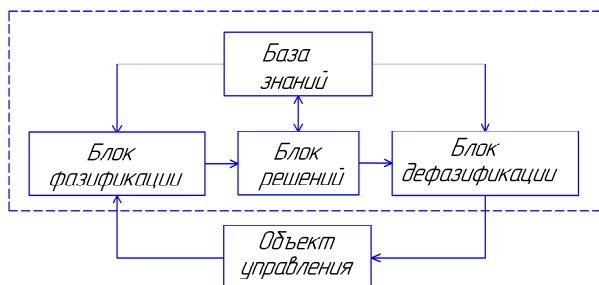


Рис. 2. Функциональная схема нечеткого регулятора

Лингвистические переменные, используемые при синтезе нечеткого регулятора, задаются на количественной

шкале, с помощью лингвистических переменных определяются степени соответствия данных рассматриваемым понятиям. Обычно функции принадлежности принимают значения от 0 до 1.

Для создания базы правил нечеткого вывода предварительно необходимо определить входные и выходные лингвистические переменные. В качестве первой входной лингвистической переменной берется «температура плиты пресс-формы», так для входной переменной максимально допустимое отклонение температуры плит пресс-формы равно  $\Delta T_{\max} = \pm 2$ . Регламентированная температура плит пресс-формы  $T_n = 174$ .

<«Температура плит пресс-формы»,  $T_t$ ,  $X_t$ >, где

$T_1 = \{ \text{«меньше»}, \text{«немного меньше»}, \text{«в норме»}, \text{«немного больше»}, \text{«больше»} \}$ ,

$X_1 = \{ T_n - \Delta T_{\max}, T_n - 0,75\Delta T_{\max}, T_n - 0,5\Delta T_{\max}, T_n - 0,25\Delta T_{\max}, 0, T_n + 0,25\Delta T_{\max}, T_n + 0,5\Delta T_{\max}, T_n + 0,75\Delta T_{\max}, T_n + \Delta T_{\max} \}$ .

Таким образом, на основе полученных данных функции принадлежности входной переменной «температура плит пресс-формы» выглядит следующим образом (рис. 3).

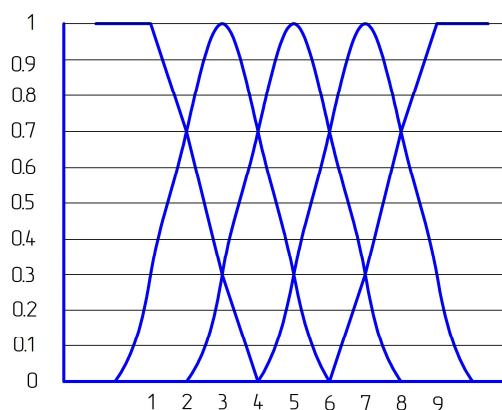


Рис. 3. Графическое представление функций принадлежности входной переменной «температура плит пресс-формы»

В качестве второй входной лингвистической переменной берется «скорость изменения температуры», которой соответствуют следующие лингвистические значения  $T_v = \{ \text{«отрицательное»}, \text{«равное нулю»}, \text{«положительное»} \}$  в результате чего в

графическом виде функции принадлежности выглядят следующим образом (рис. 4).

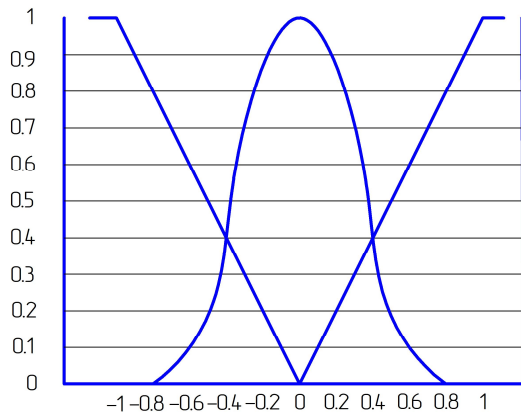


Рис. 4. Графическое представление функции принадлежности «скорость изменения температуры»

Аналогичным образом определим выходные лингвистические переменные в данном случае это «процент открытия регулирующего клапана», который осуществляет регулирование проходного отверстия. В качестве лингвистических значений примем  $P_{\%} = \{ \text{«равное нулю»}, \text{«минимальное»}, \text{«номинальное»}, \text{«максимальное»} \}$ . В графическом представлении функции принадлежности выходной переменной «процент открытия регулирующего клапана» выглядит следующим образом (рис. 5).

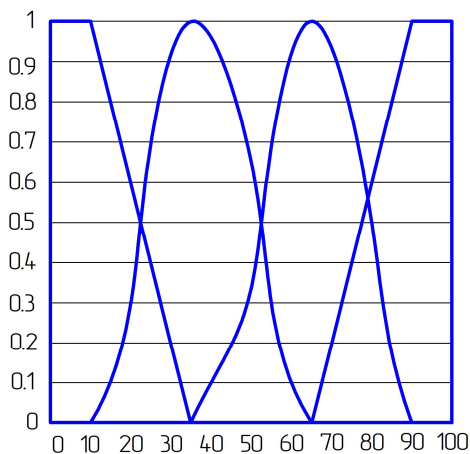


Рис. 5. Графическое представление функций принадлежности выходной переменной «процент открытия регулирующего клапана»

Кроме определения функций принадлежности, наиболее трудоемким этапом считается формирование базы правил, ставящих в соответствие входным ситуациям

определённое управляющее воздействие на выходе. Обычно условия, входящие в состав базы правил, имеют следующий вид «Если..., то...».

Таким образом, основная функция нечеткого регулятора – это формирование выходного значения управления в зависимости от входных данных системы. Процедура обработки входной информации в регуляторе может быть описана следующим образом:

- текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические т.е. проходит этап фаззификации. Фаззификация входных переменных, представляет собой процедуру нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе обычных (четко определенных) исходных данных;

- на основании полученных лингвистических значений с использованием базы правил нечеткого регулятора производится нечёткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходных переменных;

- этап дефаззификации. На этом этапе происходит дефаззификация выходных переменных в системах нечеткого вывода, представляющая собой процедуру или процесс нахождения обычного (четко определенного) значения для каждой из выходных лингвистических переменных.

Разработка базы знаний нечёткого регулятора сводится к решению следующих задач:

- выбору входных лингвистических переменных на основе анализа поведения замкнутой системы регулирования в рассчитанном желаемом режиме;

- назначению для каждой из лингвистических переменных набора лингвистических термов;

- выбору для каждого из термов аппроксимирующего нечёткого множества.

Целью разработанной модели автоматизированной системы управления на базе нечёткого регулятора (контроллера) является задание значения пара на выходе регулятора по алгоритму, обеспечивающему поддержание требуемой температуры.

Для реализации алгоритма управления необходимо разработать универсальную программу формирования по имеющимся

значениям матрицы базы знаний для нечёткого регулятора, принцип работы которой заключается в следующем:

- вызывается сохраненная матрица элементов;
- определяются максимальные по модулю значения каждого из входов и выходов;
- диапазон значений (от  $-max$  до  $+max$ ) каждого входа и выхода разбивается на термы с шагом, заданным пользователем;
- в зависимости от принадлежности значений переменных на каждом шаге к тому или иному терму формируются правила «вход–выход»;
- правила, у которых при изменении входов выход не меняется, объединяются;
- одинаковые правила объединяются;
- в результате исполнения данного алгоритма образуется база правил нечёткого регулятора.

### Заключение

Предложенный в статье подход к синтезу нечеткого регулятора дает существенно более простое решение при требуемом качестве процессов управления. Анализ литературы и практика использования нечетких регуляторов управления показывают, что они обладают лучшими динамическими характеристиками по сравнению с традиционными регуляторами.

На основе проведенного исследования можно отметить следующие преимущества нечеткого регулятора относительно традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов:

- нечеткий регулятор обеспечивает большую робастность, чем традиционные регуляторы;
- нечеткий регулятор имеет лучшие характеристики относительно управления нелинейным процессом;
- проектирование и эксплуатация нечетких регуляторов предполагает меньшие

затраты, чем проектирование и эксплуатация традиционных регуляторов.

Также следует отметить, что нечеткие регуляторы могут использоваться как самостоятельно, так и в составе традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов для улучшения их качественных характеристик.

Следовательно, нечеткие автоматизированные системы управления имеют хорошие перспективы развития и внедрения в промышленность для улучшения качества переходных характеристик потенциально опасного процесса вулканизации автомобильных шин.

### Литература

1. Бурковский В.Л., Гусев К.Ю. Нейросетевое моделирование динамики нелинейных объектов в условиях краткосрочного прогнозирования на основе аппарата нечеткой логики. Воронеж: ВГТУ, 2014. 160 с.
2. Ткалич С.А., Бурковский В.Л., Котов Д.В. Исследование нейросетевой модели прогнозирования аварийных ситуаций процесса вулканизации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 7. С. 15-29.
3. Ткалич С.А., Пивоваров В.П., Бурковский В.Л. Модели принятия решений в системах управления потенциально опасными производствами // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5.1. С. 129-132.
4. Бурковский В.Л., Чигбу Э.Э., Гусев К.Ю. Прогнозирование динамики потенциально опасных процессов на основе нейросетевого моделирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 49-53.
5. Ткалич С.А., Бурковский В.Л., Таратынов О.Ю. Концепция безаварийного управления на основе моделей прогнозирования состояния потенциально опасных технологических объектов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 79-86.
6. Митрохин А.А., Гусев К.Ю., Бурковский В.Л. Модели прогнозирования качества продукции потенциально опасного процесса вулканизации автомобильных шин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 28-33.

Поступила 13.03.2018; принята к публикации 14.05.2018

### Информация об авторах

**Митрохин Алексей Александрович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alekseymitrohin@yandex.ru

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



**FUZZY REGULATION OF FEEDING HEATING STEAM IN THE FRAMEWORK  
OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL  
PROCESS OF AUTOMOBILE TIRES VOLCANIZATION**

**A.A. Mitrokhin, V.L. Burkovskiy**

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

**Abstract:** in the article, the problems of control of the technological process of vulcanization of automobile tires from the position of a potentially dangerous process are considered. Control systems for potentially hazardous technological processes must be constantly developed and improved in connection with the undeniable importance of ensuring proper quality control, because potentially dangerous technological processes represent systems that are difficult to formalize and that operate in conditions of uncertainty, incompleteness of knowledge and unclear descriptions, both of the system itself, and the signals acting on it. In this connection, it is no longer sufficient to use classical methods of control theory to manage such systems, and new methods and approaches need to be developed. One of such approaches is based on the fuzzy set and fuzzy logic of L. Zade. In the paper, the expediency of using a fuzzy regulator for regulating the temperature in the external heating circuit of the car tire vulcanization process was analyzed, due to the change in the flow volume of the heating steam. The structure of the automated control system for the technological process of tire vulcanization based on the fuzzy logic apparatus was considered, and also the results of two-position control and proportional-integral-differential regulators used for temperature control in the external heating circuit of the car tire vulcanization were presented. Qualitative analysis of traditional regulators with respect to the adjustment of complex parameters control systems was carried out. The necessity and expediency of using a fuzzy regulator with regard to temperature control in the external heating circuit of the tire vulcanization process for improving the quality of the products were proved

**Key words:** fuzzy regulator, hazardous production, vulcanization

**References**

1. Burkovskiy V.L, Gusev K.Yu. "Neural network modeling of nonlinear objects dynamics in the conditions of short-term forecasting based on fuzzy logic" ("Neyrosetevoye modelirovanie dinamiki nelineynykh ob'ektov v usloviyakh kratkosrochnogo prognozirovaniya na osnove apparata nechetkoy logiki"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2014, 160 p.
2. Tkalich S.A, Burkovskiy V.L, Kotov D.V. "Study of neural network model forecasting of emergency situations of the curing process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 10, no. 7, pp. 15-29.
3. Tkalich S.A, Pivovarov V.P, Burkovskiy V.L. "Models of decision-making in control systems for potentially hazardous industries", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 5-1, pp. 129-132.
4. Burkovskiy V.L, Chigbu E.E, Gusev K.Yu. "Prediction of the dynamics of potentially dangerous processes on the basis of neural network modeling", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 49-53.
5. Tkalich S.A, Burkovskiy V.L, Taratynov O.Yu. "The vision of accident-free control based on forecasting model of potentially dangerous technological objects", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 79-86.
6. Mitrokhin A.A, Gusev K.Yu, Burkovskiy V.L. "Models for predicting the quality of products of a potentially dangerous process of car tire vulcanization", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 3, pp. 28-33.

Submitted 13.03.2018; revised 14.05.2018

**Information about the authors**

**Aleksey A. Mitrokhin**, Graduate Student, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alekseymitrohin@yandex.ru

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

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

© 2018 В.А. Мустафаев, М.Н. Салманова

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджанская Республика

**Аннотация:** рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов, описывающих функционирование сложных объектов в условиях неопределенности. Предложен формализм, предназначенный для разработки и анализа моделей сложных параллельных и распределенных систем, который базируется на математическом аппарате временных сетей Петри (СП), представляющих собой обобщенные нечеткие временные СП специального вида, совмещающие в себе поведение детерминированного и недетерминированного характера. Разработан алгоритм функционирования нечетких временных СП. Предлагаемый алгоритм обеспечивает решение задачи разрешимости срабатывания переходов, находящихся в состояниях конфликта, наложение нечеткой структуры на маркировку сети нечеткими законами композиции, определяющими значения степеней принадлежности входных и выходных позиций переходов. Модели динамических процессов представлены в виде нечетких временных сетей Петри. Предложен подход для моделирования динамических взаимодействующих процессов, основанный на матричной теории СП, которая обеспечивает эффективную форму представления структуры, динамики состояния модели, пространства достижимых состояний и последовательности срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц. На примере производственного модуля механообработки показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования нечетких временных сетей Петри. В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности векторов

**Ключевые слова:** модель, алгоритм, трапециевидный нечеткий интервал, нечеткие временные сети Петри, модуль механообработки

### Введение

Одной из основных задач нечеткого моделирования является исследование параллельных динамических взаимодействующих процессов, функционирующих в условиях неопределенности, обусловленной нечеткостью временных, ресурсных и других ограничений [1, 2]. Структурные связи, функциональные и причинно-следственные отношения между элементами системы, характеризующимися неопределенными параметрами, усложняют решение задачи.

Перспективно в данном случае применение различных расширений моделирующего аппарата нечеткой сети Петри. В статье представлена в виде нечеткой временной сети Петри (НВСП) модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственном модуле механообработки. Разработан алгоритм вычисления структурных элементов НВСП.

### Представление модели динамических процессов в виде НВСП и определение правила срабатывания переходов

Нечеткое моделирование основывается на теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Информация, используемая в среде, в которой происходит моделирование, может содержать точные числовые данные, интервалы четких и нечетких данных и знаний, а также лингвистические переменные. Преобразование этой внешней формы информации во внутренний формат, который используется в нечеткой модели, реализуемой через различные процедуры соответствия, является сложной и важной задачей. Входящие в модель управления входные и выходные лингвистические переменные могут задаваться как нечеткое число или нечеткий интервал. В связи с этим треугольные и трапециевидные функции принадлежности нечеткого множества могут быть выбраны как структурные элементы модели.

Трапециевидный нечеткий интервал (ТНИ) представляется в виде кортежа из четырех чисел:  $A = \langle a, b, \alpha, \beta \rangle$ , где  $a$  и  $b$  – соответственно нижнее и верхнее модальные значения ТНИ;  $\alpha$  и  $\beta$  – левый и правый коэффициенты нечеткости ТНИ [3].

Для решения задач нечеткого моделирования необходимо определить некоторые операции над ТНИ, аналогичные арифметическим операциям над обычными числами и интервалами. Для определения аналогов обычных арифметических операций над нечеткими числами и нечеткими интервалами используется принцип обобщения [4].

Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде НВСП.

Нечёткая временная сеть Петри определяется выражением [4,5]

$$C_T = (N, \mu_0, Z_T, S_T), \quad (1)$$

где  $N = (P, T, I, O)$  – структура НВСП:  $P = \{p_i\}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  – число позиций) – множество позиций;  $T = \{t_j\}$ , ( $j = 1, \dots, m$ ;  $m$  – число переходов) – множество переходов;  $I: P \times T \rightarrow \{0,1\}$ ;  $O: T \times P \rightarrow \{0,1\}$  – соответственно входная и выходная функция переходов;

$\mu_0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_n^0)$  – вектор начальной маркировки, каждый компонент  $\mu_i^0$  который представляет собой ТНИ

$$\mu_i^0 = \langle \mu_{1i}^0, \mu_{2i}^0, \mu_{3i}^0, \mu_{4i}^0 \rangle (i \in \{1, 2, \dots, n\}), \quad (2)$$

$z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях НВСП, каждый компонент  $z_i$  который представляет собой ТНИ

$$z_i = \langle z_{1i}, z_{2i}, z_{3i}, z_{4i} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\}), \quad (3)$$

$s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов НВСП, каждый компонент  $s_j$  который представляет собой ТНИ

$$s_j = \langle s_{1j}, s_{2j}, s_{3j}, s_{4j} \rangle, (j \in \{1, 2, \dots, m\}). \quad (4)$$

Текущее состояние НВСП определяется вектором  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , компоненты которого представляет собой ТНИ  $\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\})$  и интерпретируется как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях  $p_i \in P$  относительно времени, отсчитываемого от момента запуска данной НВСП.

Переход  $t_k \in T$  НВСП называется разрешенным при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , если выполнено следующее условие [3]

$$\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle > 0 \quad (5)$$

$$\wedge (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)$$

Если переход  $t_k \in T$  НВСП разрешен при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое за время  $s_k = (s_{1k}, s_{2k}, s_{3k}, s_{4k})$  приводит к новой маркировке  $\mu_k$ , компоненты вектора которой определяются следующим образом:

для каждой из входных позиций  $p_i \in P$ ,

для которых  $I(p_i, t_k) > 0$ , по формуле:

$$\mu'_k = \langle \mu'_{1k}, \mu'_{2k}, \mu'_{3k}, \mu'_{4k} \rangle = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle \quad (6)$$

$$\wedge (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)$$

для каждой из выходных позиций  $p_j \in P$ ,

для которых  $O(t_k, p_j) > 0$ , по формуле:

$$\mu'_j = \min \{ \max \{ \mu_i \} + s_k, \mu_j \} \quad (7)$$

$$(i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge I(p_i, t_k) > 0)$$

$(\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0, 0 \rangle)$

где  $\max$ ,  $\min$  – расширенная операция максимума и минимума для ТНИ, а “+” операция сложения ТНИ;

для каждой позиции  $p_i \in P$ , не являющейся входным и выходным, по формуле:

$$\mu'_i = \langle \mu'_{1i}, \mu'_{2i}, \mu'_{3i}, \mu'_{4i} \rangle = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle \quad (8)$$

$$(\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) = 0) \wedge (O(t_k, p_j) = 0)$$

Если некоторые из позиций  $p_j \in P$  являются одновременно входными и выходными для разрешенного перехода  $t_k \in T$ , то для них компоненты вектора новой маркировки рассчитываются последовательно, вначале по формуле (6), затем по формуле (7).

После нечеткого срабатывания перехода соответствующие маркеры становятся доступными только после окончания действия временных задержек, которые определяют доступную маркировку  $\mu'_j$  по формуле:

$$\mu'_i = \mu_i + z_i$$

$$\wedge (\forall p_i \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0, 0 \rangle) \quad (9)$$



Для выходных позиций  $p_j$  перехода  $t_k$ , для которых  $\mu_i = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$  по определению  $\mu'_j = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ .

### Алгоритм вычисления структурных элементов нечетких временных сетей Петри

При решении практических задач удобно использовать матричное представление структуры НВСП. Элементы матриц входных  $d_{ij}^-$ , выходных  $d_{ij}^+$  позиций и инциденций  $d_{ij}$  определяется так [6]:

$$d_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in I(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j), \end{cases}$$

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in O(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin O(t_j), \end{cases}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{если } p_i \in I(t_j), p_i \notin O(t_j), \\ 1, & \text{если } p_i \notin I(t_j), p_i \in O(t_j), \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j), p_i \notin O(t_j), \end{cases}$$

*Начало алгоритма*

Шаг 1. Создание входных и выходных матриц, представляющих входную и выходную функции НВСП в размерности  $m \times n : d_{ij}^-, d_{ij}^+ (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ .

Шаг 2. Определение размерности и ввод временных параметров НВСП:

$$\mu_{ij}, z_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, n}); s_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, m}).$$

Шаг 3. Полагают:  $k = 1$ .

Шаг 4. Полагают:  $j = 1; q = 1; i = 0$ .

Шаг 5. Индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$ .

Шаг 6. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 7, в противном случае к шагу 15.

Шаг 7. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^1 : \mu_{li}^1 = \mu_{li}; (l = \overline{1, 4})$ .

Шаг 8. Если выполняется условия  $(\mu_{li}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0) \wedge (\mu_{4i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 5, в противном случае к шагу 9.

Шаг 9. Вычисляют:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li} + z_{li}; (l = \overline{1, 4})$ .

Шаг 10. Если выполняется условие  $i = d_{kj}^-$ , то осуществляется переход к шагу 11, в противном случае к шагу 5.

Шаг 11. Если  $j = l$ , то полагают :

$$\left\{ \max_a = \mu_{li}^1; \max_b = \mu_{2i}^1; \max_\alpha = \mu_{3i}^1; \max_\beta = \mu_{4i}^1 \right\}$$

и осуществляется переход к шагу 12, в противном случае к шагу 13.

Шаг 12. Обнулирование элементов матрицы  $\mu_{li}^1 : \mu_{li}^1 = 0 (l = \overline{1, 4})$ ; индекс  $j$  увеличивается на единицу:  $j = j + 1$  и осуществляется переход к шагу 5.

Шаг 13. Полагают:  $a_1 = \max_a; a_2 = \mu_{li}^1$ .

Шаг 14. Если выполняется условие  $a_1 \geq a_2$ , то  $\max'_a = a_1$ , в противном случае  $\max'_a = a_2$ ;

14.1 полагают:  $b_1 = \max_b; b_2 = \mu_{2i}^1$ ;

14.2 если выполняется условие  $b_1 \geq b_2$ , то  $\max'_b = b_1$ , в противном случае  $\max'_b = b_2$ ;

14.3 полагают:  $\alpha_1 = \max_\alpha; \alpha_2 = \mu_{3i}^1$ ;

$\beta_1 = \max_\beta; \beta_2 = \mu_{4i}^1$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

14.4 если выполняется условие  $\alpha'_1 \geq \alpha'_2$ , то  $\max'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\max'_\alpha = \alpha'_2$ ;

14.5 вычисляют:  $\max'_\alpha = \max'_\alpha - \max'_\alpha$ ;

$\beta'_1 = b_1 + \beta_1; \beta'_2 = b_2 + \beta_2$ ;

14.6 если выполняется условие  $\beta'_1 \geq \beta'_2$ , то  $\max'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\max'_\beta = \beta'_2$ ;

14.7 вычисляют:  $\max_\beta = \max'_\beta - \max'_\beta$ ;

осуществляется переход к шагу 12.

Шаг 15. Полагают:  $i = 1$ .

Шаг 16. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 17, в противном случае переход к шагу 25.

Шаг 17. Если выполняется условие  $i = d_{kq}^+$ , то осуществляется переход к шагу 18, в противном случае индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 18. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^2$  вычисляют:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{li}^2 &= \max_a + s_{1k}; \mu_{2i}^2 = \max_b + s_{2k}; \\ \mu_{3i}^2 &= \max_\alpha + s_{3k}; \mu_{4i}^2 = \max_\beta + s_{4k} \end{aligned} \right\}.$$

Шаг 19. Если выполняются условия  $(\mu_{li}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0) \wedge (\mu_{4i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 20, в противном случае переход к шагу 21.

Шаг 20. Полагают:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li}^2; (l = \overline{1,4})$ ; индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i=i+1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 21. Если выполняется условие  $q=1$ , то полагают:

$\{\min_a = \mu_{1i}^2; \min_b = \mu_{2i}^2; \min_\alpha = \mu_{3i}^2; \max_\beta = \mu_{4i}^2\}$  и осуществляется переход к шагу 22, в противном случае переход к шагу 23.

Шаг 22. Полагают

$\{\mu_{li}^1 = \min_a; \mu_{2i}^1 = \min_b; \mu_{3i}^1 = \min_\alpha; \mu_{4i}^1 = \min_\beta\}$ ; значение  $q$  увеличивается на единицу:  $q=q+1$  и осуществляется переход к шагу 17.

Шаг 23. Полагают:  $a_1 = \min_a; a_2 = \mu_{1i}^2$ .

Шаг 24. Если выполняется условие  $a_1 \leq a_2$ , то  $\min'_a = a_1$ , в противном случае  $\min'_a = a_2$ ;

24.1 полагают:  $b_1 = \min_b; b_2 = \mu_{2i}^2$ ;

24.2 если выполняется условие  $b_1 \leq b_2$ , то  $\min'_b = b_1$ , в противном случае  $\min'_b = b_2$ ;

24.3 полагают:  $\alpha_1 = \min_\alpha; \alpha_2 = \mu_{3i}^2$ ;

$\beta_1 = \min_\beta; \beta_2 = \mu_{4i}^2$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  
 $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

24.4 если выполняется условие  $\alpha'_1 \leq \alpha'_2$ , то  $\min'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\min'_\alpha = \alpha'_2$ ;

24.5 вычисляют:  $\min'_\alpha = \min'_\alpha - \min'_\alpha$ ;

$\beta'_1 = b_1 + \beta_1; \beta'_2 = b_2 + \beta_2$ ;

24.6 если выполняется условие  $\beta'_1 \leq \beta'_2$ , то  $\min'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\min'_\beta = \beta'_2$ ;

24.7 вычисляют:  $\min_\beta = \min'_\beta - \min'_\beta$  и осуществляется переход к шагу 22.

Шаг 25. Новая маркировка принимается за текущую:  $\mu_{lr}^1 = \mu_{lr}^2; (l = \overline{1,4}; r = \overline{1,n})$ .

Шаг 26. Значение  $k$  увеличивается на единицу:  $k=k+1$ . Если  $k \leq m$ , то осуществляется переход к шагу 4.

Конец алгоритма.

### Модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственном модуле механообработки

Производственный модуль механообработки состоит из одного промышленного робота, одного транспортного манипулятора, одного персонального входного накопителя, двух однотипных устройств для выполнения одинаковой операции над партиями однотипных деталей и из одного персонального выходного накопителя.

Связь модуля с предыдущим и последующим модулями происходит соответственно с помощью вышеуказанных накопителей. На модуле обрабатываются одного типа детали. Детали поступают на персональный входной накопитель и ожидают обработку. Свободное устройство 1 или устройство 2 захватывает детали из входного накопителя. Обработанные детали поступают на выходной накопитель и ожидают отправку к последующему модулю.

На рисунке представлена граф-схема модели параллельно функционирующего обрабатывающего устройства. Модель составленной структурными элементами НВСП состояний модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств описывается следующими позициями и переходами:

$p_1$  и  $p_2$  – соответственно обработка заготовки на устройстве 1 и на устройстве 2;  $p_3$  и  $p_4$  – соответственно устройство 1 и устройство 2 свободны;  $p_5$  и  $p_6$  – соответственно на вход устройства 1 и на вход устройства 2 доставлена заготовка;  $p_7$  и  $p_8$  – соответственно устройство 1 и устройство 2 выставили заявку на обслуживание;  $p_9$  – транспортный манипулятор выполняет заявку устройства 1 и устройства 2;  $p_{10}$  – робот свободен;  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно выполнение обработки над заготовкой устройства 1 и устройства 2;  $t_3$  и  $t_4$  – соответственно выполнение разгрузки выходного накопителя устройства 1 и устройства 2;  $t_5$  и  $t_6$  – соответственно выполнение загрузки входного накопителя устройства 1 и устройства 2;  $t_7$  и  $t_8$  – соответственно выполнение заявки устройства 1 и устройства 2;  $z_1$  и  $z_2$  –

соответственно время обработки заготовки на устройстве 1 и на устройстве 2;  $z_3$  и  $z_4$  – соответственно время загрузки транспортного манипулятора на выходе устройства 1 и на выходе устройства 2 и перемещение от устройства 1 и от устройства 2 к выходному накопителю;  $z_5$  и  $z_6$  – соответственно время ожидания транспортного манипулятора и выполнение заявки устройства 1 и устройства 2;  $z_7$  и  $z_8$  – соответственно время перемещения транспортного манипулятора от выходного накопителя к устройству 1 и к устройству 2;  $z_9$  – время настройки транспортного манипулятора на выполнение очередного задания;  $z_{10}$  – время настройки робота на выполнение очередного задания.

Входные, выходные и матрица инцидентий НВСП имеет вид:

$$d^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$d^+ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

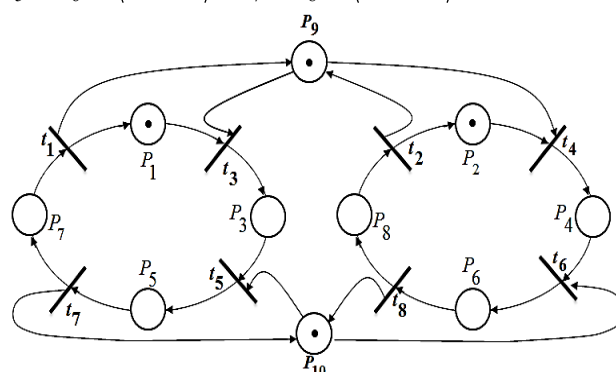
$$d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Элементы вектора начальной маркировки:

$$\begin{aligned} \mu_1^0 &= \mu_2^0 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle, \\ \mu_3^0 &= \mu_4^0 = \mu_5^0 = \mu_6^0 = \mu_7^0 = \mu_8^0 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_9^0 &= \langle 2, 3, 1, 1 \rangle, \quad \mu_{10}^0 = \langle 1, 2, 1, 0 \rangle. \end{aligned}$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:  
 $z_1 = z_2 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle$ ,  $z_3 = z_4 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle$ ,  
 $z_5 = z_6 = \langle 2, 3, 0, 1 \rangle$ ,  $z_7 = z_8 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ ,  
 $z_9 = \langle 1, 2, 1, 0 \rangle$ ,  $z_{10} = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ .

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:  
 $s_1 = s_2 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle$ ,  $s_3 = s_4 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle$ ,  
 $s_5 = s_6 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ ,  $s_7 = s_8 = \langle 2, 3, 1, 0 \rangle$ .



Граф-схема модели параллельно функционирующего обрабатывающего устройства

На основе разработанного алгоритма вычисляют структурные элементы НВСП. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов  $\sigma = (t_3, t_5, t_7, t_1, t_4, t_6, t_8, t_2)$  из начальной маркировки  $\mu'$ :

1) срабатывает переход  $t_3$ , полученная маркировка имеет вид:  
 $\mu_1^1 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_2^1 = \langle 3, 5, 2, 2 \rangle$ ,  $\mu_3^1 = \langle 5, 8, 3, 3 \rangle$ ,  
 $\mu_4^1 = \mu_5^1 = \mu_6^1 = \mu_7^1 = \mu_8^1 = \mu_9^1 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  
 $\mu_{10}^0 = \langle 2, 4, 1, 1 \rangle$ ;

2) срабатывает переход  $t_5$ , полученная маркировка имеет вид:  
 $\mu_1^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_2^2 = \langle 5, 8, 3, 3 \rangle$ ,  
 $\mu_3^2 = \mu_4^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_5^2 = \langle 8, 13, 5, 5 \rangle$ ,  
 $\mu_6^2 = \mu_7^2 = \mu_8^2 = \mu_9^2 = \mu_{10}^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ;

3) срабатывает переход  $t_7$ , полученная маркировка имеет вид:

$$\begin{aligned}\mu_1^3 &= \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_2^3 &= \langle 7, 11, 4, 4 \rangle, \\ \mu_3^3 &= \mu_4^3 = \mu_5^3 = \mu_6^3 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_7^3 &= \langle 11, 18, 6, 7 \rangle, \\ \mu_8^3 &= \mu_9^3 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_{10}^3 &= \langle 11, 18, 6, 7 \rangle;\end{aligned}$$

4) срабатывает переход  $t_1$ , полученная маркировка имеет вид:

$$\begin{aligned}\mu_1^4 &= \langle 13, 22, 7, 9 \rangle, & \mu_2^4 &= \langle 9, 14, 5, 5 \rangle, \\ \mu_3^4 &= \mu_4^4 = \mu_5^4 = \mu_6^4 = \mu_7^4 = \mu_8^4 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_9^4 &= \langle 13, 22, 7, 9 \rangle, & \mu_{10}^4 &= \langle 12, 20, 6, 8 \rangle.\end{aligned}$$

Процесс продолжается до получения искомой маркировки.

### Заключение

Разработанный алгоритм вычисления структурных элементов НВСП обеспечивает удобные преобразования внешних данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования, эффективную форму представления структуры, динамику состояния модели, пространство достижимых состояний и последовательность срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц, упрощение и ускорение процесса моделирования, выявления тупиковых состояний. Программа разработана в системе Borland Delphi 7.0 на основе описанного

алгоритма. Ресурсы современных компьютеров позволяют решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемые к моделированию сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности.

### Литература

1. Егоров А.С., Шайкин А.Н. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе нечетких интервальных сетей Петри // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 134-139.
2. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems Via Petri Nets and Ordinary Differential Equations. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015. V. 12. № 1. P. 295-308.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 717 с.
4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 284 с.
5. Watanuki K., Murata T. Fuzzy-timing Petri nets model of temperature control for car air conditioning system/Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 12-15, Tokyo, 1999, 4, p. 618-622.
6. Lopez- Mellado E. Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. Vol. 61. No. 1. p. 53-59.

Поступила 06.04.2018; принята к публикации 14.05.2018

### Информация об авторах

**Мустафаев Валех Азад оглы** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994505342506, e-mail: valex-sdu@mail.ru

**Салманова Малахат Насиман кызы** - аспирант кафедры информатики, Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел.+994507562828, e-mail: malaxat\_70@mail.ru

## DEVELOPMENT OF THE MODEL OF OPERATION CENTER FUNCTIONING WITH THE APPLICATION OF THE FUZZY TIMED PETRI NETS

V.A. Mustafayev, M.N. Salmanova

Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

**Abstract:** the modelling of dynamic interacting processes is examined in the article, which shows the operation of complex objects in the condition of uncertainty. Formalism intended for the development and analysis of models of complex parallel and distributed systems is proposed. It is based on the mathematical apparatus of the timed Petri nets (PN), representing generalized fuzzy timed PN of a special kind combining deterministic and non-deterministic character. The algorithm is developed for the functioning of fuzzy timed PN. The proposed algorithm provides a solution to the problem of solvability of triggering of transitions occurring in states of conflict, the imposition of a fuzzy structure on the network marking with fuzzy laws of composition that determine the values of the degrees of belonging of the input and output transition positions. The models of dynamic processes are presented in the form specific to fuzzy timed PN. An approach is proposed for modeling dynamic interacting processes based on the matrix theory of PN that provides an effective form of representation of the structure, dynamics of the model state, the space of achievable states, and the sequence of triggering

transitions in the form of a set of vectors and matrices. On the example of the production model of mechanical processing, it is shown that the accepted rules of triggering transitions fully show the functioning process of fuzzy timed PN. A tree graph of accessibility in the form of a sequence of vectors was received as a result of the simulation

**Key words:** model, algorithm, trapezoidal fuzzy interval, fuzzy timed Petri Nets, mechanical processing module

#### References

1. Egorov A.S., Shajkin A.N. “Logical modeling in conditions of uncertainty based on fuzzy interval Petri nets”, *Journal of Computer and Systems Sciences International (Izvestiya Akademii Nauk, Teoriya i Sistemy Upravleniya)*, 2002, no. 2, pp.134–139.
2. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. “A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems via Petri Nets and Ordinary Differential Equations”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 12, no.1, pp. 295–308.
3. Leonenkov A.V. “Fuzzy modeling in the environments MATLAB and fuzzy TECH”, St. Petersburg, BHV–Peterburg, 2005, 717 p.
4. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. “Fuzzy models and networks”, Moscow, Telekom, 2012, 284 p.
5. Watanuki K., Murata T. “Fuzzy-timing Petri nets model of temperature control for car air conditioning system”, *Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 12-15*, Tokyo, 1999, vol. 4, pp.618-622.
6. Lopez- Mellado E. “Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 61, no. 1, pp. 53-59.

Submitted 06.04.2018; revised 14.05.2018

#### Information about the authors

**Valeh Azad oglu Mustafayev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Informatics of Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: valex-sdu@mail.ru

**Malahat Nasiman gizi Salmanova**, Graduate student, Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: malaxat\_70@mail.ru

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОСЛЕ СЖАТИЯ С ПОТЕРЯМИ**© 2018 В.Ф. Барабанов<sup>1</sup>, Н.И. Гребенникова<sup>1</sup>, С.Л. Кенин<sup>2</sup>, Д.А. Юров<sup>1</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Atos, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** предлагается технология восстановления изображений, основанная на применении нейросетевого обучения и позволяющая удалять артефакты сжатия с изображений, обработанных кодеком JPEG, применяющим алгоритмы сжатия с потерями. Нейронные сети не программируются, в отличие от традиционных программных средств, они обучаются. Возможность обучения - одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными данными и выходными, а также выполнять обобщение. Это значит, что в случае успешного обучения сеть сможет вернуть верный результат на основании данных, которые отсутствовали в обучающей выборке, а также неполных, частично искажённых данных. Предложена структура и рассмотрены функции программного средства для восстановления изображений при помощи глубинных нейронных сетей. На базе предложенной структуры разработана библиотека методов и приложение, позволяющее подготовить нейронную сеть к эксплуатации и протестировать ее на несинтетических экземплярах сжатых изображений. Значительное внимание уделено рассмотрению наиболее релевантных архитектур нейронных сетей для данной задачи и библиотек, упрощающих их реализацию. Получены и проанализированы результаты работы приложения

**Ключевые слова:** автоэнкодер, глубокое обучение, сверточная нейронная сеть, Keras

**Введение**

В связи с всё возрастающим объемом накопленных графических данных при снижении темпов увеличения объемов хранилищ данных становится все более острой проблема восстановления изображений после сжатия с потерями или иных повреждений, в том числе физических. Изображение, сохраненное на удаленных веб-серверах, использующих технологии сжатия графики для сохранения места на накопителях, после нескольких итераций зачастую бывает полностью отличным от оригинала или даже совершенно неразличимым.

Технологии восстановления изображения, примененные между итерациями либо непосредственно к файлу-источнику, могли бы позволить избежать потери данных, при этом сохраняя преимущества форматов сжатия с потерями, таких как JPEG, PNG и GIF.

Результаты обработки изображений подобным методом могут быть использованы в различных профессиональных предметных областях, вплоть до астрофотографии и криминалистики; в широком смысле область применения данных алгоритмов не ограничена ничем.

В рамках данной работы спроектировано и реализовано приложение, позволяющее частично восстанавливать исходное изображение на основе изображения, уже затронутого арте-

фактами компрессии. До разработки нового программного средства следует рассмотреть уже существующие аналоги и проанализировать их достоинства и недостатки.

**Обзор современных программных средств для восстановления изображений**

Программные продукты для восстановления изображений сложно классифицировать ввиду недостатка информации о проприетарных компонентах и отсутствия строгой классификации. Тем не менее можно выделить некоторые проекты, в рамках которых была частично или полностью реализована данная функциональность [1, 2, 3]:

- Magic Pony Technology – приложение, разработанное одноименной компанией с целью увеличения разрешения входных изображений; компания использует машинное обучение, подготовленная нейросеть не просто интерполирует пиксели, а добавляет недостающие детали;

- AKVIS Noise Buster - программа для подавления цифрового шума на изображении, разработанная компанией AKVIS. AKVIS Noise Buster подавляет шумы матрицы цифровой камеры и шумы, появляющиеся при сканировании фотоснимка, уменьшает зернистость и устраняет неоднородные цветовые пятна на изображении, сохраняя детали и резкость гра-



ниц. Программа убирает как яркостной шум, так и цветовой (хроматический). Первый проявляется в виде искажающих элементов, отличающихся по яркости (например, неровности на коже), второй — в виде маленьких пятен, имеющих различие в цвете (пятна красного или синего цвета);

- Toraz DeJPEG – программный продукт, разработанный компанией Toraz Labs и предназначенный для улучшения качества изображений в формате JPEG. Toraz DeJPEG устраняет артефакты сжатия JPEG, которые возникают в результате сохранения изображения в формате JPEG, что позволяет восстановить детали и цвет изображения. Основной алгоритм DeJPEG исследует все изображения и удаляет все артефакты, сохраняя детали и улучшая естественные качества изображения. Разработчик заявляет, что данный продукт гарантирует качество изображения, соответствующее формату RAW при сохранении преимуществ формата JPEG.

Все вышеперечисленные продукты либо являются внутренними разработками различных компаний для собственных нужд, либо предоставляются на коммерческой основе и с закрытым исходным кодом, при этом только MagicPony Technology демонстрирует возможность удаления артефактов сжатия JPEG, так что разработка современного программного продукта для восстановления качества изображений с наглядным интерфейсом, открытым исходным кодом и публичным доступом, является актуальной задачей, поэтому были выдвинуты предполагаемые требования для эффективной разработки приложения.

### Требования к приложению для удаления артефактов компрессии

Приложение для удаления артефактов сжатия должно обладать следующими характеристиками:

- иметь возможность как использовать обученную нейронную сеть, так и тренировать ее заново для специфических классов изображений;
- иметь возможность быстрой настройки гиперпараметров сети и сохранения сетей с различными весами после обучения;
- иметь возможность использовать обучающие и валидирующие выборки данных с минимальными ограничениями;
- быть доступным, то есть программное обеспечение должно находиться в свободном доступе с открытым исходным кодом, что поз-

волит привлечь большее количество исследователей-энтузиастов.

Для разработки программного продукта использована IDE PyCharm 2017.3, язык разработки – Python, библиотеки разработки – Keras [4], TensorFlow [5]; также была предложена диаграмма использования приложения и его модульная структура.

### Состав, структура и функции программного средства

Созданная программа предназначена для восстановления изображений при помощи глубоких нейронных сетей и позволяет удалять артефакты сжатия с изображений.

На рис. 1 представлена схема работы приложения, на которой приведены основные функции программного обеспечения.

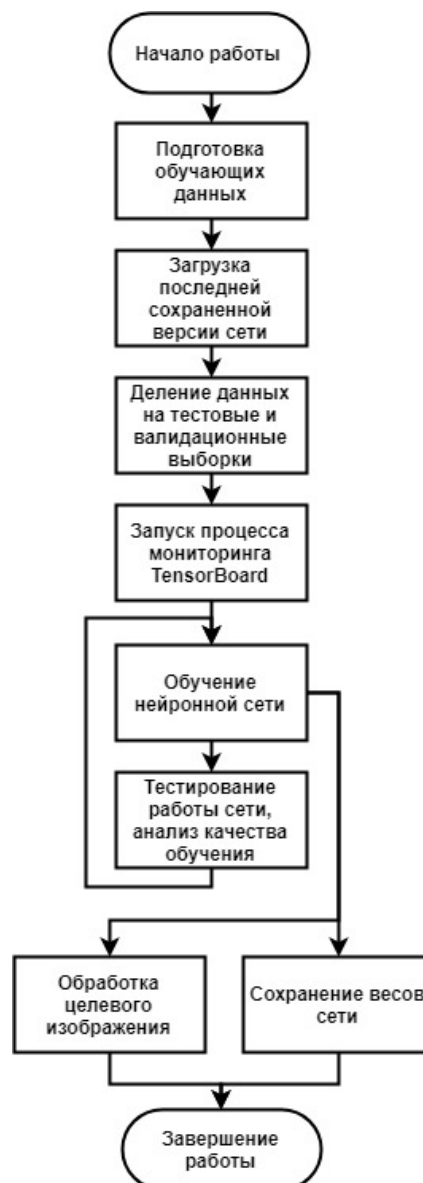


Рис. 1. Схема работы программного средства

Для его функционирования пользователю необходимо подготовить данные для обучения – наборы изображений в формате PNG. Далее входные данные упаковываются в NumPy-массивы, которые в дальнейшем также сохраняются в файловой системе для большего удобства в использовании. Последующее обучение сети скрыто от пользователя, мониторинг процесса обучения осуществляется только с консоли приложения либо в инструменте мониторинга TensorBoard. Результатом обучения сети являются значения весов, которые впоследствии также сохраняются в файловой системе для будущих запусков либо использования в отдельных клиентских приложениях.

На рис. 2 приведена модульная структура приложения. Приложение использует базовые принципы ООП, такие как инкапсуляция и полиморфизм. В использовании более сложных парадигм или паттернов проектирования в данном случае нет необходимости, так как конечный продукт представляет собой компактный проект в среде PyCharm, архитектура которого, тем не менее, может быть усложнена без значительных затрат.

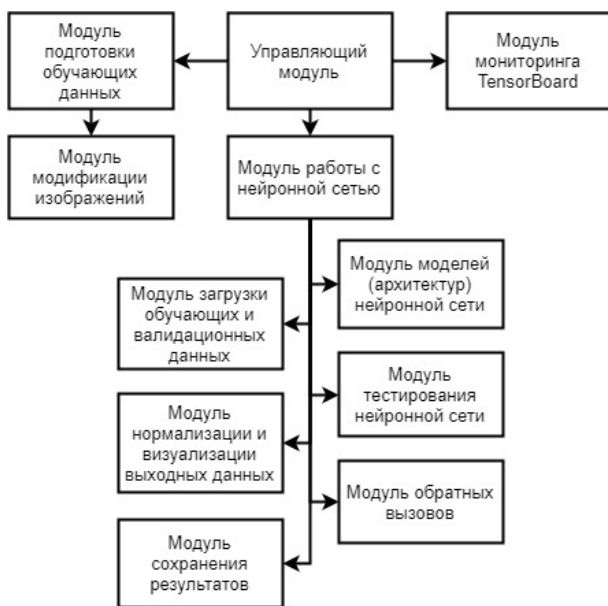


Рис. 2. Модульная структура приложения

В текущей реализации программного средства действия пользователя, требуемые от пользователя, ограничены поиском тестовых данных и их подготовкой для работы, в дальнейшем приложение работает в автоматическом режиме.

Управляющий модуль организует взаимодействие остальных модулей, позволяя абстра-

гироваться от деталей реализации конкретных модулей при их применении.

Модуль подготовки обучающих данных сканирует заданные директории на наличие изображений, преобразует их в формат массива NumPy, сохраняет его в файловой системе и возвращает управление основному процессу. Вспомогательный модуль модификации изображений добавляет артефакты сжатия JPEG к обучающим данным в автоматическом режиме. Так как для эффективного глубокого обучения требуются максимально большие объемы входных данных, обучение на «естественных» экземплярах не представляется возможным. В рамках данной работы использовалась обучающая выборка в 200000 изображений формата PNG размером 64\*64 пикселя и валидационная выборка из 20000 изображений размером 64\*64 пикселя.

Модуль мониторинга TensorBoard представляет собой отдельный процесс, запускающий специализированное серверное приложение на базе системы Continuous Integration Jenkins. Так как приложение для мониторинга должно предоставлять данные в удобном для восприятия виде, также запускается предпочитаемый пользователем браузер, в окне которого отображаются веб-инструменты мониторинга процесса обучения. Пример работы TensorBoard представлен на рис. 3 (график измерения точности – отличие среднеквадратичного отклонения в процессе обучения от среднеквадратичного отклонения на валидационной выборке) и рис. 4 (динамика среднеквадратичного отклонения на протяжении эпох обучения).

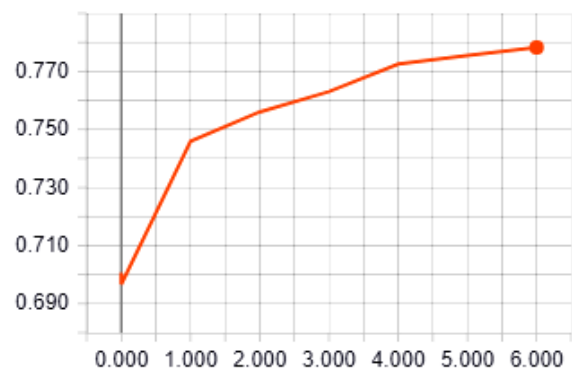


Рис. 3. График точности в TensorBoard



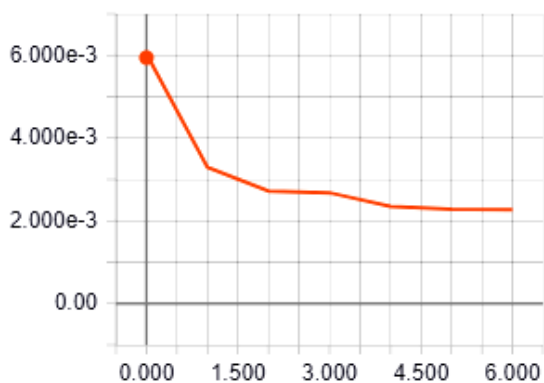


Рис. 4. График изменения среднеквадратичного отклонения

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

Модуль моделей/архитектур нейронной сети хранит подготовленные архитектуры, которые были протестированы на различных тестовых данных и показали свою эффективность.

В рамках данной работы было рассмотрено два вида архитектур нейронных сетей, относящиеся к глубокому обучению: автоэнкодеры и сверточные сети.

Автоэнкодер - алгоритм обучения без учителя, выходной вектор которого равен входному вектору признаков. Одной из самых распространенных архитектур автоэнкодера является нейронная сеть прямого распространения без обратных связей, содержащая входной, скрытый и выходной слой. В отличие от персептрона выходной слой автоэнкодера должен содержать столько же нейронов, сколько и входной слой. Данные на входном слое сжимаются на скрытом слое и восстанавливаются на выходном слое, таким образом, выделяются «скрытые признаки». К сожалению, автоэнкодеры неэффективны в решении слабо формализуемых задач, рассматриваемых в работе: изображения практически невозможно разделить на классы. Тем не менее, данная архитектура показала себя эффективной при работе с группами монохромных символов – более простая и производительная по сравнению со сверточной сетью. Архитектура автоэнкодера представлена на рис. 5.

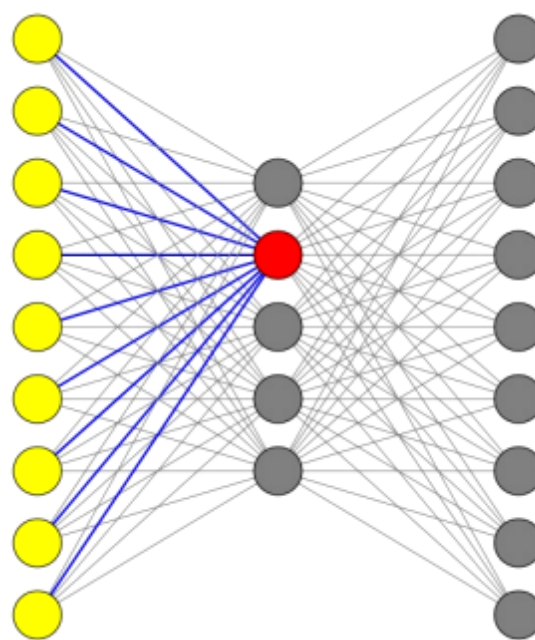


Рис. 5. Архитектура автоэнкодера

Автоэнкодер подходит для процесса обучения на данных небольшого размера, а при больших данных количество параметров (количество весов между входным и скрытым слоями, а также количество весов между скрытым и выходным слоями) существенно вырастет. Например, если при классификации изображений размером  $m \times n = 8 \times 8$ , мы хотим выделять  $k = 50$  признаков, тогда входной и выходной слои имеют  $m \times n = 8 \times 8 = 64$  нейронов, а скрытый слой имеет  $k = 50$  нейронов, количество весов равно  $2 \times m \times n \times k = 2 \times 8 \times 8 \times 50 = 6400$ . Но если картинки имеют размер  $m \times n = 100 \times 100$ , то количество весов будет  $2 \times 100 \times 100 \times 50 = 1\,000\,000$  [6].

Чтобы размер нейронной сети не был большим и не зависел от размера обучаемых данных, можно использовать специальную структуру нейронной сети, называемую сверточной нейронной сетью (англ. Convolutional Neural Network – CNN). При обучении для каждого образца на вход сверточной нейронной сети попадают не все изображения  $m \times n$ , а только их часть  $r \times c$ , например  $10 \times 10$ , эта часть называется фильтром или ядром и она сдвигается по большой картинке. Такая сверточная нейронная сеть имеет фиксированное количество нейронов на входном и выходном слоях  $r \times c = 10 \times 10 = 100$ , а количество весов  $2 \times r \times c \times k = 2 \times 10 \times 10 \times 50 = 10\,000$ .

Для каждого большого изображения  $m \times n$  выбираются маленькие изображения  $r \times c$  для

обучения, их количество равно  $(m - r + 1) \times (n - c + 1)$ . Визуализация свертки представлена на рис. 6.

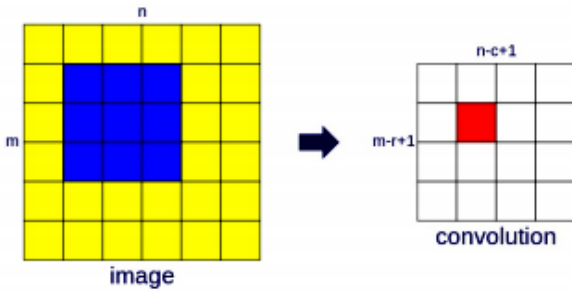


Рис. 6. Свертка

При использовании сверточной нейронной сети возникает проблема – большое количество выделенных признаков. Для одной большой картинки  $m \times n$  будет  $(m-r+1) \times (n-c+1)$  маленьких картинок  $r \times c$ , и количество выделенных признаков равно  $k \times (m - r + 1) \times (n - c + 1) = 50 \times (100 - 10 + 1) \times (100 - 10 + 1) = 414\,050$ . Использование такого огромного количества признаков для классификации оказалось неэффективно. Для уменьшения размера пространства признаков проводится субдискретизация (англ. pooling), разделив карту признаков, полученных от сверточной нейронной сети, на фиксированное количество частей  $p$  (рис. 7), на этом рисунке  $p = pm \times pn = 2 \times 2 = 4$  и на каждой части вычисляется ее максимальное значение (англ. max pooling) или среднее значение (англ. mean pooling) [7].

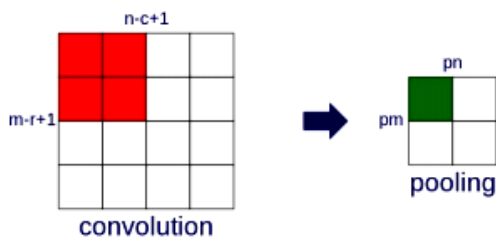


Рис. 7. Субдискретизация (субсэмплинг)

Структура работы сверточной сети, разработанной в рамках данной работы, представлена на рис. 8.

Модуль загрузки обучающих и валидационных данных служит оболочкой для доступа к данным, предоставляемым модулем подготовки обучающих данных, загружая их в оперативную память. Также данный модуль меняет последовательность изображений в массиве данных, позволяя избежать проблему перенасыщения сети.

Модуль тестирования нейронной сети является оболочкой для доступа к методу Evaluate библиотеки Keras, позволяя получить усредненные значения погрешности и среднеквадратичного отклонения на протяжении всего времени обучения сети.

Модуль обратных вызовов используется для вызова заданных действий после каждой эпохи/итерации обучения нейронной сети. В данном случае используются три стандартные функции: EarlyStopping, ModelCheckpoint и TensorBoard.

EarlyStopping используется для остановки обучения в случае, если изменение погрешности перестает уменьшаться на протяжении заданного количества эпох. В рамках данной работы количество эпох было ограничено двумя.

ModelCheckpoint обновляет значение весов нейронной сети в кэше Keras после каждой эпохи, кроме того, можно производить обновление только в случае, когда значение погрешности не превышает значение на предыдущей эпохе.

Модуль нормализации и визуализации выходных данных корректирует значения данных, полученных от нейронной сети для того, чтобы параметры RGB изображения не принимали отрицательные значения вследствие возникающих внутри сети шумов, что не позволяет отображать данные изображения. Визуализация производится при помощи библиотеки matplotlib, вызовы методов которой обернуты в методы, позволяющие сравнивать исходные, модифицированные и восстановленные последовательности изображений.

Модуль сохранения результатов обеспечивает сохранение весов нейронной сети в файловой системе по завершению работы.

Модульная структура в сочетании с использованием интегрированных сред разработки и библиотек позволяет значительно повысить скорость реализации приложения [8].

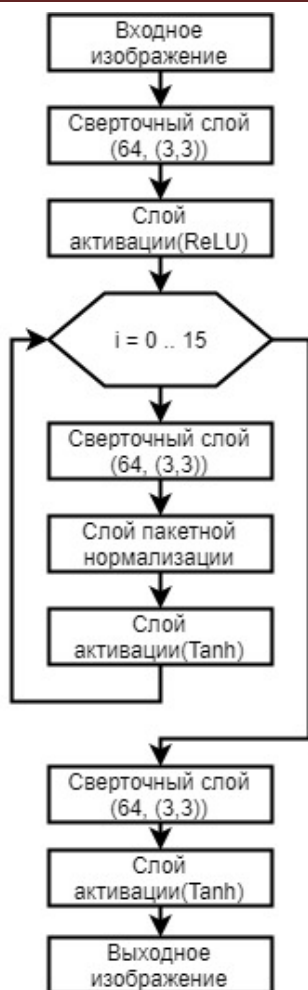


Рис. 8. Структура работы сверточной сети

### Инструменты разработки программного средства

Python - интерпретируемый язык программирования. С одной стороны, это позволяет значительно упростить отладку программ, с другой - обуславливает сравнительно низкую скорость выполнения. В Python не надо заранее объявлять тип переменной, что очень удобно при разработке.

Python поддерживает автоматическую сборку мусора, что гарантирует отсутствие утечек памяти.

Программа, написанная на Python, будет функционировать одинаково вне зависимости от того, в какой операционной системе она запущена.

PyCharm – это интеллектуальная интегрированная среда разработки Python с полным набором средств для эффективной разработки. Выпускается в двух вариантах – бесплатная версия PyCharm Community Edition и поддер-

живающая большой набор возможностей PyCharm Professional Edition. PyCharm выполняет инспекцию кода, автодополнение, в том числе основываясь на информации, полученной во время исполнения кода, навигацию по коду, обеспечивает множество видов рефакторинга [9]. Community Edition также отличается открытостью исходного кода.

Keras - открытая нейросетевая библиотека, написанная на языке Python. Она представляет собой надстройку над фреймворками DeepLearning4j, TensorFlow и Theano и нацелена на оперативную работу с сетями глубокого обучения, при этом спроектирована так, чтобы быть компактной, модульной и расширяемой [4].

Она была создана как часть исследовательских усилий проекта ONEIROS (англ. Open-ended Neuro-Electronic Intelligent Robot Operating System).

Keras предоставляет высокоуровневый, более интуитивный набор абстракций, который делает простым формирование нейронных сетей независимо от используемой библиотеки научных вычислений.

TensorFlow - открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети с целью автоматического нахождения и классификации образов [5]. Применяется как для исследований, так и для разработки собственных продуктов Google. Основное API для работы с библиотекой реализовано для Python, также существуют реализации для C++, Haskell, Java и Go.

Применение инструментов разработки и библиотек позволяет вносить существенные изменения в алгоритм работы без значительных изменений кода приложения, позволяя направить освободившиеся ресурсы на решение задач обучения.

### Обучение нейронной сети с использованием графического процессора

Библиотека машинного обучения TensorFlow может использовать два типа устройств – центральные процессоры (ЦП) и графические процессоры (ГП). Обучение на графических процессорах обеспечивает значительный прирост производительности, но в настоящий момент доступно только на ГП, использующих ядро NVIDIA.

Для обучения нейронной сети на ЦП достаточно установить пакет tensorflow при помощи пакетного менеджера pip. Стоит заметить, что Keras, так как является библиотекой более высокого уровня, не сможет работать без установленной TensorFlow (либо Theano, но в рамках данной работы этот случай не рассматривается).

Для обучения сети на ГП необходимо произвести следующие действия:

- проверить совместимость ГП с набором инструментов cuDNN [10];
- установить CUDA Toolkit версии 8.0 [10], важно помнить, что для его работы необходимо наличие на компьютере IDE VisualStudio версии от 2015 и новее;
- установить cuDNN версии 5.1 [10].
- установить пакет tensorflow-gpu при помощи пакетного менеджера pip.

Если вышеперечисленные операции были произведены корректно, в дальнейшем ГП будет использоваться по умолчанию.

Использование ГП позволяет в разы увеличить скорость обучения. Для сравнения, в данной работе эпоха обучения на 200 000 изображениях с валидационной выборкой из 20 000 изображений занимает порядка 50-55 минут, в то время как эпоха с использованием ГП проходит за 12-15 минут (в качестве ГП использовался чип NVIDIA GTX 960, ЦП – Intel Core i5 6500K).

Непосредственно по завершению обучения можно производить тестирование нейронной сети.

### Тестирование работоспособности программного средства

Начальной точкой работы с программным средством является загрузка обучающих (каталог train) и валидационных (каталог test) данных в виде изображений PNG размером 64\*64 пикселя. После запуска средство упакует эти данные в массивы numpy, сохранит в файловой системе и произведет сжатые данные из исходных.

Изображения для анализа помещаются в директорию input (в рамках данной работы исходные изображения также были сохранены для визуального анализа эффективности работы алгоритма). Так как целью данной работы являлось изучение возможности восстановления потерянной при сжатии информации как таковой, алгоритм был реализован только для изображений размером 64\*64 пикселя (тем не

менее текущую реализацию теоретически возможно использовать для обработки изображений больших разрешений, предварительно разбив их на блоки).

По завершению обучения сети результаты работы программы будут отображены в окне SciView IDE PyCharm (рис. 9, 10).

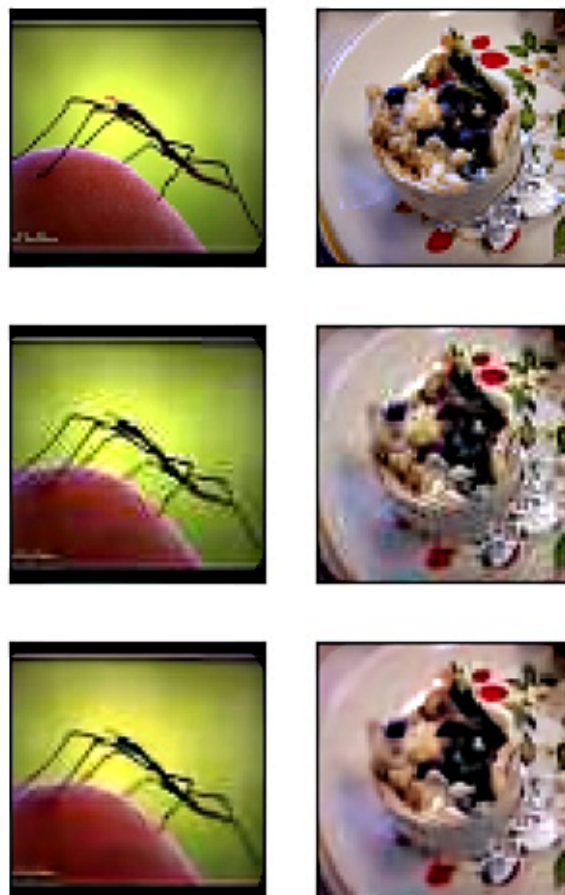


Рис. 9. Примеры обработанных сетью изображений (верхний ряд – исходное изображение, средний – сжатое, нижний – обработанное)

Рис. 9 и 10 подтверждают работоспособность данного алгоритма. Стоит отметить, что в случае с изображениями с большим количеством небольших деталей заметно появление слабого размытия, в то время на изображениях с ярко выраженным фоном (рис. 9 слева и рис. 10 справа) конечный результат сопоставим с исходными данными.

### Заключение

Разработанное приложение подтвердило на практике возможность восстановления исходных данных в изображениях, сжатых lossy-кодеком JPEG. Так как приложение разработано с применением модульного подхода, в дальнейшем оно может быть модифицировано для



обработки изображений большого разрешения. Важно заметить, что, несмотря на эффективность глубокого обучения, необходимость использования большого объема обучающих данных накладывает некоторые ограничения, так как для практического применения модель необходимо будет тренировать на гораздо более крупных массивах данных [11, 12]. Важно также учитывать то, что в случае отсутствия в обучающих и валидационных выборках изображений, сжатыми различными реализациями кодека JPEG с различными степенями сжатия, присутствует риск т.н. перенасыщения модели, что приведет к значительному снижению эффективности.



Рис. 10. Примеры обработанных сетью изображений (аналогично рис. 9)

## Литература

1. Twitter pays up to \$150M for Magic Pony Technology, which uses neural networks to improve images Режим доступа: <https://techcrunch.com/2016/06/20/> (дата обращения 20.02.2018).
2. Tools to inspire imagination & creativity Режим доступа: <http://akvis.com/en/noise-buster/index.php> (дата обращения 20.02.2018).
3. Substantially increase JPEG image quality with Topaz DeJPEG Режим доступа: <http://www.topazlabs.com/dejpeg> (дата обращения 20.02.2018).
4. Keras: The Python Deep Learning library Режим доступа: <http://keras.io> (дата обращения 20.02.2018).
5. An open-source machine learning framework for everyone Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/> (дата обращения 20.02.2018).
6. Ха Л. М. Сверточная нейронная сеть для решения задачи классификации // Труды МФТИ. 2016. № 3. С. 91.
7. Rawat W., Wang Z. Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: A Comprehensive Review // MIT Press - Neural Computation. 2017. № 29. С. 2352.
8. Kalinin A., Podvalny S., Soldatov E. Synthesis of a complex control system on the basis of neural networks // Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks. 2003. 13, pp. 157-162.
9. PyCharm — интеллектуальная Python IDE Режим доступа: <https://jetbrains.ru/products/pycharm/> (дата обращения 20.02.2018).
10. Nvidia Developer Режим доступа: <https://developer.nvidia.com/> (дата обращения 20.02.2018).
11. Программная реализация конструктора нейронных сетей / Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 25-31.
12. Анализ результатов экспериментальных исследований с использованием конструктора нейронных сетей / Е.А. Ганцева, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, Д.С. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 38-44.

Поступила 22.02.2018; принята к публикации 14.05.2018

## Информация об авторах

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

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

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

Юров Дмитрий Анатольевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: yurov.dmitry.a@gmail.com

## SOFTWARE IMPLEMENTATION OF APPLICATION USING NEURAL NETWORK TO RESTORE IMAGES AFTER LOSSY COMPRESSION

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

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

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

**Abstract:** the paper proposes a technology of image restoration, based on the use of neural network training. It allows to remove compression artifacts from the images processed by the JPEG codec that uses compression algorithms with losses. Neural networks are not programmed, unlike traditional software, they are trained. Learning capability is one of the main advantages of neural networks over traditional algorithms. Technically, training consists in finding the coefficients of connections between neurons. In the learning process, the neural network is able to identify complex relationships between input and output data, as well as perform generalization. This means that if the training is successful, the network will be able to return the correct result based on the data that was not in the training sample, as well as incomplete, partially distorted data. The structure and functions of the software tool for image restoration using deep neural networks are proposed. On the basis of the proposed structure, a library of methods and an application were developed to prepare the neural network for operation and to test it on non-synthetic copies of compressed images. Considerable attention is paid to the consideration of the most relevant architectures of neural networks for this task and libraries that simplify their implementation. The results of the application were obtained and analyzed

**Key words:** autoencoder, deep learning, convolutional neural network, Keras

### References

1. “Twitter pays up to \$150M for Magic Pony Technology, which uses neural networks to improve images”, available at: <https://techcrunch.com/2016/06/20/>
2. “Tools to inspire imagination & creativity”, available at: <http://akvis.com/en/noise-buster/index.php>.
3. “Substantially increase JPEG image quality with Topaz DeJPEG”, available at: <http://www.topazlabs.com/dejpeg>
4. “Keras: The Python Deep Learning library”, available at: <http://keras.io>.
5. “An open-source machine learning framework for everyone”, available at: <https://www.tensorflow.org/>.
6. Ha L.M. “Convolutional neural network for solving classification problem”, *Proceedings of MIPT (Trudy MFTI)*, 2016, no. 3, pp. 91.
7. Rawat W., Wang Z. “Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: a Comprehensive Review”, *MIT Press - Neural Computation*, 2017, no. 29, pp. 2352.
8. Kalinin A., Podvalny S., Soldatov E. “Synthesis of a complex control system on the basis of neural networks”, *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks*, 2003, 13, pp. 157-162.
9. “PyCharm-intelligent Python IDE”, available at: <https://jetbrains.ru/products/pycharm/>.
10. “Nvidia Developer”, available at: <https://developer.nvidia.com/>.
11. Gantseva E.A., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Boldyrev D.S. “Software implementation of the neural network designer”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 25-31.
12. Gantseva E.A., Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Boldyrev D.S. “Analysis of the results of experimental studies using a neural network designer”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 38-44.

Submitted 22.02.2018; revised 14.05.2018

### Information about the authors

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

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

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

**Dmitriy A. Yurov**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [yurov.dmitry.a@gmail.com](mailto:yurov.dmitry.a@gmail.com)

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМ 3D-ПРИНТЕРОМ НА ОСНОВЕ НЕЙРОКОНТРОЛЛЕРА

© 2018 В.Ж. Бочаров<sup>1</sup>, В.Л. Бурковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО МГК «Интехрос», г. Воронеж, Россия

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

**Аннотация:** рассмотрена универсальная система управления строительным 3D-принтером, конструктивно выполненным как на основе колонной архитектуры, так и на основе кран-балки. Для системы управления такого объекта как строительный 3D-принтер крайне важно решение проблемы управления в условиях как ветровых нагрузок, так и различных внешних возмущений, включая изменения в составе применяемой строительной смеси. В рамках решения этих проблем от системы управления потребуется не только гибкость и надежность, но и возможность самообучаться по мере эксплуатации. Решением в этом случае будет рассмотренное ранее применение системы гибридного параллельного нейроуправления, которое подразумевает использование сразу двух контроллеров: обычного и нейронного. Приведена классическая схема, иллюстрирующая гибридное параллельное нейроуправление и уже переработанная схема, применимая для управления строительным 3D-принтером. Проиллюстрированы нейронные сети пространственных слоев нейроконтроллера. Подход к разработке систем управления такими объектами, как строительные 3D-принтеры, описанный в статье, позволяет значительно повысить общую эффективность объекта управления и уменьшить количество проблем, возникающих при эксплуатации подобных систем

**Ключевые слова:** нейроуправление, строительный 3D-принтер, программируемый логический контроллер (ПЛК), нейронные сети, оптимизация

### Введение

Актуальность применения 3D-технологий в различных областях человеческой деятельности неоспорима. Портативные 3D-принтеры стали доступны не только различным организациям, но и простым обывателям. В строительстве 3D-технологии впервые стали применяться в начале 2000-х годов. Рынок строительных 3D-технологий стремительно растет и развивается. В настоящее время на рынке Российской Федерации уже успешно работает ряд компаний занятых разработкой и производством строительных 3D-принтеров, и этот рынок продолжает стремительно расти.

Основные исследования в области применения 3D в строительстве велись вокруг разработки новых строительных смесей, а системы управления строительных принтеров во многом развивались по остаточному принципу. По сути все современные строительные 3D-принтеры с точки зрения конструкции можно разделить на два основных вида:

- 3D-принтеры на основе кран-балки;
- 3D-принтеры колонного типа.

### Система управления

Системы управления для строительных 3D-принтеров обоих типов по сути ничем не

отличаются и строятся, как правило, на основе программируемых логических контроллеров. Данные контроллеры зачастую не обладают достаточной производительностью и гибкостью [1]. В случае же, если требуется значительно расширить функциональные возможности строительного 3D-принтера, например: установка опалубки, монтаж арматуры, проведение отделочных работ; система управления на основе ПЛК уже вряд ли сможет их реализовать.

Для решения этой проблемы оптимальным будет использовать более производительные и функциональные системы управления на основе «обычных» и нейроконтроллеров [2]. За основу архитектуры новой системы управления можно взять гибридное параллельное нейроуправление [3]. В соответствии с принципами этой архитектуры обычный и нейроконтроллер работают в паре, что значительно оптимизирует систему управления в условиях посторонних возмущений [4]. В реалиях применения подобной системы управления в строительном 3D-принтере это означает, что система управления сможет адаптироваться к таким негативным факторам как: изменения температуры окружающей среды при проведении строительных работ, ветровые нагрузки и т.д.

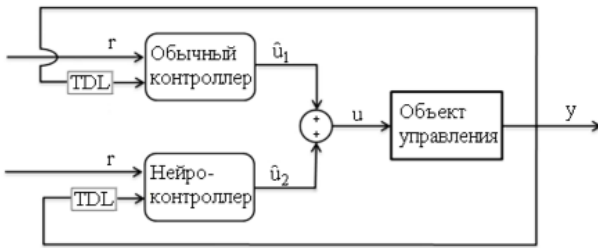


Рис. 1. Структурная схема системы управления на основе параллельного нейроуправления

Как и в прошлой статье [1], посвященной разработке системы управления РТК, обратную связь возложим на нейроконтроллер.

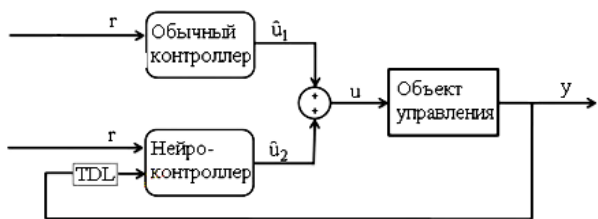


Рис. 2. Обновленная структура системы управления

«Обычный» контроллер, в данном случае STM32F103C8T, принимает команды от блока управления и передает их на объект

управления, сложив сигналы управления с данными обратной связи от объекта управления через нейроконтроллер [3].

### Нейроконтроллер

Основа системы управления — нейроконтроллер — STM32F103C8T. Логика работы системы управления достаточно проста: вся система управления делится на несколько нейронных сетей, объединенных в общую пространственную нейронную сеть [5]. Каждый слой, выполняющий свою локальную задачу самостоятельно, будет действовать значительно эффективнее [6]. В условиях строительного 3D-принтера, а значит, пространственных нейронных слоев, можно выделить следующие:

- обработка данных гироскопов;
- нейронная сеть контроля над состоянием строительной смеси;
- контроль над положениями исполнительных органов;
- обработка сигналов обратной связи;
- реализация сложения сигналов управления.

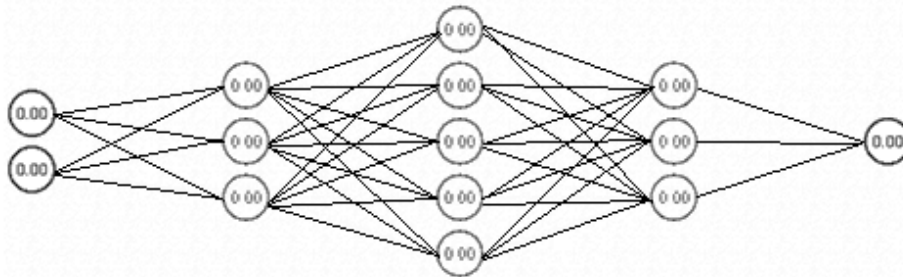


Рис. 3. Нейронная сеть управления гироскопами

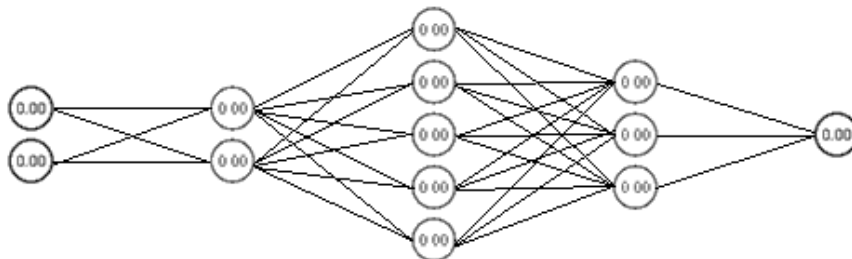


Рис. 4. Нейронная сеть контроля строительной смеси



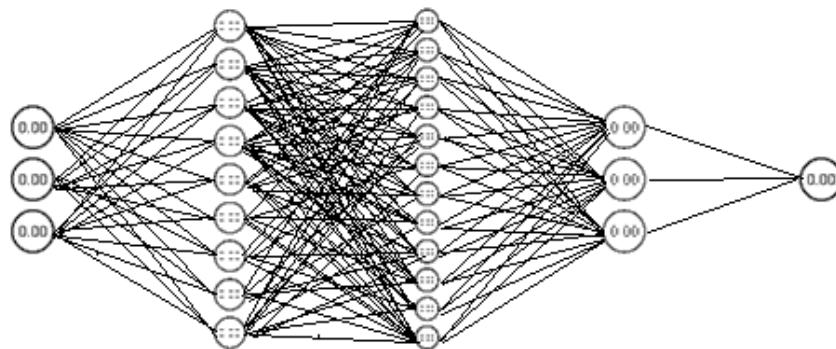


Рис. 5. Нейронная сеть контроля над датчиками положения

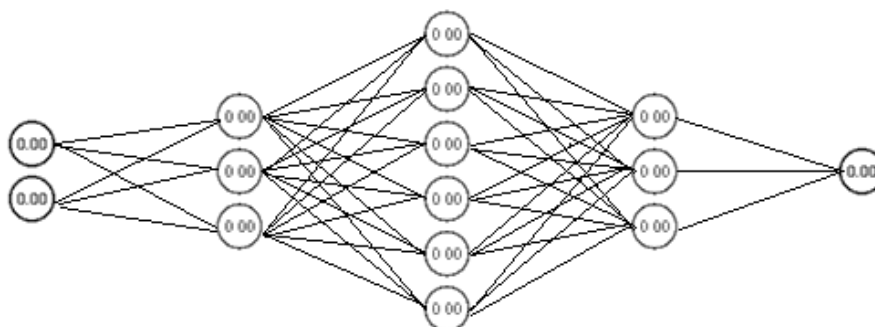


Рис. 6. Нейронная сеть обратной связи

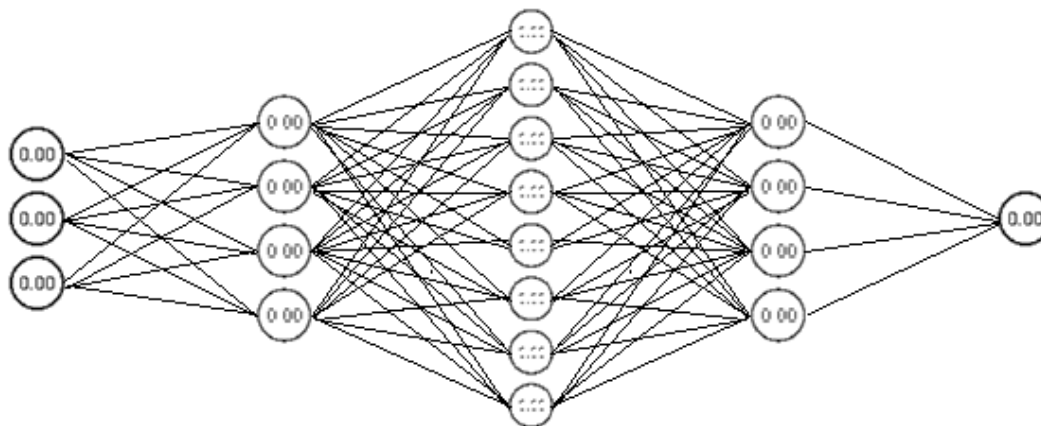


Рис. 7. Сумматор пространственных слоев нейроконтроллера

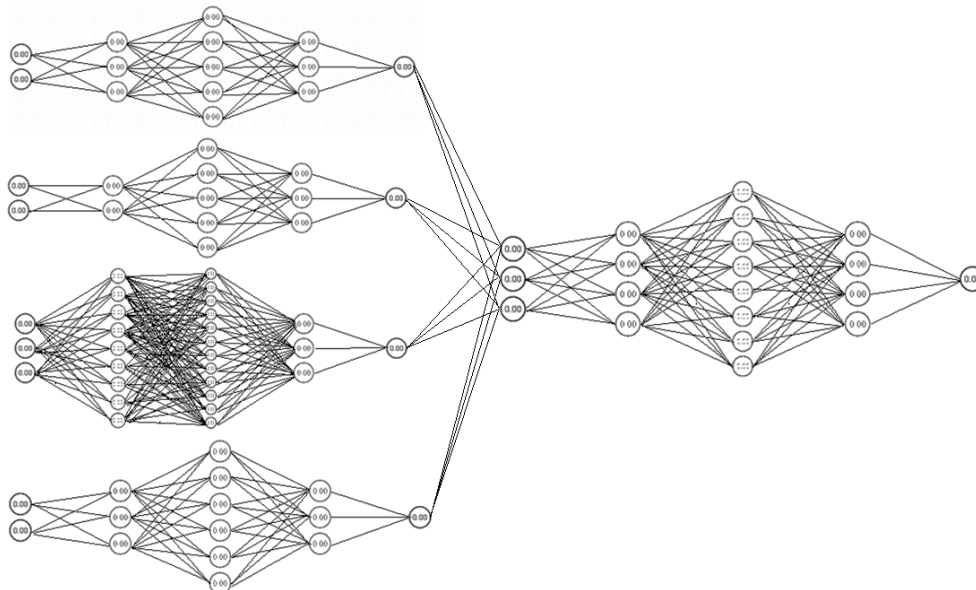


Рис. 8. Схема нейронной сети нейроконтроллера

## Выводы

Пространственно всю систему нейруправления можно представить в виде, приведенном ниже.

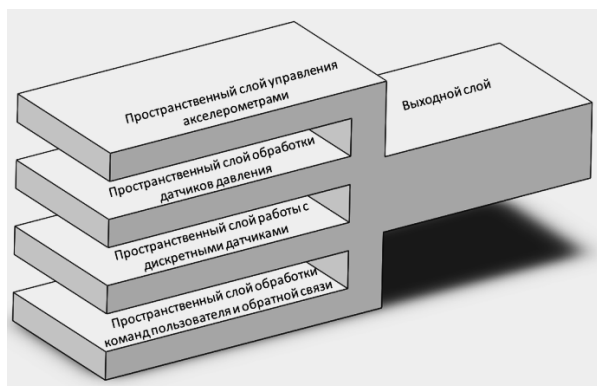


Рис. 9. Пространственная модель нейроконтроллера

Очевидно, что параллельное нейруправление на основе многомерной пространственной нейронной сети в условиях системы управления строительным 3D-принтером решает сразу ряд проблем:

1. Решение задачи управления строительным 3D-принтером в условиях, когда обычный контроллер не способен обеспечивать полноценное функционирование.

2. Игнорирование и нечувствительность к возмущающим сигналам по входу системы управления.

3. Адаптация к изменениям в структуре системы управления и объекта управления [7].

4. Значительное увеличение общего быстродействия системы управления и самого 3D-принтера.

5. Повышение общей надежности всей системы.

Представленный вариант системы управления, очевидно, более эффективен и удобен в эксплуатации, чем система управления, построенная на основе ПЛК.

## Литература

1. Aurélien Géron, Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems, 2017. 572 p.
2. Tariq Rashid, Make Your Own Neural Network, 2016. 222 p.
3. Бочаров В.Ж., Бурковский В.Л. Система нейруправления на основе 3D-сети в условиях робототехнического комплекса специального назначения // Вестник государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 39–45.
4. Simon S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition), 2010. 936 p.
5. Segaran, Programming Collective Intelligence, 2007. 376 p.
6. Raul Rojas, J. Feldman, Neural Networks: A Systematic Introduction, 1996. 502 p.
7. Christopher M. Bishop, Pattern Recognition and Machine Learning, 2011. 738 p.

**Информация об авторах**

**Бочаров Владимир Жанович** — бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); инженер-радиоэлектроник, ЗАО МГК «Интехрос» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Торпедо, 43 «А»), e-mail: bocharov@intehros.ru

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

**DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEM OF BUILDING 3D PRINTER ON THE BASIS OF NEUROKONTROLLER**

**V.Zh. Bocharov<sup>1</sup>, V.L. Burkovskiy<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>CC Interregional Group of Companies "Intehros", Voronezh, Russia**

**<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

**Abstract:** the universal control system of the construction 3D printer, designed in a constructive manner on the basis of both the column architecture and the crane beam, is considered in the article. For the management system of such a device as a building 3D printer, it is extremely important to solve the control problem in conditions of both wind loads and various external disturbances, including changes in the composition of the applied building mixture. As part of solving these problems, the management system will require not only flexibility and reliability, but also the ability to self-learn as it operates. The solution in this case will be the previously discussed application of a hybrid parallel neural control system, which implies the use of two controllers at once: conventional and neural. The article presents a classical diagram illustrating a hybrid parallel neural control and an already revised scheme that is primitive for controlling a 3D construction printer. Neural networks of spatial layers of the neurocontroller are illustrated. The approach to the development of management systems for objects such as construction 3D printers described in the article makes it possible to significantly increase the overall efficiency of the control object and reduce the number of problems arising from the operation of such systems

**Key words:** neural control, building 3D printer, PLC, neural networks, optimization

**References**

1. Aurélien Géron “Hands-on machine learning with scikit-learn and tensorflow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems”, 2017, 572 p.
2. Tariq Rashid “Make Your Own Neural Network”, 2016, 222 p.
3. Bocharov V.Zh., Burkovsky V.L. “Neuro-control system based on 3D-network in the conditions of a special-purpose robotic complex”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 39-45.
4. Haykin Simon S. “Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition)”, 2010, 936 p.
5. Segaran “Programming Collective Intelligence”, 2007, 376 p.
6. Raul Rojas, Feldman J. “Neural Networks: A Systematic Introduction”, 1996, 502 p.
7. Bishop Christopher M. “Pattern Recognition and Machine Learning”, 2011, 738 p.

Submitted 19.03.2018; revised 14.05.2018

**Information about the authors**

**Vladimir Zh. Bocharov**, BA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia); electronics engineer, CC Interregional Group of Companies "Intehros" (43 "A" Torpedo st., Voronezh 394019, Russia), e-mail: bocharov@intehros.ru

**Viktor L. Burkovsky**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

## СХЕМА КОММУТАЦИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПАРНЫХ ОПЕРАЦИЙ В РЕКОНФИГУРИРУЕМОМ ПРОДУКЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ

© 2018 Е.А. Титенко

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

**Аннотация:** описывается обеспечение параллельных вычислений в рамках продукционной парадигмы. Цель исследования – это сокращение временных затрат на обеспечение параллельных продукционных вычислений для обработки символьных данных. Эта цель достигается путем декомпозиции продукционной системы на независимые подмножества продукции и задания условий их инициализации. Метод решения основан на аппарате конструктивной логики. Правила декомпозиции представлены в виде конструктивных дизъюнкций. Члены конструктивных дизъюнкций задают варианты пересечения пар особых слов. Особые слова – это пары образцов продукции или пары образец и модификатор продукции. Основу декомпозиции составляют две схемы коммутации. Они соединяют в пары слова таким образом, чтобы выполнялись как смежные, так и шаговые объединения слов в пары. Продукционная система представляется двудольным графом. Левые вершины двудольного графа соответствуют образцам продукции. Правые вершины двудольного графа соответствуют модификаторам продукции. Чередование схем коммутаций позволяет использовать свойство линеаризации расположения пар образцов и свойство двумерности расположения образца и модификатора в паре. В результате две схемы коммутации обеспечивают линейное время декомпозиции продукционной системы. Однородный массив блоков поиска пересечений пар слов с регулярными связями составляет основу реконфигурируемого продукционного устройства. Связи задают схемы коммутации. Чередование схем коммутаций и однородность состава устройства с регулярными связями составляют содержание реконфигурации продукционного устройства. Декомпозиция общей структуры на однородное множество блоков поиска пересечений пар слов задает универсальность реализации. Она проявляется в построении блока поиска пересечений на основе конвейерных, матричных, ассоциативных принципов

**Ключевые слова:** продукционная система, реконфигурация, декомпозиция, схемы коммутации, пересечение слов

### Введение

По мнению ведущих отечественных ученых в области вычислительной техники (ВТ) [1, 2, 3, 4] (Фельдман В.М., Каляев И.А., Левин И.И., Стемповский А.Л., Кравец О.Я., Бурцев В.С. и др.), создание «умных» архитектур станет перспективным направлением проектирования вычислительных устройств и систем (ВУ и ВС). Современные многоядерные микропроцессоры, многопоточные устройства, контроллеры с динамическим управлением, ассоциативные параллельные процессоры уже объединяют и координируют работу неединичного множества дискретных вычислителей (ядер, модулей, ячеек). Данный (структурный) подход позволяет увеличивать общую производительность ВУ и ВС при увеличении размерности решаемой задачи и количества вычислителей соответственно.

Тем не менее темпы роста реальной производительности ВУ при линейном увеличении числа дискретных вычислителей остаются недостаточными (10-15% прироста производительности [2] от числа дискретных вычислителей), так как информационный граф

решаемой задачи не соответствует топологии графа ВУ или ВС. В этом случае происходит падение удельной производительности ВУ или ВС вследствие потерь времени на избыточные коммутационные, обменные операции [2]. Для их компенсации представляется целесообразным создание реконфигурируемых структур и архитектур, которые, в общем случае, динамически изменяют состав, топологию и функциональные возможности вовлеченных в вычислительный процесс элементов системы под информационный граф задачи [5].

В работе рассматривается вариант реконфигурируемой структуры ВУ, динамически изменяющей топологию соединений вычислительных блоков под информационный граф решаемой задачи.

### Постановка задачи

Наиболее часто необходимость реконфигурации с *нерегулярными связями* между элементами структуры ВУ возникает в задачах обработки символьной информации (ОСИ), в процессах обработки знаний (продукционные, логические модели,

генетические алгоритмы и др.). Для таких задач и процессов характерна организация параллельных вычислений с использованием базовой схемы принятия решений «условие→действие», свойственной естественному интеллекту. С этих позиций процессы и задачи ОСИ в большинстве случаев основываются на операциях поиска по образцу (проверка свойств) и модификации (получение новых данных, результатов) [ 6, 7, 8].

Продукционная система (ПС) является формализацией схемы «условие→действие». Продукция – это математическое выражение, формализующее данные операции и задающее через них вычислительный процесс. Математически продукционная система как набор  $n$  правил, объединенных на решение задачи, имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} O_1 \rightarrow P_1 \\ \dots \\ O_i \rightarrow P_i \\ \dots \\ O_j \rightarrow P_j \\ \dots \\ O_n \rightarrow P_n \end{array} \right.$$

где  $O_1 \div O_n$  – слова-образцы в рабочем алфавите  $A$ ;  $P_1 \div P_n$  – слова-подстановки в рабочем алфавите  $A$ ;  $\rightarrow$  - метасимвол, не принадлежащий рабочему алфавиту  $A$ .

Работа ПС заключается в  $F$  рекурсивных вызовах активизированного подмножества продукции. Входными данными на текущем вызове являются слова, полученные от предыдущего вызова. Активизированное подмножество продукции ( $AK$ ) – это набор таких продукции, которые применимы для модификации текущих данных. Результат вычислений отражается последовательностью активаций подмножеств продукции  $AK = \{AK_1, AK_2 \dots AK_F\}$ . Тогда рекурсивный алгоритм (граф вывода)  $\mathfrak{S}$  имеет вид:

$$S' = \mathfrak{S}_F(\mathfrak{S}_{F-1}(\dots(\mathfrak{S}_1(S)\dots)) \quad (1)$$

$$AK = \{AK_F, AK_{F-1} \dots AK_1\}, \quad (2)$$

где  $S$  – входная строка,  $AK_j$  - текущая активация - подмножество продукции на  $j$ -м

уровне графа вывода,  $F$  - количество уровней в графе вывода,  $S'$  – строка-результат.

Подмножество активируемых продукции  $AK_j$  из (3) ( $AK_j \in P$ ) представляет набор продукции, сопоставимых с текущим словом  $S_j$ , т.е. справедливо

$$\forall j (AK_j = \{p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_{m_j}}\} | (p_{i_t} \subset S_j), t = 1..m_j),$$

где  $p_{i_t}$  - продукция из  $\mathfrak{S}$ , входящая в  $j$ -ю активацию,  $m_j$  - количество продукции, входящих в  $j$ -ю активацию (мощность активации)  $AK_j$ , т.е.  $m_j = |AK_j|$ .

### Обеспечение параллельных вычислений в продукционной системе

Как известно [9], операция поиска по образцу является наиболее трудоемкой (занимает до 90% времени вычислений), так как поиск должен быть организован как по всему набору продукции, так и по всей длине обрабатываемых слов. Фактически операция поиска по образцу является глобальной в пространстве правил и данных, что накладывает определенные структурные требования на обеспечение параллельных вычислений.

Параллельное срабатывание [6, 7] подмножества продукции без перебора альтернатив связано с наибольшим коэффициентом ветвления. Это означает, что требуется определить такую активацию  $AK_k$  из  $F$  возможных, для которой

$$m_k = h,$$

где  $h$  – порог ветвления графа вывода,  $h = \varphi_k(O_{i_1}, O_{i_2}, \dots, O_{i_{m_k}}) = \max(l_1, l_2, \dots, l_{q_k})$ ,  $q_k$  – количество конфликтных слов в ПС.

### Структурная декомпозиция продукционной системы

Для придания в ПС операции поиска по образцу распределенного характера предлагается разбить ПС на такие подмножества  $D_1, D_2, \dots, D_x$ , что справедливо

$$\exists z (\forall j (p_{j_i} \in AK_j) \Rightarrow (p_{j_i} \subset D_z)) | (z = 1..x).$$



Это означает, что все продукции, входящие в активацию  $AK_j$ , входят в состав одного из подмножеств  $D_z$ .

Основу декомпозиции  $\mathfrak{Z}$  на части составляют вычислительные процессы парных пересечений

- 1) образцов продукции (пересечения пар левых частей продукции);
- 2) образцов и модификаторов (пересечения пар левых и правых частей).

С алгоритмической точки зрения временная сложность поиска парных пересечений также имеет квадратичную зависимость  $O(n^2)$ . Количественно она

определяется значением  $FN = C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$ .

Количество проверяемых пар слов на пересечения в  $(FN=C_n^2)$  и их соотношение к числу продукции в ПС  $n$  приведено в таблице.

Количество анализируемых пар слов и динамика роста функции  $FN/n$

$n$	8	16	32	64	128	256
$FN$	28	120	496	2016	8128	32640
$FN/n$	3,5	7,5	15,5	31,5	63,5	127,5

Из динамики изменения двух функций  $FN$  и  $FN/n$  следуют значительные временные затраты на обеспечение параллельных вычислений. При условии динамического изменения состава и структуры ПС временные затраты на анализ парных пересечений образцов, парных пересечений образцов и модификаторов становятся неприемлемыми, так как будут входить в общее вычислительное время.

**Схема коммутации для параллельного анализа парных пересечений**

Для ПС из  $n$  продукции естественный способ перебора пар – циклическое объединение в пары слов, имеющих такую закономерность изменения их индексов, чтобы обеспечить полный перебор всех сочетаний и линейную сложность  $O(n)$ . Для этого разработана оригинальная схема коммутации и параллельного анализа на пересечение пар слов. Схема коммутации обеспечивает циклическое чередование двух вариантов коммутации – К1 и К2. Вариант коммутации К1 основан на локальном объединении в пару смежных по индексу слов. Вариант коммутации К2 основан на распределенном объединении в пару слов, имеющих индексы с некоторым шагом  $\Delta$ . Величина шага  $\Delta=4$  выбирается для обеспечения полного перебора без повторов.

Пусть в ПС имеется  $n=2^m$  правил и пусть  $T \in \{O, P\}$ . Тогда аналитически правила коммутации и анализа пересечений слов имеют следующий вид.

**Правила коммутации К1**

$$\forall i \forall j ((T_i^H = T_j^K) \vee (T_j^H = T_i^K) \vee (T_i \subset T_j) \vee (T_j \subset T_i)) \mid (i=1,3,5\dots n-1, j=i+1) \quad (3)$$

**Правила коммутации К2**

$$\forall i \forall j ((T_i^H = T_j^K) \vee (T_j^H = T_i^K) \vee (T_i \subset T_j) \vee (T_j \subset T_i)) \mid (i=1,5,9\dots n-1, j=i+3) \quad (4)$$

$$\forall i \forall j ((T_i^H = T_j^K) \vee (T_j^H = T_i^K) \vee (T_i \subset T_j) \vee (T_j \subset T_i)) \mid (i=4,8,\dots(n-2) \bmod (n-4), j=i+3) \quad (5)$$

где  $T_i^H, T_j^H$  – собственные начала слов  $(T_b, T_j)$ ,  $T_i^K, T_j^K$  – собственные окончания слов  $(T_b, T_j)$ .

Эти правила коммутации К1, К2 основаны на известной конструктивной дизъюнкции пересечения слов [8], задающей условия их левого, правого пересечений, вхождения слов. Первые слагаемые в дизъюнкциях (3), (4), (5) описывают левые пересечения слов и задают тем самым условие образования нового подмножества  $D_z (z=I-x)$ . Вторые слагаемые в дизъюнкциях (3), (4), (5) описывают правые пересечения слов и задают тем самым условие увеличения мощности соответствующего  $D_z$  путем включения в него соответствующего слова (образец или модификатор) из продукции  $P_j (j=I-n)$ . Данная содержательная трактовка слагаемых в правилах коммутации (3), (4), (5) отражает научную новизну схемы коммутации в целом.

Ниже приведены примеры коммутируемых пар слов по их индексам:

- 1) вариант коммутации K1  
(1,2), (3,4), (5,6), (7,8), (9,10) ... (n-1,n)
- 2) вариант коммутации K2  
(1,4), (5,8), (9,12), ... (n-3,n),  
(3,6) (7,10)...(n-(2+4),(n-2))

В каждом цикле коммутации формируется  $n/2$  (четный номер цикла) или  $n/2-1$  (нечетный номер цикла) проверяемых пар слов.

В качестве тестовой задачи для реализации полного перебора пар элементов

массива на основе циклических вариантов коммутаций K1, K2 приведена задача сортировки массива  $M$ . Пусть исходный массив  $M$  размером  $n=16=2^4$  имеет вид  $M=\{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16\}^T$  и в качестве выполняемой операции – сравнение и обмен двух чисел по отношению «больше». Тогда применение коммутаций K1, K2 обеспечивает достижение результата, осуществляя на каждом шаге  $n/2$  или  $n/2-1$  сравнений (рис. 1).

	K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2		K1	K2
1	↗	2	↘	3	↗	1	↘	5	↗	3	↘	7	↗	5	↘	9	↗	7	↘	11	↗	9	↘	13	↗	11	↘	15	↗	13	↘	16
2	↘	1	↗	1	↘	3	↗	3	↘	5	↗	5	↘	7	↗	7	↘	9	↗	9	↘	11	↗	11	↘	13	↗	13	↘	15	↗	15
3	↗	4	↘	5	↗	2	↘	7	↗	1	↘	9	↗	3	↘	11	↗	5	↘	13	↗	7	↘	15	↗	9	↘	16	↗	11	↘	14
4	↘	3	↗	2	↘	5	↗	1	↘	7	↗	3	↘	9	↗	5	↘	11	↗	7	↘	13	↗	9	↘	15	↗	11	↘	16	↗	13
5	↗	6	↘	7	↗	4	↘	9	↗	2	↘	11	↗	1	↘	13	↗	3	↘	15	↗	5	↘	16	↗	7	↘	14	↗	9	↘	12
6	↘	5	↗	4	↘	7	↗	2	↘	9	↗	1	↘	11	↗	3	↘	13	↗	5	↘	15	↗	7	↘	16	↗	9	↘	14	↗	11
7	↗	8	↘	9	↗	6	↘	11	↗	4	↘	13	↗	2	↘	15	↗	1	↘	16	↗	3	↘	14	↗	5	↘	12	↗	7	↘	10
8	↘	7	↗	6	↘	9	↗	4	↘	11	↗	2	↘	13	↗	1	↘	15	↗	3	↘	16	↗	5	↘	14	↗	7	↘	12	↗	9
9	↗	10	↘	11	↗	8	↘	13	↗	6	↘	15	↗	4	↘	16	↗	2	↘	14	↗	1	↘	12	↗	3	↘	10	↗	5	↘	8
10	↘	9	↗	8	↘	11	↗	6	↘	13	↗	4	↘	15	↗	2	↘	16	↗	1	↘	14	↗	3	↘	12	↗	5	↘	10	↗	7
11	↗	12	↘	13	↗	10	↘	15	↗	8	↘	16	↗	6	↘	14	↗	4	↘	12	↗	2	↘	10	↗	1	↘	8	↗	3	↘	6
12	↘	11	↗	10	↘	13	↗	8	↘	15	↗	6	↘	16	↗	4	↘	14	↗	2	↘	12	↗	1	↘	10	↗	3	↘	8	↗	5
13	↗	14	↘	15	↗	12	↘	15	↗	10	↘	14	↗	8	↘	12	↗	6	↘	10	↗	4	↘	8	↗	2	↘	6	↗	1	↘	4
14	↘	13	↗	12	↘	15	↗	10	↘	16	↗	8	↘	14	↗	6	↘	12	↗	4	↘	10	↗	2	↘	8	↗	1	↘	6	↗	3
15	↗	16	↘	16	↗	14	↘	14	↗	12	↘	12	↗	10	↘	10	↗	8	↘	8	↗	6	↘	6	↗	4	↘	4	↗	2	↘	2
16	↘	15	↗	14	↘	16	↗	12	↘	14	↗	10	↘	12	↗	8	↘	10	↗	6	↘	8	↗	4	↘	6	↗	2	↘	4	↗	1

Рис. 1. Чередование коммутаций K1 и K2 для полного перебора пар чисел

Согласно рис. 1 можно отметить, что для массива  $M$  размером 16 элементов число шагов (с чередованием коммутаций K1, K2) составило 16, т.е. эмпирически подтверждается линейная зависимость времени сопоставления пар элементов.

Для формирования подмножеств  $D_x$  ( $x=1...z$ ) в процессе поиска пересечений пар слов формируется информационная структура данных *STRUC*, состоящая из набора полей. (рис. 2). Состав полей: *REZ* – флаг положительного пересечения пары слов из ПС, *Flg* – флаг положительного пересечения слова с номером  $Nm1$  ( $Nm1 \leq Nm2$ ), *LFT* - двоичный флаг левого пересечения двух слов из ПС, *RGH* - двоичный флаг правого пересечения двух слов из ПС, *Nm1* – номер продукции с минимальным номером в паре, *Tail1* - часть общей части в левом пересечении слов (образец, модификатор), *Nm2* – номер продукции с максимальным номером в паре, *Tail2* - часть общей части в правом пересечении слов (образец, модификатор), *MDL* - двоичный флаг вхождения слова  $Nm2$  в

слово с номером  $Nm1$  (образец, модификатор) в паре слов, *Conf* – текущее конфликтное слово от пары слов с  $Nm1$  и  $Nm2$ .

Общий алгоритм формирования подмножеств продукции  $D_z$  ( $z=1-x$ ) содержит 3 этапа:

- 1) параллельный поиск пересечений пар слов с заполнением  $(n/2 + (n/2-1))$  информационных структур (рис. 2);
- 2) генерация множеств-кандидатов  $D_z$  на основе общих частей слов;
- 3) оптимизация текущих множеств-кандидатов  $D_z$  с учетом их предыдущего шага.

STRUC

REZ	LFT	RGH	Nm1	Nm2	MDL	Conf
			Tail1	Tail2		

Рис. 2. Информационная структура *STRUC* описания пересечений пары слов

Обеспечение параллельных вычислений в ПС основывается на ее декомпозиции на

отдельные подмножества. Вместо проведения вычислений по всем правилам в ПС в дальнейшем вычисления уже будут осуществляться по одному из подмножеств  $D_1 - D_z$  с сохранением эквивалентности результата для ПС. Такая декомпозиция позволит распределить общий вычислительный ресурс вычислительной системы в условиях неопределенности коэффициентов ветвлений в динамическом графе вывода с неизвестной структурой.

### Общая структура схем коммутаций в реконфигурируемом продукционном устройстве

Несмотря на близость задачи параллельной сортировки и схем коммутации

пар элементов массива [8, 9] к рассматриваемой задаче, следует указать принципиальное алгоритмическое отличие. Оно заключается в том, что для декомпозиции ПС на подмножества необходимо обеспечить для каждого слова его сравнение с остальными на пересечение (левое, правое, вхождение). Для задачи сортировки, применяемой в обработке изображений, распознавании символов [10, 11], часть пар элементов можно не рассматривать и, соответственно, не перемещать их по массиву, если в результате выполненных шагов элементы уже заняли свое место в сортированном массиве.

Схема коммутации  $K_1$  реализуется структурой, обеспечивающей локальное объединение в пару смежных по индексу слов (рис. 3).

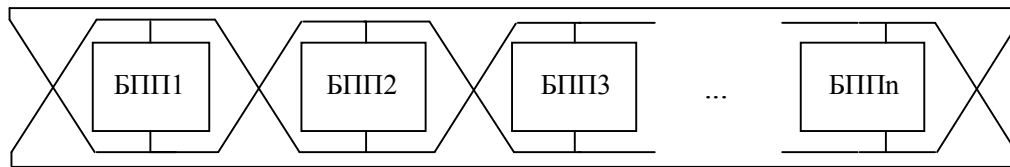


Рис. 3. Структура схемы коммутации  $K_1$

Согласно рис. 3 структура реконфигурируемого устройства по схеме коммутации  $K_1$  состоит из однотипных блоков БПП – блоков поиска пересечений, понимаемых здесь как элементарный элемент операционной части. Симметричные связи между смежными (по циклу) блоками обеспечивают перемещение слов для образования новых пар на проверку пересечений.

Схема коммутации  $K_2$  реализуется структурой, обеспечивающей распределенное объединение в пару слов, имеющих индексы с шагом  $\Delta=4$ . В силу распределенности связей в схеме коммутации  $K_2$  фиксируется общее количество продукций в ПС, равное 8. Двумерная схема коммутации для  $n=8$  приведена на рис. 4.

Согласно рис. 4 структура реконфигурируемого устройства по схеме коммутации  $K_2$  также состоит из однотипных блоков БПП. Симметричные связи между распределенными блоками обеспечивают перемещение слов для образования новых пар на проверку пересечений.

В известных работах [12, 13] разработаны варианты структуры БПП: конвейерная, матричная, ассоциативная организации. На основе регулярности размещения букв в анализируемых словах предложены однородные схмотехнические решения данного блока.

### Заключение

В рамках продукционной парадигмы вычислений для компенсации известной проблемы размерности в проблемно-поисковых задачах в статье разработана рекурсивная процедура структурной декомпозиции продукционной системы на части, основанные на известных конструктивных дизъюнкциях парных пересечений образцов между собой или образцов и модификаторов между собой. Основу декомпозиции составляют две схемы

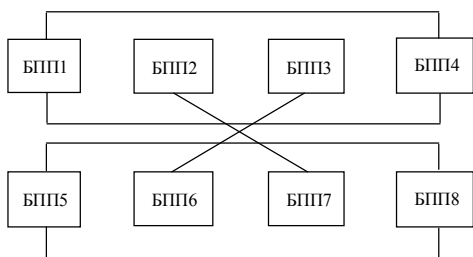


Рис. 4. Структура схемы коммутации  $K_2$



коммутаций, соединяющие в пары слова таким образом, чтобы выполнялись как смежные, так и шаговые объединения слов в пары. Используемый комплементарный подход чередования локальности и распределенности объединяемых в пару слов с оригинальной индексацией элементов в паре позволил получить на практике линейные временные затраты на перебор всех пересечений в продукционной системе.

Полученные структурные решения двух схем коммутаций имеют однородную структуру и регулярные связи между блоками, что позволило создать реконфигурируемое продукционное устройство обеспечения параллельных вычислений. Чередование схем коммутаций и однородность состава устройства с регулярными связями в виде множества однородных блоков поиска пересечений пар слов задают универсальность реализации. Она проявляется в построении общезначимого для задач ОСИ блока поиска пересечений на основе конвейерных или матричных или ассоциативных принципов [14, 15].

#### Литература

1. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Изд-во Янус-К, 2003. 380 с.
2. Бурцев В.С. Параллелизм вычислительных процессов и развитие архитектуры суперЭВМ. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. 416 с.
3. Архитектура вычислительных систем с элементами конвейерной обработки: учеб. пособие /

О.Я. Кравец, Е.С. Подвальный, В.С. Титов, А.С. Ястребов. СПб.: Политехника, 2009. 152 с.

4. Сергеев С.Л. Архитектуры вычислительных систем: учебник. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 231 с.

5. Титенко Е.А. Общая структурная схема реконфигурируемого мультипроцессора // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 9. С. 53-57.

6. Довгаль В.М., Титов В.С., Титенко Е.А. Стратегии быстрых символьных вычислений для исчислительной продукционной системы // Известия высших учебных заведений. Сер. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 2. С. 44-47.

7. Титенко Е.А., Евсюков В.С. Продукционные системы и теорема о конфликтных словах // Известия Тульского государственного университета. Серия техн. системотехника. 2006. Вып. 15. С.92-98.

8. Ва Б.У., Лоурай М.Б., Гоцзе Ли ЭВМ для обработки символьной информации // ТИИЭР. 1989. Т. 77. № 4. С. 5-40.

9. Успенский В.А., Семенов А.Л. Теория алгоритмов: основные открытия и приложения. М.: Наука, 1987. 288с.

10. Огнев И.В., Подолин И.В. Распознавание символов в ассоциативной осцилляторной среде // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. 2006. № 6. С. 55-66.

11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.

12. Корнеев В.В., Киселев А.В. Современные микропроцессоры. СПб.: БНВ-СПб, 2003. 448 с.

13. Титенко Е.А. Метод и однородное вычислительное устройство к-приблизительного поиска вхождений по образцу // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 7. С. 70-78.

14. Комаров А.Н. Исследование и разработка ассоциативных сред и методов обработки информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. М.: МЭИ(ТУ), 2002. 194 с.

15. Огнев И.В., Борисов В.В. Ассоциативные среды. М.: Радио и связь, 2000. 312 с.

Поступила 27.03.2018; принята к публикации 14.05.2018

#### Информация об авторах

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

## PLUGGING CHART FOR PERFORMANCE OF PAIR OPERATIONS IN A RECONFIGURABLE PRODUCTION DEVICE

E.A. Titenko

South West State University, Kursk, Russia

**Abstract:** the paper describes the provision of parallel computations within the production paradigm. The goal of the study is to reduce the time required to provide parallel production calculations for the processing of character data. This goal is achieved by splitting the production system into independent subsets of products and setting the conditions for their initialization. The method of solution is based on the apparatus of constructive logic. The rules of decomposition are presented in the form of constructive disjunctions. Members of constructive disjunctions specify variants of intersection of pairs of special words. Special words are pairs of product samples or pairs of sample and product modifier. The basis of the decomposition

consists of two commutation schemes. They combine the words into pairs in such a way that both adjacent and stepwise word combinations can be performed. The production system is represented by a bipartite graph. The left vertices of the bipartite graph correspond to the samples of the products. The right vertices of the bipartite graph correspond to the product modifiers. The alternation of commutation schemes allows to use the linearization property of the arrangement of pairs of samples and the property of two-dimensionality of the sample location and modifier in a pair. As a result, two commutation schemes provide a linear decoding time for the production system. A homogeneous array of blocks of search for intersections of word pairs with regular connections forms the basis of the reconfigurable production device. Connections set the commutation schemes. The alternation of commutation schemes and the uniformity of the composition of the device with regular connections constitute the content of the reconfiguration of the production device. The decomposition of the general structure into a homogeneous set of blocks of search for intersections of word pairs defines the universality of realization. It shows itself in the construction of the intersection search block based on pipeline, matrix, and associative principles

**Key words:** production system, reconfiguration, decomposition, plugging charts, intersection of words

### References

1. Kalyaev A.V., Levin I.I. "Modular-scalable multiprocessor systems with structural-procedural organization of calculations" ("Modul'no-narashchivaemye mnogoprocessornye sistemy so strukturno-procedurnoy organizatsiey vychisleniy"), Moscow, Yanus-K, 2003, 380 p.
2. Burtsev V.S. "Parallelism of computing processes and the development of supercomputer architecture" (Parallelizm vychislitel'nykh processov i razvitiye arhitektury superEVM), Moscow, Torus press, 2006, 416 p.
3. Kravets O.Ya., Podvalnyy E.S., Titov V.S., Yastrebov A.S. "Architecture of computing systems with elements of conveyor processing: manual" ("Arkhitektura vychislitel'nykh sistem s elementami konveernoy obrabotki"), St. Petersburg, Politekhnik, 2009, 152 p.
4. Sergeev S.L. "Architecture of computing systems" ("Arkhitektury vychislitel'nykh sistem"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2010, 231 p.
5. Titenko E.A. "General structural scheme of a reconfigurable multiprocessor", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol.7, no.9, p.53-57.
6. Dovgal' V.M., Titov V.S., Titenko E.A. "Strategies for fast symbolic computations for the computing production system", *Journal of Instrument Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie)*, 2008, vol. 51, no. 2, p.44-47.
7. Titenko E.A., Evsyukov V.S. "Production systems and the theorem on conflict words", *The Bulletin of Tula State University. Series: technology engineering (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universitet. Seriya tekhnol. Sistemotekhnika)*, 2006, issue 15, p. 92-98.
8. Wa B.U., Lauray M.B., Gotze Lee "Computer for information character processing", *TIIER*, 1989, vol.77, no.4, p. 5-40.
9. Uspenskiy V.A., Semenov A.L. "Theory of algorithms: basic discoveries and applications" ("Teoriya algoritmov: osnovnye otkrytiya i prilozheniya"), Moscow, Nauka, 1987, 288p.
10. Ognev I.V., Podolin I.V. "Recognition of symbols in an associative oscillatory environment", *Proceedings of Higher Educational Institutions. The Volga region (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region)*, 2006, no. 6, p.55-66.
11. Gonzalez R., Woods R. "Digital image processing", Moscow, Tekhnosfera, 2005, 1072p.
12. Korneev V.V., Kiselev A.V. "Advanced microprocessors" ("Sovremennye mikroprocessory"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2003, 448p.
13. Titenko E.A. "A method and a homogeneous computing device for k-approximate search for occurrences according to the sample" ("Metod i odnorodnoe vychislitel'noe ustroystvo k-priblizitel'nogo poiska vkhozheniy po obraztsu"), *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol.7, no.7, p.70-78.
14. Komarov A.N. "Research and development of associative area and methods of information processing. Dr. tech. sci. diss." ("Issledovanie i razrabotka associativnykh sred i metodov obrabotki informatsii: dis. cand. tekhn. nauk: 05.13.05"), Moscow, Moscow Power Engineering Institute, 2002, 194 p.
15. Ognev I.V., Borisov V.V. "Associative medium" ("Assotsiativnye sredy"), Moscow, Radio i svyaz', 2000, 312 p.

Submitted 27.03.2018; revised 14.05.2018

### Information about the author

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

УДК 004.94

## СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИБОРОВ АСПИРАЦИИ

© 2018 Е.С. Шарапова, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются моделирование процессов управления медицинским прибором аспирации с регулятором на базе нечеткой логики; основные методы управления медицинским прибором аспирации, обеспечивающие такие технические характеристики, как высокая мощность; точность регулирования; надежность; бесшумность. Приведены примеры синтеза регуляторов для нескольких типов медицинских аспираторов: с применением традиционного линейного ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора) и на основе нечеткой логики (fuzzy logic controller). Приведены численные характеристики эффективности регулирования классического ПИД-регулятора и регулятора с применением нечеткой логики (для разных типов приборов), также основные правила управления нечетким регулятором, применяемые для работы в этой системе, приведена обобщенная нечеткая модель регулятора динамического объекта, позволяющая формально описывать широкий класс односвязных динамических объектов управления

**Ключевые слова:** регулятор, нечеткая логика, аспиратор, электродвигатель

### Введение

Для реализации заданных показателей качества регулирования в различных отраслях промышленности ПИД-регуляторы были и в настоящее время остаются одними из самых распространенных, доказавших свою эффективность в управлении разнообразными объектами и процессами [1].

Однако проблема построения систем автоматического управления (САУ), способных функционировать в условиях неопределенности математического описания объекта управления, является одной из важнейших задач современного системного анализа, методы классической теории управления к которым трудно применить.

### Методика

Рассмотрим имитационную модель системы управления аспираторами с применением нечеткой логики в среде Matlab-Simulink.

Алгоритм нечеткого управления прибором аспирации представляет собой преобразование входных переменных нечеткого регулятора в его выходные переменные с помощью следующих взаимосвязанных процедур:

1. Преобразование входных физических переменных, получаемых от измерительных датчиков с объекта управления во входные лингвистические переменные нечеткого регулятора.

2. Обработка логических высказываний, называемых лингвистическими правилами, относительно входных и выходных лингвистических переменных регулятора.

3. Преобразование выходных лингвистических переменных нечеткого регулятора в физические управляющие переменные.

Для управления электроприводом введем две лингвистические переменные: «ошибка» - входная переменная; «управляющее воздействие» - выходная переменная. Синтез регулятора будем осуществлять в среде «MatLab» с помощью Toolbox «Fuzzy Logic». Он позволяет создавать системы нечеткого логического вывода и нечеткой классификации в рамках среды MatLab с возможностью их интегрирования в Simulink. Базовым понятием Fuzzy Logic Toolbox является FIS-структура - система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System). FIS-структура содержит все необходимые данные для реализации функционального отображения “входы-выходы” на основе нечеткого логического вывода.

Модуль fuzzy позволяет строить нечеткие системы двух типов - Мамдани и Сугэно. Основное отличие между системами Мамдани и Сугэно заключается в разных способах задания значений выходной переменной в правилах, образующих базу знаний. В системах типа Мамдани значения выходной переменной задаются нечеткими термами, в системах типа Сугэно - как линейная комбинация входных переменных [1].

Для систем управления медицинскими приборами аспирации с исполнительным органом в виде электропривода вводятся две лингвистические переменные. Первая из них «ошибка» по разряжению (или расходу) и вторая – «управляющее воздействие». Определим терм-множества для указанных переменных.

Для каждой лингвистической переменной определяется базовое терм-множество, включающее в себя нечеткие множества, которые можно обозначить: отрицательная высокая, отрицательная низкая, нуль, положительная низкая, положительная высокая. Прежде всего субъективно определяется то, что подразумевается под терминами «большая ошибка», «малая ошибка» и т.д., определяя функции принадлежности для соответствующих нечетких множеств. Здесь пока можно руководствоваться только требуемой точностью, известными параметрами для класса входных сигналов и здравым смыслом. Никакого жесткого алгоритма для выбора параметров функций принадлежности пока никому предложить не удалось.

Рассмотрим основные правила применимые для работы с электроприводом. Предположим, например, что выходной угол равен входному сигналу (т.е. ошибка - нуль). Очевидно, что это желаемая ситуация, и, следовательно, мы не должны ничего делать (управляющее воздействие - нуль).

Теперь рассмотрим другой случай: ошибка по положению сильно больше нуля. Естественно, мы должны её компенсировать, формируя большой положительный сигнал управления. Таким образом составлены два правила, которые могут быть формально определены так: если ошибка = нуль, то управляющее воздействие = нуль, если ошибка = большая положительная, то управляющее воздействие = большое положительное.

Всего для нечеткого регулятора, имеющего  $n$  входов и 1 выход, может быть определено  $I_1, I_2, \dots, I_n$  правил управления, где  $I_i$  – количество нечетких множеств для  $i$ -го входа, но для нор-

мального функционирования регулятора не обязательно использовать все возможные правила, а можно обойтись и меньшим их числом. В нашем случае для формирования нечеткого сигнала управления используются все 5 возможных правил.

Результирующее воздействие  $U$  будет определяться соответственно выполнению какого-либо правила. Если возникает ситуация, когда выполняются сразу несколько правил, то результирующее воздействие  $U$  находится по следующей зависимости:

$$U = \frac{\sum_{n=1}^N u_n \mu_{un}(u_n)}{\sum_{n=1}^N \mu_{un}(u_n)},$$

где  $n$  – число сработавших правил (дефазификация методом центра области),

$u_n$  – физическое значение управляющего сигнала, соответствующее каждому из нечетких множеств  $U_{Bo}$  (большая отрицательная ошибка),  $U_{Mo}$  (маленькая отрицательная ошибка),  $U_Z$  (нулевая ошибка),  $U_{Mp}$  (маленькая положительная ошибка),  $U_{Bp}$  (большая положительная ошибка);

$\mu_{Un}(u)$  – степень принадлежности управляющего сигнала  $u$  к соответствующему нечеткому множеству  $U_n = \{U_{Bo}, U_{Mo}, U_Z, U_{Mp}, U_{Bp}\}$ .

Рассмотрим преимущества данного типа регулятора на основе имитационной модели системы управления в условиях изменения исполнительного органа (электродвигателя).

На рис. 1 представлена система управления электродвигателем постоянного тока, входящего в состав насоса аспиратора, работающего в режиме регулирования расхода жидкости. В качестве регулятора использован ПИ-регулятор с фиксированными коэффициентами. Характер переходного процесса при применении двигателя мощностью 100 Вт приведен на рис. 2.

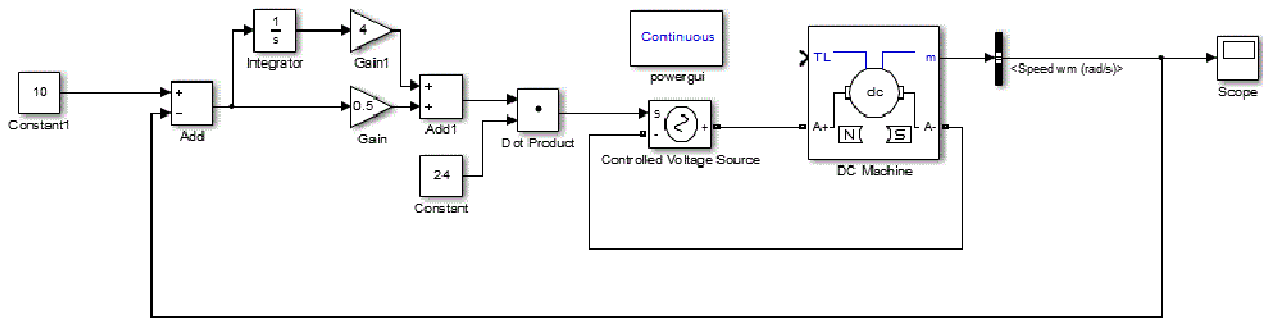


Рис. 1. Система управления электродвигателем постоянного тока

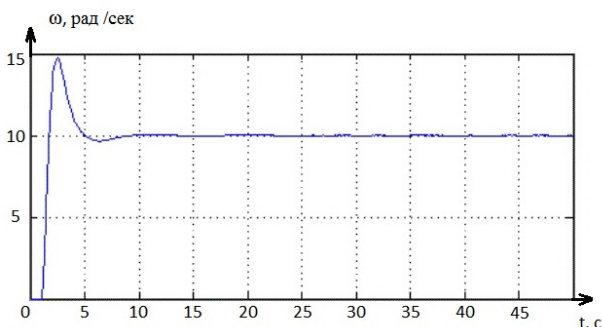


Рис. 2. Переходной процесс двигателя мощностью 100 Вт

При применении в составе того же прибора более мощного насоса, с двигателем более 300 Вт переходный процесс будет иметь следующую характеристику, показанную на рис. 3.

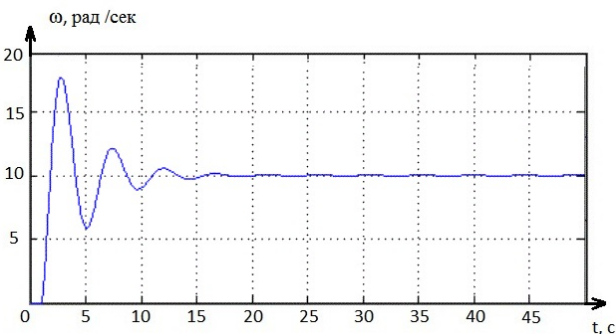


Рис. 3. Переходной процесс двигателя мощностью 300 Вт

Стоит отметить, что при изменении насоса произошло ухудшение переходных характеристик aspirатора, вследствие изменения параметров системы управления ПИ-регулятора.

Заметим, что анализ и управление сложными, нелинейными и/или нестационарными системами является сложной задачей с использованием традиционных методов из-за неопределенностей, накладываемых на недетерминированные параметры системы. Теория нечетких множеств привела к новому методу управления, называемому нечеткое управление, способному справляться с неопределенностью системы.

Предлагаемый подход использует один нечеткий регулятор с методом оптимизации для получения разнообразных пользовательских характеристик системы управления в реальном времени. При этом параметры системы могут быть разнообразны. Таким образом, решится проблема проектирования адаптивных ПИД-регуляторов без длительной ручной настройки. Рассмотрим математическую модель двигателя насоса с нечетким регулятором (рис. 4), на основе блока fuzzy controller.

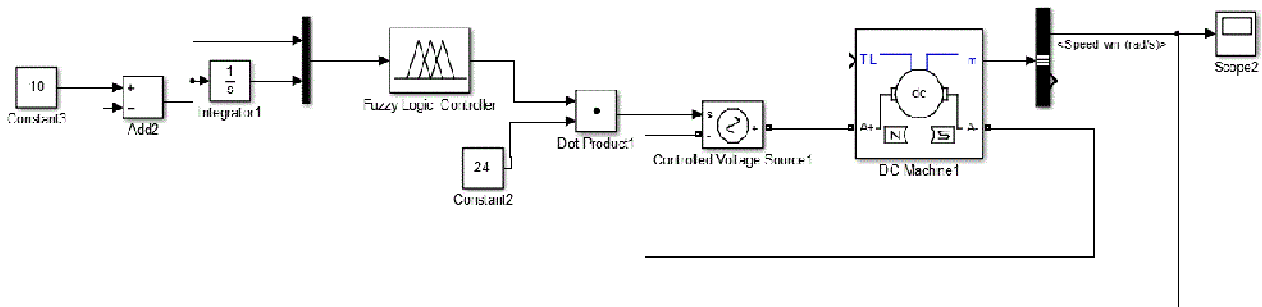


Рис. 4. Математическая модель двигателя насоса с нечетким регулятором



Закон управления содержит три линейных участка (рис. 5, где «ОМ», «ПМ», «ОС», «ПС», «ОБ», «ПБ» — лингвистические метки «отрицательное малое», «положительное малое», «отрицательное среднее», «положительное среднее», «отрицательное большое», «положительное большое»).

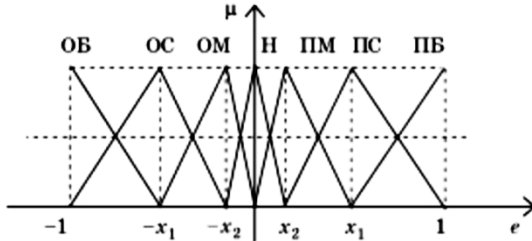


Рис. 5. Описание входных термов нечеткого регулятора

Выходные термы НЛР можно расположить равномерно по базовой шкале (рис. 6), тогда каждому управляющему правилу (их, очевидно, оказывается семь) будет соответствовать свой коэффициент усиления [2].

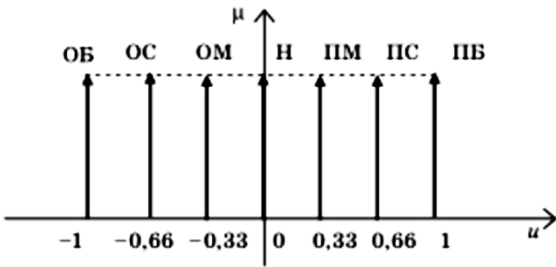


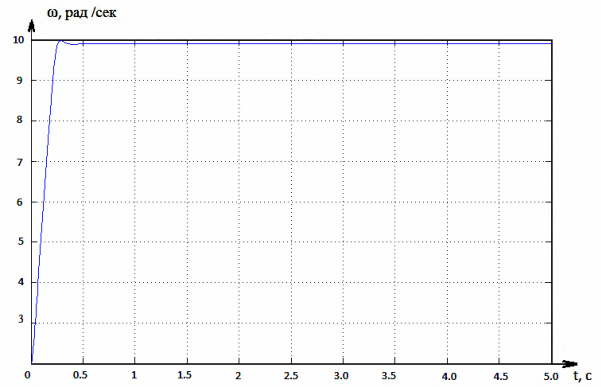
Рис. 6. Описание выходных термов нечеткого регулятора

Таким образом, синтез нечеткого регулятора заключается в выборе положения центров термов «ПМ» и «ПС» (симметрично располагаются «ОМ» и «ОС»).

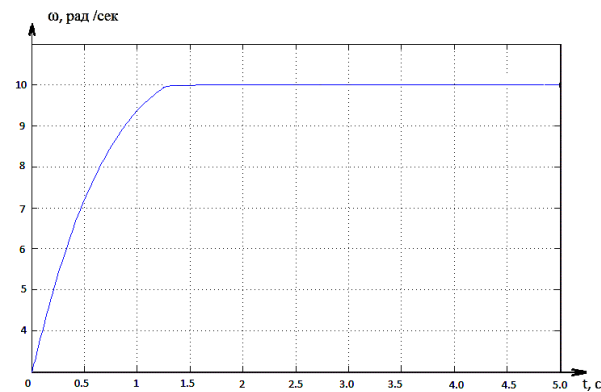
Расширенная таблица правил

$(de/dt)^*$	$e^*$						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н
ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ
ОМ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС
Н	ОБ	ОС	ОН	Н	ПМ	ПС	ПБ
ПМ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ
ПС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ
ПБ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ	ПБ

На рис. 7 приведены результаты моделирования нечеткого регулятора для двух видов насоса: с двигателем а – 100 Вт и б – 300 Вт.



а



б

Рис. 7. Моделирование нечеткого регулятора с двигателем а – 100 Вт и б – 300 Вт

Определим показатели качества переходного процесса:

- время достижения первого максимума  $t_{max}$  для двигателя ПИД-регуляторов: мощностью 100 Вт составило 2,3 с, для двигателя мощностью 300 Вт составило 2,5 с; с нечетким регулятором мощностью 100 Вт составило 0,25 с, для двигателя мощностью 300 Вт составило 1,25 с;

- время перерегулирования для двигателя ПИД-регуляторов: мощностью 100 Вт составило 50%, для двигателя мощностью 300 Вт составило 75%; с нечетким регулятором мощностью 100 Вт составило 1%, для двигателя мощностью 300 Вт процесс аperiodический (0 %).

Таким образом, при использовании нечеткого регулятора время достижения первого максимума переходного процесса уменьшилось для 100 Вт двигателя в 9 раз, для 300 Вт уменьшилось в 2 раза. Время перерегулирования для 100 Вт двигателя уменьшилось на 49%, для 300 Вт двигателя на 75%.

## Выводы

Нечеткий регулятор показывает намного лучшие динамические свойства, чем классический ПИД-регулятор, поэтому практический эффект от замены регулятора вполне очевиден.

Таким образом, для синтеза регулятора требуется формализованный набор правил и методов вывода, характерный для данного типа приборов и датчиков обратной связи, и не динамические характеристики самой электромеханической системы не вносят большой разницы в результат работы регулятора, следовательно, при разработке целого ряда приборов с разными физическими параметрами такими, как момент инерции рабочего органа, используемый электродвигатель и т.д. можно пользоваться одним регулятором с использованием самонастройки за счет нечеткой логики.

Данный метод, а также его интерпретации с использованием различных методов оптимизации позволяет использовать один модуль управления - регулятор (унифицированный) для целого ряда приборов, что существенно удешевит конечный продукт, вследствие уменьшения затрат на производство и настройку подобной системы.

## Литература

1. Шарапова Е.С., Бурковский В.Л. Имитационное моделирование медицинских приборов аспирации с системой управления на базе нечеткой логики // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. 2017. Т. 2. С. 153.
2. Бураков М.В., Коновалов А.С. Синтез нечетких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 27.

Поступила 12.03.2018; принята к публикации 14.05.2018

## Информация об авторах

**Шарапова Екатерина Славиковна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: levich\_ekaterina@rambler.ru

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

## SYNTHESIS OF FUZZY REGULATOR FOR MEDICAL ASPIRATION DEVICES

**E.S. Sharapova, V.L. Burkovskiy**

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

**Abstract:** the article considers the modeling of control processes of a medical aspiration device with a regulator based on fuzzy logic, basic methods of control of a medical device for aspiration providing such technical characteristics as: high power, accuracy of regulation, reliability and noiselessness. The article gives an example of a controller synthesis using fuzzy logic of a medical aspirator, using a traditional linear PID controller and based on fuzzy logic controller. Numerical characteristics of the control efficiency of the classical PID controller and controller with the use of fuzzy logic (for different types of devices), as well as the basic rules for controlling the fuzzy controller used to operate in this system, are given. A generalized fuzzy controller model for a dynamic object allows formally to describe a wide class of simply connected dynamic control objects

**Key words:** regulator, fuzzy logic, aspirator, electric motor

## References

1. Sharapova E.S., Burkovskiy V.L. "Simulation modeling of medical aspiration devices with a control system based on fuzzy logic", *New technologies in scientific research, design, management, production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, pryektirovaniy, upravlenii, proizvodstve)*, 2017, vol. 2, p. 153.
2. Burakov M.V., Kononov A.S. "Synthesis of fuzzy logic controls", *Information-control systems (Informatsionno-upravlyayushchie sistemy)*, 2011, no. 1, p. 27.

Submitted 12.03.2018; revised 14.05.2018

## Information about the authors

**Ekaterina S. Sharapova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: levich\_ekaterina@rambler.ru

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

УДК 624.01

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

© 2018 Р.А. Шепс, Н.В. Портнова, Т.В. Щукина, И.И. Переславцева

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

**Аннотация:** наиболее распространенным и доступным возобновляемым источником на всей территории РФ является солнечная радиация, успешно утилизируемая для отопления, горячего водоснабжения и электроснабжения зданий на протяжении многих десятилетий в ведущих европейских странах. Но положительный европейский опыт часто не применим в суровых климатических условиях РФ. Учитывая сложные метеоусловия зимних сезонов на большей территории РФ, конструкции ограждений, утилизирующие солнечное излучение, должны иметь не только аккумулирующий слой, но и характеризоваться высокими теплозащитными свойствами. В работе рассматривается вопрос эффективного использования солнечной энергии посредством конструирования энергоэффективных ограждающих конструкций. Предлагается конструкция наружной стены, позволяющая эффективно утилизировать солнечную энергию для снижения нагрузок на отопление зданий. Особенностью технического решения является использование тепловой изоляции, отделенной от аккумулирующего слоя воздушной прослойкой. Данное конструктивное исполнение позволяет избежать переохлаждения помещений при неблагоприятных погодных условиях в холодный период года и перегрева в теплый. Полученные результаты позволяют сделать заключение о безусловной перспективе организации пассивных систем солнечного отопления при архитектурно-планировочных решениях, предполагающих пофасадное остекление. Предложенное конструктивное решение наружного ограждения позволит не только эффективно утилизировать солнечное излучение, но и сохранять достигнутый температурный режим в помещениях за счет применения тепловой изоляции

**Ключевые слова:** энергосбережение, солнечная энергия, строительные конструкции

**Введение**

Сложившаяся в результате внешнего политического влияния сложная экономическая ситуация в РФ негативно отразилась на темпах внедрения энергосберегающих технологий во всех сферах производственной деятельности. Между тем принятая ранее законодательная база была направлена на активизацию программ по сокращению потребления ресурсов, выполнение которых наряду с достижением экономии неизбежно приведет к модернизации и поиску приемлемых для конкретных условий эксплуатации нетрадиционных источников энергии.

Наиболее распространенным и доступным возобновляемым источником на всей территории РФ является солнечная радиация, успешно утилизируемая для отопления, горячего водоснабжения и электроснабжения зданий на протяжении многих десятилетий в ведущих европейских странах. Такое нетрадиционное восполнение ресурсов, прежде всего, связано со стремлением к энергетической независимости, достигаемой различными государственными программами стимулирования и льготного кредитования затрат на оборудование для возоб-

новляемых источников. Но положительный европейский опыт часто не применим в суровых климатических условиях РФ. Жаркие летние месяцы и экстремально низкие температуры наружного воздуха в зимний сезон диктуют особые требования к ограждающим конструкциям, тепловой защите и энергосбережению в системах жизнеобеспечения зданий. Несмотря на метеорологическую нестабильность, достигнутые результаты в массовой эксплуатации геотермальных установок в Северной Америке доказывают перспективность их использования и на территории России.

**Постановка задачи**

Значительная часть потребляемой тепловой энергии зданиями теряется в холодный период года через наружные ограждения [1]. Но их облучение при достаточном количестве часов солнечного сияния и технических решениях, направленных на эффективное поглощение длинноволнового излучения, сокращает потребление тепловой энергии системами отопления. Поэтому в климатических районах с ресурсной обеспеченностью солнечной радиацией следует ее пассивно использовать для энер-

госберегающего поддержания требуемых показателей температуры в помещениях [2]. Учитывая сложные метеосостояния зимних сезонов на большей территории РФ, конструкции ограждений, утилизирующие солнечное излучение, должны иметь не только аккумулирующий слой, но и характеризоваться высокими теплозащитными свойствами. Сочетание указанных требований достигается в техническом решении [3] с несущим аккумулирующим слоем, закрытым от внешнего воздействия светопрозрачным ограждением и дополнительно имеющим эффективную тепловую изоляцию с организованной воздушной прослойкой. Воплощение такого принципа конструирования не вызовет затруднений при современных тенденциях архитектуры зданий (рис. 1). Проектируемые значительные площади остеклений следует использовать для организации энергоактивных наружных ограждений на южных фасадах сооружений.

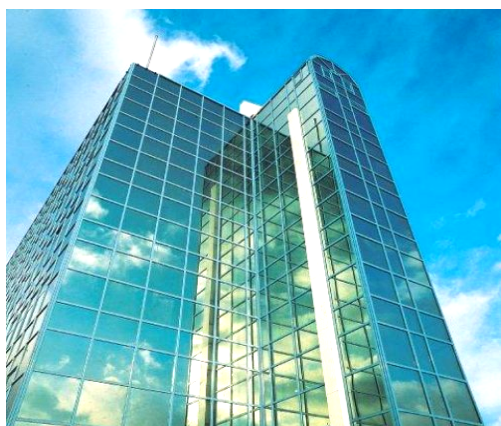


Рис. 1. Железобетонные несущие конструкции здания под светопрозрачным декоративным покрытием

### Проектирование ограждающих конструкций

Представленная на рис. 2 схема наружной стены при ее южной ориентации позволяет посредством открытия воздушных клапанов организовать теплосъем с аккумулирующего материала, нагреваемого солнечной энергией в холодный период года. При этом температура воздуха, поступающего через нижние воздушные клапаны, повышается при контакте с облучаемой поверхностью, затем через верхние клапаны теплый воздух направляется в отапливаемое помещение. При закрытых воздушных клапанах слой тепловой изоляции создает термическое сопротивление, значительно сокращая теплопотери в холодный и теплоступле-

ния в теплый периоды года. Для эффективной утилизации солнечного излучения следует предусмотреть автоматическое переключение клапанов, используя для этой цели электроэнергию, вырабатываемую малым количеством фотоэлементов, расположенных на гелиоактивном фасаде здания [4].

При конструировании наружного ограждения с функцией утилизации солнечного излучения толщина применяемой тепловой изоляции может быть определена посредством теплотехнического расчета при соблюдении условия энергосбережения [5]. Для ориентировочной оценки необходимого объема аккумулирующего материала воспользуемся уравнением теплового баланса, пренебрегая конвективным теплообменом в воздушной прослойке, что соответствует режиму закрытых клапанов. Данный режим на первоначальном этапе поглощения солнечного излучения южным фасадом позволяет прогреть аккумулирующий слой с превышением температуры внутреннего воздуха помещений [6]. Это условие обеспечит последующий режим пассивного солнечного отопления.

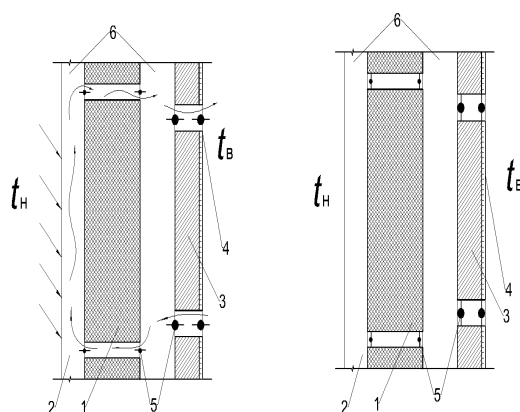


Рис. 2. Схема пассивной утилизации солнечной энергии при энергоэффективном наружном ограждении:  
 а — при интенсивном облучении в холодный период года;  
 б — в ночное время или при неблагоприятных погодных условиях в холодный период, или в летние месяцы; 1 — теплоаккумулирующий слой; 2 — светопрозрачное покрытие; 3 — теплоизоляционный материал; 4 — внутренняя отделка; 5 — клапаны; 6 — воздушная прослойка

Учитывая принятое допущение, количество тепла, в МДж/(м<sup>2</sup>·сут), поглощаемого под светопрозрачным покрытием облучаемой поверхностью наружного ограждения при ее площади 1 м<sup>2</sup>, можно определить из выражения [7]:

$$q_K = \bar{E}_{OP} \Phi \eta_0, \quad (1)$$



где  $\overline{E}_{\text{ор}}$  — среднее дневное количество суммарного солнечного излучения, поступающего на вертикальную поверхность с учетом ее ориентации за рассматриваемый месяц, МДж/(м<sup>2</sup>·сут);  $\Phi$  — степень использования солнечной радиации, зависящая от конструктивных особенностей коллекторов [7] и стремящаяся к единице при простых устройствах прямого преобразования солнечной энергии;  $\eta_0$  — эффективный оптический КПД коллектора пассивной системы утилизации.

Поглощенное излучение будет способствовать прогреву аккумулирующего слоя в соответствии с зависимостью:

$$q_k = c10^{-3} m(t_k - t_H), \quad (2)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость аккумулирующего материала, кДж/(кг·°С);  $m$  — масса нагреваемого материала, кг;  $t_H$ ,  $t_k$  — начальная и конечная температура аккумулирующего слоя, °С.

Задавая толщину облучаемого слоя, при размере его воспринимающей поверхности 1000x1000 мм из уравнений (1, 2) можно найти конечную температуру при среднемесячных актинометрических показателях и температуре наружного воздуха:

$$t_k = t_H + \frac{\overline{E}_{\text{ор}} \Phi \eta_0}{\delta \rho c}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — толщина аккумулирующего железобетонного слоя, м;  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Одновременно при проектировании ограждающих конструкций необходимо учитывать распределение температуры в ограждающем слое теплопроводящей среды. Для решения стандартных задач используется уравнение теплопроводности [8]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  — теплопроводность среды,  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — объемная плотность. Уравнение (4) сопровождается начальными и граничными условиями, задающими условия теплообмена с окружающей средой или соседними слоями. На стыке слоев выполняется условие теплового контакта, т.е. равенства температур и равенства тепловых потоков

$$T|_{x=0} = T|_{x=+0}, \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + K(T_{\text{ext}}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=+0} + q(t) \quad (6)$$

где учтено, что на границе материалов внутри конструкции поглощается дополнительный тепловой поток с плотностью  $q(t)$ , вызванный солнечным излучением,  $K$  — коэффициент теплообмена лучистой энергией,  $T_{\text{ext}}(t)$  — температура окружающей среды. Теплообмен на поверхности ограждения учитывается с помощью граничного условия

$$\alpha(T_{\text{ext}}(t) - T(-0, t)) = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=-0} \quad (7)$$

$T_{\text{ext}}(t)$  может быть температурой наружного воздуха для внешней границы конструкции или постоянной температурой внутри помещения  $T_0$ .

Следствием линейности уравнения теплопроводности и линейных граничных условий является принцип суперпозиции температурных возмущений [9]. Он позволяет представить исходную задачу в виде совокупности двух более простых задач. Первая задача является стационарной и учитывает все стационарные составляющие в граничных условиях. Вторая задача является квазистационарной и описывает установившиеся колебательные режимы с учетом периодически меняющейся со временем температуры наружного воздуха  $T_{\text{ext}}(t) = T_{\text{ext}} + \Delta T \cos(\omega t)$  и потока излучения, поглощаемого внутри конструкции на границе раздела сред  $q(t) = q_0(1 + \cos(\omega t))$ . Квазистационарный режим в слое толщиной  $l$  устанавливается спустя некоторое время  $t$ , определяемое коэффициентом Фурье  $Fo = \lambda t / (c\rho l^2) \sim 1$ , за которое начальное температурное распределение переходит в стационарное. Стационарная часть расчета решается с учетом кусочной линейности решений. Полное решение ищется в виде совокупности линейных функций  $T_k = a_k x + b_k$ . Итогом применения граничных условия является система линейных уравнений для определения постоянных коэффициентов  $a_k, b_k$ .

Для решения нестационарной части задачи перейдем к комплексному представлению, и ищем решение в виде комплексной функции

$$T(x, t) = u(x)e^{i\omega t}, \quad (8)$$



где  $u(x)$  – пространственная часть тепловой волны,  $\omega$  – частота теплового возмущения. Для удобства описания температурных волн

введем коэффициент затухания  $\beta = \sqrt{\frac{\omega c \rho}{2\lambda}}$ .

Пространственная часть решения в каждой области  $k = 1, 2, \dots$  имеет вид

$$u_k(x) = A_k \exp(-\gamma_k x) + B_k \exp(\gamma_k x), \quad (9)$$

где  $\gamma_k = \beta_k + i\beta_k$ . После подстановки граничных условий возникает линейная система уравнений, которая решается численно. В окончательном решении нужно перейти к действительной форме, взяв действительную часть полученной зависимости.

### Результаты

Рассмотрим на примере климатических условий Московской области [9] достигаемые температурные показатели в железобетонном несущем слое наружного ограждения южной ориентации при пассивной утилизации солнечного излучения. Представленные на рис. 3 результаты расчетов показывают необходимость применения легкой железобетонной конструкции, толщина которой может быть не более 70 мм и не менее 50 мм при современных КПД для такого типа коллекторов, не превышающих значение 0,4. При использовании остекления с высоким коэффициентом пропускания и окрасочных покрытий для аккумулирующего слоя, максимально усиливающих поглощающий эффект, повысится КПД пассивной утилизации [10]. Тогда при прогнозируемом его увеличении до значения 0,5 несущая конструкция должна быть толщиной от 100 мм до 70 мм. Если проектными решениями предусмотрена незначительная толщина железобетона конструкции, то целесообразно на облучаемой поверхности разместить систему водяного охлаждения [3], теплоноситель которой при интенсивном облучении будет направляться от потребителей на горячее водоснабжение.

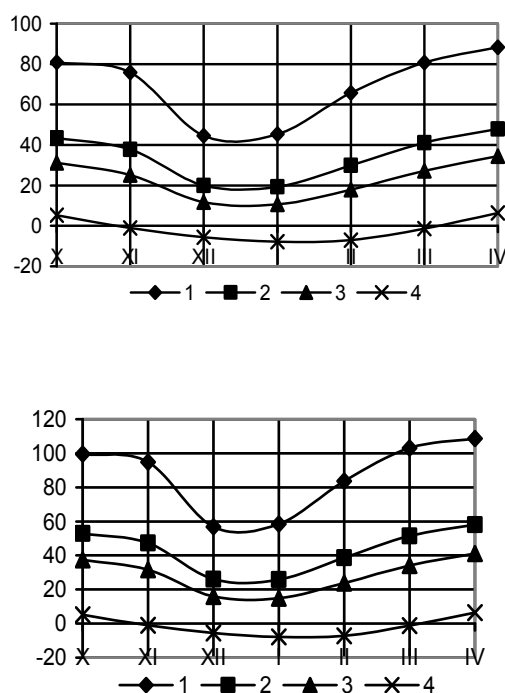


Рис. 3. Достижимая под воздействием солнечного излучения температура аккумулирующего железобетонного слоя при различной его толщине: а — при современных КПД пассивных систем, равных 0,4; б — с учетом дальнейшего повышения оптических показателей и достижения КПД значения 0,5; 1, 2, 3 — температура прогрева слоя при его толщине 50, 100, 150 мм, соответственно; 4 — среднемесячная температура наружного воздуха

### Выводы

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности применения пассивных систем солнечного отопления при реализации архитектурно-планировочных решений, предполагающих остекление по фасаду зданий. Предложенное конструктивное решение наружного ограждения позволит не только эффективно утилизировать солнечное излучение, но и сохранять достигнутый температурный режим в помещениях за счет применения тепловой изоляции.

### Литература

1. Шепс Р.А., Яременко С.А., Переславцева И.И. Влияние солнечной энергии на тепловую защиту объектов строительства // Энергосбережение и энергоэффективность на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы I Всерос. науч.-техн. конф., посвященной памяти д-ра техн. наук, профессора, А.А. Сандера, 2017. С. 199-209.
2. Турулов В.А. Гелиоактивные стены зданий. М.: Издательство АСВ, 2011. 168 с.

3. Заявка на получение патента № 2015106253 от 24.02.2015. Солнечный тепловой коллектор.

4. Шепс Р.А., Яременко С.А., Агафонов М.В. Учет солнечной энергии при проектировании тепловой защиты зданий // Жилищное строительство. 2017. № 1-2. С. 29-32.

5. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: ООО «Аналитик», 2012.

6. Жердыкина М.Н., Яременко С.А. Системы обеспечения микроклимата зданий и сооружений. Воронеж, 2013.

7. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. М.: ООО «Аналитик», 2012.

8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: МГУ, 1999. 798 с.

9. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. I. Отопление / В.Н. Богословский и др.; под ред. И.Г. Старовойра и Ю.И. Шиллера. М.: Стройиздат, 1990.

10. Shchukina, T.V., Sheps R.A., Kuznetsova N.V. Passive Solar Heating: How to Control the Heating Regime // International journal of environmental & science education. 2016, vol. 11, no. 18, 11361-11373.

Поступила 21.03.2018; принята к публикации 16.05.2018

### Информация об авторах

**Шепс Роман Александрович** – старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: romansheps@yandex.ru

**Портнова Надежда Валериевна** – аспирант кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nportnova@vgsu.vrn.ru

**Щукина Татьяна Васильевна** - канд. техн. наук, профессор кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Schukina.niki@yandex.ru

**Переславцева Инна Игоревна** – старший преподаватель кафедры техносферной и пожарной безопасности, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: innapb@mail.ru

## USE OF SOLAR RADIATION AT APPLICATION ENERGY EFFICIENT FENCING CONSTRUCTIONS

R.A. Sheps, N.V. Portnova, T.V. Shchukina, I.I. Pereslavl'tseva

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the most common and renewable source available on the entire territory of the Russian Federation is the solar radiation successfully utilized for heating, hot water and electricity supply of buildings for many decades in the leading European countries. However, the positive European experience is often not applicable in the harsh climate of the Russian Federation. Given the difficult weather conditions of winter seasons, most of the territory of the Russian Federation, construction of fencing, utilizing the solar radiation should have not only the storage layer, but also high heat-shielding properties. This paper examines the issue of effective use of solar energy by designing energy efficient fencing structures. It is proposed to design the exterior walls to effectively utilize solar energy to reduce heating loads on the buildings. The feature of the technical solution is using heat isolation, separated from the storage layer by an air gap. This design allows to avoid overcooling of the premises in adverse weather conditions in cold seasons and overheating in warm ones. The obtained results show the unconditional prospect of the organization of passive solar heating systems with architectural and designing solutions, involving facade glazing. The proposed design solution will not only efficiently utilize the solar radiation, but also maintain the temperature in the premises through the use of thermal insulation

**Key words:** energy saving, solar energy, building structures

### References

1. Sheps R.A., Yaremenko S.A., Pereslavl'tseva I.I. "Influence of solar energy on thermal protection of constructions", *Energy saving and energy efficiency at the industrial enterprises housing and communal services. Proc. of 1st Russian scientific and technical conference devoted to memory of the Dr.Sci.Tech., Professor A.A. Sander (Energoberezhenie i energoeffektivnost' na promyshlennyykh predpriyatiyakh zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve. Materialy I Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati d-ra tekhn. nauk, professora A.A. Sander.)*, 2017, pp. 199-209.

2. Turulov, V.A. "Helioactive walls of buildings" ("Gelioaktivnyye steny zdaniy"), Moscow, ASV, 2011, 168 p.

3. Application for the patent no. 2015106253, 2/24/2015, "Solar thermal collector" ("Solnechnyy teplovoy kollektor").

4. Sheps R.A., Yaremenko S.A., Agafonov M.V. "Accounting of solar energy at designing thermal protection of buildings", *Housing construction (Zhilishchnoe stroitel'stvo)*, 2017, no. 1-2, pp. 29-32.

5. Set of rules 50.13330.2012. "Thermal performance of the buildings", the actual edition of Construction Norms and Regulations 23-02-2003, Moscow, LLC «Analitik», 2012.

6. Zherlykina M.N., Yaremenko S.A. "Systems of providing microclimate of buildings and constructions" ("Sistemy obespecheniya mikroklimata zdaniy i sooruzheniy"), Voronezh, 2013.
7. Set of rules 131.13330.2012. "Building climatology", the actual edition of Construction Norms and Regulations 23-01-99\*, Moscow, LLC «Analitik», 2012.
8. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. "Equations of mathematical physics" ("Uravneniya matematicheskoy fiziki"), Moscow, MSU, 1999, 798 p.
9. Bogoslovskiy V.N. "Internal sanitary devices. Part 1. Heating" ("Vnutrenniye sanitarno-tehnicheskiye ustroystva. V 3 ch. Ch. I. Otoplenie"), Moscow, Stroyizdat, 1990.
10. Shchukina T.V., Sheps R.A., Kuznetsova N.V. "Passive solar heating: how to control the heating regime", *International journal of environmental & science education*, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 11361-11373.

Submitted 21.03.2018; revised 16.05.2018

#### Information about the authors

**Roman A. Sheps**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: romansheps@yandex.ru  
**Nadezhda V. Portnova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nportnova@vgasu.vrn.ru.  
**Tat'yana V. Shchukin**, Cand. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Schuki-na.niki@yandex.ru  
**Inna I. Pereslavl'tseva**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: innapb@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ВОДООХЛАДИТЕЛЯ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМ СЛОЕМ НАСАДКИ И ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНИ

© 2018 Ю.Н. Агапов, Д.А. Давыдов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** приведены результаты экспериментального сравнения водоохладителя с центробежным псевдооживленным слоем и вентиляторной градирни. В частности, показаны зависимости удельной холодопроизводительности и теплогидравлического показателя аппаратов от начальной температуры жидкости. Эксперименты проводились на стенде, предназначенном для исследования гидродинамических и тепловых характеристик трехфазного псевдооживленного слоя. При этом в качестве рабочих элементов использовались опытные образцы аппаратов. Основными задачами исследований являлись: проверка работоспособности аппаратов, определение их холодопроизводительности и теплогидравлического показателя. Экспериментальное сравнение водоохладителя с центробежным слоем мелкозернистой насадки с вентиляторной градирней показало, что по удельной холодопроизводительности исследованный аппарат эффективнее градирни в два раза, а по теплогидравлическому показателю - в полтора раза. Результаты эксперимента позволяют рекомендовать псевдооживленный слой в качестве насадки в градирнях с целью обеспечения оптимального технологического режима охлаждения оборотной воды потоком воздуха

**Ключевые слова:** псевдооживленный слой, межфазовый теплообмен, насадка, градирня

### Введение

Проблема охлаждения циркуляционной воды существует во многих отраслях промышленности и, в частности, на тепловых электрических станциях. Для этой цели используют градирни различных конструкций. В реальных условиях работы промышленных градирен охлаждение воды осуществляется в узком температурном диапазоне (максимум 10 – 12 °С). Перспективным направлением для интенсификации тепломассообменных процессов в градирнях является использование псевдооживленного слоя в качестве насадки. С целью проверки работоспособности и эффективности водоохладителя с центробежным слоем было проведено его экспериментальное сравнение со стандартной вентиляторной градирней.

### Описание экспериментальной установки

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для исследования процессов охлаждения воды в таком устройстве.

Экспериментальный охладитель состоит из центробежного вентилятора 1 и кольцевой камеры 2, образованной двумя коаксиально расположенными цилиндрическими поверхностями 3 и 4. В камере установлена кольцевая форсунка 5, через которую вода

орошает слой мелкозернистого материала 6, расположенный на сетке, накрывающей кольцевую газораспределительную решетку 7 с профильными лопатками 8. Под решеткой находится ванна, предназначенная для сбора охлажденной воды 9. Внутренняя цилиндрическая поверхность 4 выполнена перфорированной для фильтрации через нее воздуха и отвода его из кольцевой камеры.

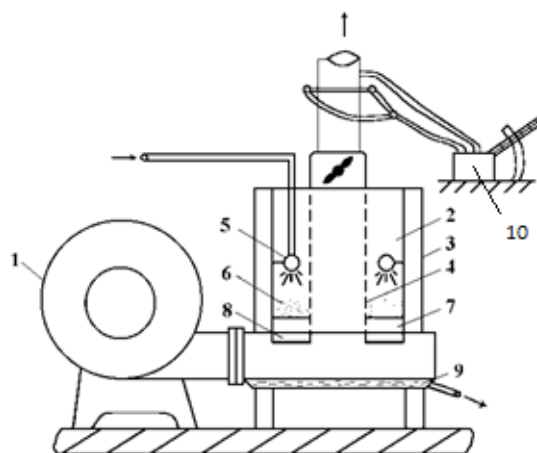


Рис. 1. Схема экспериментального водоохладителя с центробежным слоем мелкозернистой насадки:  
1 – центробежный вентилятор; 2 – кольцевая камера; 3, 4 – цилиндрические поверхности; 5 – кольцевая форсунка; 6 – слой мелкозернистого материала; 7 – газораспределительная решетка; 8 – профильные лопатки; 9 – ванна; 10 – микроманометр типа ММН-240

Принцип работы охладителя следующий. Воздух с помощью вентилятора через ванну и

решетку поступает под углом к горизонтальной плоскости в слой мелкозернистого материала. Вследствие этого частицы материала переходят в псевдооживленное состояние и начинают перемещаться вдоль кольцевой решетки в сторону наклона лопаток. Так как сверху частицы орошаются водой, то на их высокоразвитой поверхности происходит контакт охлаждаемой воды с атмосферным воздухом, в результате чего вода охлаждается. Интенсивность теплообмена в этом случае на порядок выше, чем на пластинах, что позволяет значительно уменьшить габариты, а удельную холодопроизводительность устройств – увеличить.

Экспериментальная градирня с центробежным псевдооживленным слоем в качестве насадки оборудована центробежным вентилятором с электродвигателем мощностью  $N = 0,75$  кВт. Холодопроизводительность установки определяется в процессе эксперимента. Удельная поверхность теплообменной насадки зависит от диаметра твердых частиц и определяется из следующего соотношения  $f_v = 6(1 - \varepsilon) / d_s$ .

В системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий для охлаждения воды используются градирни различного типа: башенные, вентиляторные и открытые (атмосферные). Наибольшее распространение получили вентиляторные градирни, воздух в которых прокачивается с помощью нагнетательных или отсасывающих вентиляторов. По сравнению с другими типами охладителей такие градирни обеспечивают более глубокое охлаждение циркуляционной воды, маневренное регулирование температуры охлаждаемой жидкости и требуют меньшей площади застройки. Вентиляторные градирни дешевле на 50 – 60 % башенных, строительство их проще, однако они имеют значительные эксплуатационные расходы [1].

Поэтому в качестве сравниваемого варианта принята вентиляторная градирня со следующими параметрами:

- холодопроизводительность до 900 кВт;
- расход воды до 2 кг/с.

Вентиляторная градирня снабжена осевым вентилятором с электродвигателем мощностью  $N = 4$  кВт. В качестве насадки используются пакеты мипластовых пластин с удельной поверхностью  $f_v = 100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ .

Основным элементом вентиляторной градирни (рис. 2) является осевой вентилятор 1,

установленный в горловине башни 2 над оросителями (форсунками) 5. Под ним в оросительной башне расположена теплообменная насадка 6, которая используется для увеличения поверхности контакта охлаждаемой жидкости с воздухом. В нижней части оросительной башни имеются воздухозаборные окна 3 и ванна сбора охлажденной воды 4.

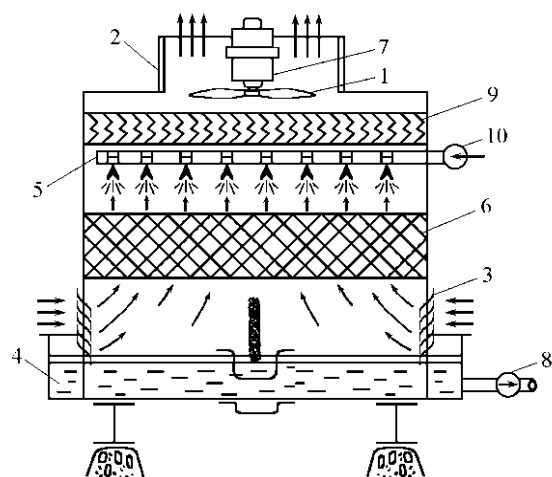


Рис. 2. Основные элементы вентиляторной градирни с пластинчатой насадкой: 1 – осевой вентилятор; 2 – башня; 3 – воздухозаборные окна; 4 – ванна сбора воды; 5 – оросители; 6 – теплообменная насадка; 7 – электродвигатель; 8 – насос; 9 – каплеуловитель; 10 – патрубок

В вентиляторной градирне охлаждение воды осуществляется следующим образом. Вода поступает через патрубок 10 и при помощи форсунок орошает насадку, состоящую из пакетов мипластовых пластин. Стекая по пластинам в виде пленки, вода контактирует с поступающим противоточно ей атмосферным воздухом, засасываемым осевым вентилятором через воздухозаборные окна. При этом воздух охлаждает воду, увлажняясь, и на выходе имеет относительную влажность, близкую к 100 %. В процессе теплообмена воды и воздуха в вентиляторных градирнях потери воды от испарения и уноса, достигают 5 % всей охлаждаемой воды [2]. Из ванны сбора воды она подается в охлаждаемые элементы теплотехнологических установок при помощи насоса 8.

Опыты проводились по следующей методике. При фиксированном расходе воздуха в аппарат загружалась определенная масса дисперсного материала и включались



вентиляторы. Расход воды через форсунку подбирался таким образом, чтобы не было уноса капель потоком воздуха. В отдельных опытах включали калорифер и осуществляли предварительный подогрев потока воздуха. После установления квазистационарного режима, о чем свидетельствовали неизменные показания всех термомпар, измеряли расходы воздуха и жидкости, температуры воздуха по сухому и мокрому термометру и воды на входе в охладители и на выходе из них В процессе проведения исследований изменяли расход воздуха и воды, а также массу дисперсного материала в аппарате.

Для измерения расхода воздуха использованы «интегрирующие» трубки в комплекте с микроманометрами типа ММН-240. Перед началом опытов трубки тарировались на специальном стенде по стандартной диафрагме. Поток воздуха, поступающий в камеру, может предварительно подогреваться в электрокалорифере.

Для измерения температуры воздуха в различных точках камеры использованы термоэлектрические термометры градуировки ХК, изготовленные из проволоки диаметром 0,2 мм. В качестве вторичного прибора к ним служит автоматический потенциометр КСП-4. Температуру частиц в слое измеряли с помощью специальной ловушки, в которую вмонтирована хромель-копелевая термомпара. В качестве вторичного прибора к ней использовался цифровой вольтметр типа В7-21.

Сравнение водоохладителя с центробежным слоем и градирни проводилось по удельной холодопроизводительности и теплогидравлическому показателю.

Холодопроизводительность установок определяется по следующей формуле:

$$Q_x = C_{ж} \cdot G_{ж} \cdot (T_{нж} - T_{кж}), \quad (1)$$

где  $C_{ж}$  – удельная теплоемкость охлаждаемой жидкости, кДж / (кг · К);

$G_{ж}$  – расход охлаждаемой жидкости, кг/с;

$T_{нж}$  – начальная температура жидкости, К;

$T_{кж}$  – конечная температура воды, К

Удельная холодопроизводительность определяется по формуле:

$$q_{vx} = \frac{Q_x}{V_a}, \quad (2)$$

где  $V_a$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>.

Теплогидравлический показатель определяется из соотношения:

$$E = \frac{Q_x}{N_3}, \quad (3)$$

где  $N_3$  – мощность электродвигателя, кВт.

### Результаты эксперимента

На рис. 3 и рис. 4 приведены показатели  $E$  и  $q_{vx}$  охладителя с псевдооживленным слоем и вентиляторной градирни, из сравнения которых видно, что аппарат с центробежным слоем насадки эффективней градирни.

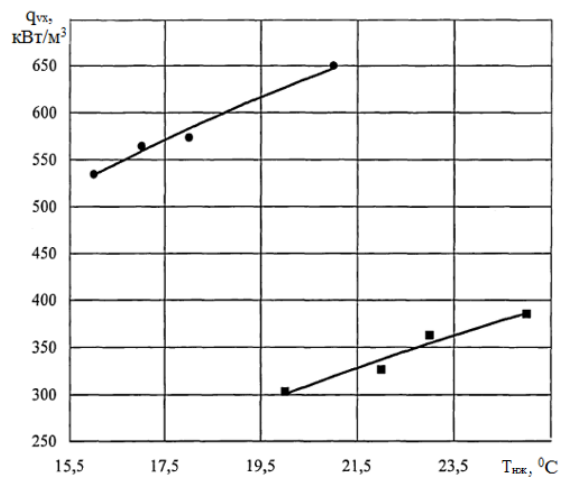


Рис. 3. Зависимость удельной холодопроизводительности от начальной температуры жидкости:

●, ■ - эксперимент; ● - охладитель с псевдооживленным слоем; ■ - вентиляторная градирня

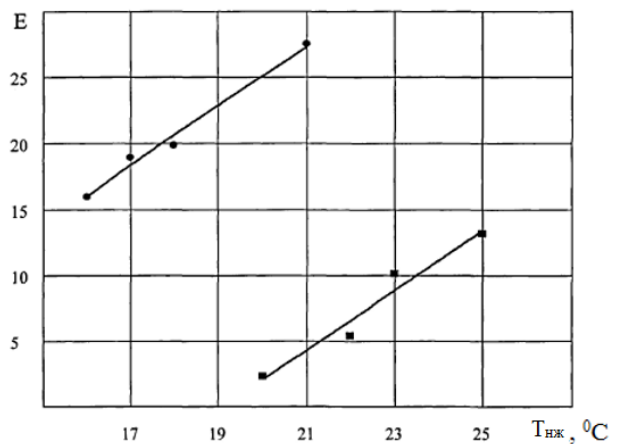


Рис. 4. Зависимость теплогидравлического показателя от начальной температуры жидкости:

●, ■ - эксперимент; ● - охладитель с псевдооживленным слоем; ■ - вентиляторная градирня

### Заключение

Экспериментальное сравнение водоохладителя с центробежным трехфазным псевдооживленным слоем с вентиляционной градирней показало, что по удельной холодопроизводительности исследованный аппарат в два раза эффективнее градирни, а по теплогидравлическому показателю – в 1,5 раза.

### Литература

1. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.
2. Агапов Ю.Н., Медведев Д.И. Экспериментальное исследование теплообмена в центробежном псевдооживленном слое // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. "Энергетика". 2003. Вып. 7.3. С. 153–158.

Поступила 25.12.2017; принята к публикации 16.05.2018

### Информация об авторах

**Агапов Юрий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pt\_vstu@mail.ru  
**Давыдов Денис Андреевич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: davydovdenis48@yandex.ru

## EXPERIMENTAL COMPARISON OF THE WATER COOLER WITH NOZZLE CENTRIFUGAL BED AND COOLING TOWER

**Yu.N. Agapov, D.A. Davydov**

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

**Abstract:** the article presents the results of an experimental comparison of a water cooler with centrifugal fluidized bed and a cooling tower. In particular, the dependences of the specific cooling capacity and thermal-hydraulic index on the initial temperature of the fluid are shown. The experiments were carried out on a test bench designed to study the hydrodynamic and thermal characteristics of a three-phase fluidized bed. In this case, prototype models were used as working elements. The main tasks of the research were: testing the performance of devices, determining their heating capacity (cooling capacity) and the thermo-hydraulic index. An experimental comparison of the water cooler with a centrifugal three-phase fluidized bed and a cooling tower showed that the device is twice as effective as the cooling tower for specific cooling capacity, and 1.5 times for the thermo-hydraulic index. The results of the experiment make it possible to recommend a fluidized bed as a nozzle in cooling towers to ensure the optimal technological mode of cooling of circulating water via the air flow

**Key words:** fluidized bed, interphase heat exchange, nozzle, cooling tower

### References

1. Abramov N.N., "Waters" ("Vodosnabzhenie"), Moscow, Stroyizdat, 1984, 440 p.
2. Agapov Yu.N., Medvedev D.I. "Experimental study of heat transfer in a centrifugal fluidized bed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2003, vol. 7, no.3, pp. 153–158.

Submitted 25.12.2017; revised 16.05.2018

### Information about the authors

**Yuriy N. Agapov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pt\_vstu@mail.ru  
**Denis A. Davydov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: davydovdenis48@yandex.ru

## К СОЗДАНИЮ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОВМЕСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И ВИБРОВОЛНОВЫМИ ПОЛЯМИ

© 2018 Н.В. Мозговой<sup>1</sup>, В.М. Попов<sup>2</sup>, Д.В. Попов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается задача повышения теплофизических характеристик материалов на основе клеевых соединений. При эксплуатации теплонапряженных узлов технических систем, включающих клеевые соединения, требуется повышенная теплопроводность клеевых прослоек. Для решения этой задачи предложен и апробирован экспериментально метод повышения теплопроводности клеевых прослоек соединений, в основу которого заложен эффект от совместного воздействия электрическими и виброволновыми полями на клеевые прослойки, сформированные на основе эпоксидного клея с металлическим наполнителем. При воздействии магнитными или электрическими полями на клеевые прослойки повышение их теплопроводности объясняется образованием теплопроводящих цепочечных структур из металлических частиц наполнителя. Однако по результатам рентгеноструктурного анализа в этом случае плотность упаковки частиц наполнителя несовершенна. Этим обстоятельством продиктована необходимость исследования комплексного воздействия разнородными физическими полями на теплопроводность прослоек клеевых соединений. В результате показано, что на теплопроводность клеевой композиции оказывает влияние природа наполнителя и его концентрация, напряженность электрического поля и частота механических колебаний. Причем наибольший эффект наблюдается при варьировании напряженности электрического поля

**Ключевые слова:** коэффициент теплопроводности, клеевая композиция, напряженность электрического поля, частота виброколебаний

### Введение

Интенсивное развитие науки о полимерах привело к созданию широкого набора полимерных клеев, используемых в различных областях техники [1, 2]. Появилась уникальная возможность замены традиционных способов соединений конструкций по многим показателям более предпочтительными клеевыми соединениями. Последние находят широкое применение в авиационной, космической, электротехнической, строительной, автомобильной и других отраслях современного производства.

К соединениям на клеях в процессе эксплуатации помимо надежной прочности предъявляется и ряд других требований. Так, в процессе эксплуатации теплонапряженных технических систем с составными элементами, скрепленными клеевыми соединениями, требуется хорошая теплопроводность через клеевые прослойки. Однако за счет низкой теплопроводности клея на пути тепловых потоков возникают термосопротивления, приводящие к перегреву отдельных элементов конструкций и в целом систем [3].

Для снижения термосопротивлений в зоне клеевых соединений применяются клеи,

наполненные металлическими порошками. Однако насыщение клеев дисперсными металлическими наполнителями даже при высокой концентрации не позволяет повысить коэффициент теплопроводности клея выше 0,6...0,7 Вт/мК.

При этом введение металлического наполнителя в клей заметно снижает такой существенный для клеевых соединений показатель, как их прочность [4]. Таким образом, для создания соединений на клеях с клеевыми прослойками повышенной теплопроводности требуется разработка принципиально новой технологии.

Если исходить из классических представлений теории физико-химии полимеров [5], то можно утверждать, что определяющее влияние на формирование структуры в дисперснонаполненных системах оказывает процесс взаимодействия полимера с наполнителем. Очевидно, что наибольшую проводимость клеевой прослойки на основе наполненного клея можно достичь, если энергия взаимодействия частиц наполнителя между собой будет больше энергии взаимодействия кинетических единиц полимерной основы клея друг с другом или энергии взаимодействия кинетических единиц

полимера с частицами наполнителя. Для создания более высокого энергетического взаимодействия между частицами наполнителя можно рекомендовать внешнее воздействие физическими полями.

Ранее были разработаны методы модифицирования, в основу которых положены эффекты от воздействия на клеевую прослойку, наполненную металлическим порошком ферромагнитной природы, постоянным магнитным полем [6], или порошком неферромагнитной природы при воздействии электрическим полем [7]. В процессе обработки клеевых прослоек одиночными физическими полями коэффициент теплопроводности при максимальной напряженности полей:  $H=24 \cdot 10^4$  А/м и  $E=2000$  В/см - возрастал до 0,9...1,0 Вт/м·К. Повышение теплопроводности модифицированных воздействием магнитными или электрическими полями клеевых прослоек объясняется образованием теплопроводящих цепочечных структур, сформированных из частиц наполнителей. Вместе с тем, как показывают данные микроструктурного анализа отвержденных клеевых прослоек, подвергнутых воздействию одиночными физическими полями, плотность упаковки частиц наполнителя в образовавшихся цепочках нельзя считать идеальной [8]. Отсюда можно сделать вывод о возможности дальнейшего повышения теплопроводности клеевых прослоек путем увеличения энергии воздействия физическими полями на наполненную клеевую прослойку.

### Повышение плотности

Повышение плотности упаковки частиц наполнителя предлагается осуществлять путем совместной обработки клеевой прослойки электрическими и виброволновыми полями. Воздействие электрическим полем на прослойку открывает возможность использовать наполнители неферромагнитной природы (алюминиевые, медные, латунные порошки), обладающие более высоким коэффициентом теплопроводности по сравнению с порошками ферромагнитной природы (железные, никелевые порошки). Дополнительное воздействие на клеевую прослойку виброволновым полем должно повысить плотность упаковки частиц наполнителя цепочечных структур клеевой прослойки. Этот вывод подтверждается

положениями работ [9, 10] об эффективности вибровоздействия на наполненные полимерные композиции в состоянии растворов. Исследованиями установлено повышение агрегативной устойчивости дисперсных систем, что в условиях клеевых прослоек приведет к формированию более плотноупакованных цепочечных структур повышенной теплопроводности.

### Экспериментальная апробация

Экспериментальная апробация рассматриваемого метода осуществлялась на высоковольтной установке, позволяющей создавать в рабочей ячейке с образцом электрическое поле напряженностью до 2000 В/см. Вибровоздействие на образец с клеевой прослойкой осуществлялось с помощью виброгрохота ПЭ-6800, создающего частоту колебаний рабочего стола от 15 до 70 Гц с амплитудой колебаний от 0,25 до 1,5 мм. В качестве исследуемых образцов использовались металлические пластины из стали марки Сталь 30 в форме дисков диаметром 30 мм и толщиной 1 мм. Между дисками помещался клей на основе эпоксидной смолы ЭДП с отвердителем ПЭПА (полиэтиленполиамин) и наполнителем в виде алюминиевого порошка дисперсностью  $d=15...21$  мкм или латунного порошка с  $d=19...24$  мкм. Концентрация наполнителя выдерживалась в пределах 20% и 30% от объема полимера. Толщина клеевой прослойки поддерживалась с помощью специальных ограничителей на уровне 1 мм.

Образец с неотвержденной клеевой прослойкой помещался в рабочую ячейку установки, расположенную между электродами, и смонтированную на вибростенде. После включения вибростенда и высоковольтной установки производилась обработка образца в комбинированном поле со значениями напряженности электрического поля от 0 до 2150 В/см и частотой виброколебаний вибростенда 16 и 20 Гц. Время обработки на вибростенде составляло 10 минут и в электрическом поле 20 минут.

Таблица 1

Зависимость коэффициента теплопроводности клеевой прослойки на основе клея ЭДП+ПЭПА и алюминиевого порошка от напряженности электрического поля и частоты виброколебаний при различной концентрации наполнителя

Коэффициент теплопроводности Вт/м·К при напряженности электрического поля E, В/см	Концентрация наполнителя, С, %		Частота виброколебаний, Гц	
	20	30		
	16	20	16	20
0	0,34	0,37	0,43	0,44
360	0,46	0,51	0,56	0,64
760	0,54	0,60	0,64	0,73
1100	0,68	0,76	0,82	0,89
1520	0,77	0,83	0,97	0,83
1800	0,85	0,97	0,95	1,21
2150	0,72	0,83	0,79	0,97

Таблица 2

Зависимость коэффициента теплопроводности клеевой прослойки на основе клея ЭДП+ПЭПА и латунного порошка от напряженности электрического поля и частоты виброколебаний при различной концентрации наполнителя

Коэффициент теплопроводности Вт/м·К при напряженности электрического поля E, В/см	Концентрация наполнителя, С, %		Частота виброколебаний, Гц	
	20	30		
	16	20	16	20
0	0,31	0,35	0,38	0,41
360	0,41	0,46	0,48	0,56
760	0,50	0,57	0,60	0,64
1100	0,61	0,66	0,72	0,79
1520	0,69	0,75	0,80	0,86
1800	0,77	0,84	0,83	0,94
2150	0,71	0,78	0,77	0,79

Обработанные образцы помещались затем в термошкаф, где при температуре в 40 градусов выдерживались в течение суток. Полученные таким образом образцы исследовались на теплопроводность по методу двух температурновременных интервалов [11]. Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1 и 2.

## Заключение

Показано, что на теплопроводность клеевой прослойки оказывает влияние природа наполнителя, напряженность электрического поля и частота механических колебаний. Из опытов видно, что теплопроводность клеевых прослоек, сформированных на основе композиции с наполнителями в виде алюминиевого или латунного порошков с повышением напряженности электрического поля и частоты механических колебаний, возрастает. При этом за счет более высокой теплопроводности алюминиевого порошка, по сравнению с латунным, теплопроводность клеевой прослойки с алюминиевым порошком выше.

Наблюдаемое снижение теплопроводности клеевой прослойки при напряженности электрического поля E=2150 В/см можно объяснить электрическим пробоем, приводящим к разрушению образовавшихся мостиковых структур из частиц наполнителя.

Следует отметить, что предлагаемый метод модифицирования клея не представляется сложным в реализации и может найти широкое применение в различных отраслях техники.

## Литература

- Кардашов Д.А., Петрова А.П. Полимерные клеи. М.: Химия, 1983. 256 с.
- Вильков Ж.Ж. Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
- Попов В.М. Теплообмен через соединения на клеях. М.: Энергия, 1974. 387 с.
- Айбиндер С.Б., Андреева Н.Г. Влияние наполнителей на теплофизические, механические и антифрикционные свойства полимеров // Изв. АН Лат ССР. Сер. Физ. и техн. наук. 1983. № 5. С. 3-18.
- Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполненных полимеров. М.: Химия, 1991. 259 с.
- Новиков А.П., Попов В.М. К вопросу о теплопроводности полимеров, подвергнутых воздействию постоянным магнитным полем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 2. С. 48-49.
- Попов В.М., Остроушко М.Н. Теплопроводность полимерных композиционных материалов, обработанных в постоянном электрическом поле // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 3. С. 47-49.
- Попов В.М., Дорняк О.Р. Соединения на клеях, модифицированных воздействием физических полей. Воронеж: ВГЛУ, 2016. 128 с.
- Ганиев Р.Ф., Берлин А.А., Фомин В.Н. О влиянии волновых эффектов на полимерные материалы // ДАН. 2002. Т. 385. № 4. С. 517-520.



10. Некоторые особенности формирования свойств полимерных композиционных материалов при волновом воздействии / Р.Ф. Ганиев, А.А. Берлин, Е.Б. Малюкова, В.Н. Фомин // ДАН. 2003. Т. 391. № 6. С. 791-793.

11. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов Л.: Энергия, 1971. 145 с.

12. Моделирование процесса физического модифицирования клеев, применяемых в

деревообработке / В.М. Попов, М.А. Шендриков, Н.В. Мозговой, Э.А. Черников // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. С. 62.

13. Влияние магнитоультразвукового поля на качество клеевых соединений из древесины / В.М. Попов, А.В. Латынин, Н.В. Мозговой, Р.В. Юдин // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 20.

Поступила 02.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

#### Информация об авторах

**Мозговой Николай Васильевич** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. (473) 243-76-70, e-mail: nv\_moz@mail.ru

**Попов Виктор Михайлович** - д-р техн. наук, профессор кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова (394613, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8), тел. (473) 253-92-85

**Попов Дмитрий Викторович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова (394613, Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8), e-mail: popov\_dimka@mail.ru

### OBTAINING HIGH THERMAL CONDUCTIVITY ADHESIVE JOINTS BY COMBINED EFFECT OF THE ELECTRIC AND VIBRATION FIELDS

N.V. Mozgovoy<sup>1</sup>, V.M. Popov<sup>2</sup>, D.V. Popov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

**Abstract:** the problem of increasing the thermophysical characteristics of materials based on adhesive compounds is considered. When operating heat-stressed units of technical systems, including glued joints, an increased thermal conductivity of the adhesive layers is required. To solve this problem, a method for increasing the thermal conductivity of glued interlayers of compounds based on the effect of combined action of electric and vibro-wave fields on adhesive layers formed on the basis of epoxy glue with a metal filler is proposed and tested experimentally. When magnetic or electric fields are applied to glued interlayers, the increase in their thermal conductivity is explained by the formation of heat-conducting chain structures from metal filler particles. However, according to the results of X-ray diffraction analysis, in this case the packing density of the filler particles is imperfect. This circumstance shows the need to investigate the complex effect of heterogeneous physical fields on the thermal conductivity of interlayers of adhesive joints. As a result, it was shown that the thermal conductivity of the adhesive composition is influenced by the nature of the filler and its concentration, the electric field strength and the frequency of mechanical vibrations. Moreover, the greatest effect is observed when the electric field intensity is varied

**Key words:** adhesive joint, coefficient of thermal conductivity, electric field strength, vibration frequency

#### References

1. Kardashov D.A., Petrov A.P. "Polymer adhesives" ("Polimernyye klei"), M, Khimiya, 1983, 256 p.
2. Vil'kov Zh.Zh. "Glue joints" ("Kleevye soyedineniya"), Moscow Tekhnosfera, 2007, 384 p.
3. Popov V.M. "Heat transfer through joints on the adhesives" ("Teploobmen cherez soedineniya na kleyakh"), Moscow, Energiya, 1974, 387 p.
4. Aibinder S.B., Andreeva N.G. "Effect of fillers on thermal, mechanical and antifriiction properties of polymers", *News of the Latvian SSR Academy of Sciences (Izv. AN Lat SSR. Ser. Fiz. i tekhn. nauk)*, 1983, no. 5, pp. 3-18.
5. Lipatov Yu.S. "Physico-chemical bases of filled polymers" ("Fiziko-khimicheskie osnovy napolnennykh polimerov"), Moscow, Khimiya, 1991, 259 p.
6. Novikov A.P., Popov V.M. "On the issue of thermal conductivity of polymers exposed to a constant magnetic field", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 48-49.
7. Popov V.M., Ostroushko M.N. "Thermal conductivity of polymer composite materials processed in a constant electric field", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2005, vol. 1, no.3, pp. 47-49
8. Popov V.M., Dorniyak O.R. "Connections on the glues modified by influence of physical fields" ("Soedineniya na kleyakh, modifitsirovannykh vozdeystviem fizicheskikh poley"), Voronezh, VSAFT, 2016, 128 p.

9. Ganiev R.F., Berlin A.A., Fomin V.N. "On the influence of wave effects on polymeric materials", *Proc. of the Russian Academy of Sciences (DAN)*, 2002, vol. 385, no. 4, pp. 517-520.
10. Ganiev R.F., Berlin A.A., Malyukova E.B., Fomin V.N. "Some peculiarities of the properties of polymer composite materials under wave action", *Proc. of the Russian Academy of Sciences (DAN)*, 2003, vol. 391, no. 6, pp. 791-793.
11. Volkenstein V.S. "High-speed method for determining thermal characteristics of materials" ("Skorostnoy metod opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov"), Leningrad, Energiya, 1971, 145 p.
12. Popov V.M., Shendrikov M.A., Mozgovoy N.V., Chernikov E.A. "Process modeling of adhesives physical modification used in wood processing", *Modern problems of science and education (Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya)*, 2014, no. 2, pp. 62.
13. Popov V.M., Latynin A.V., Mozgovoy N.V., Yudin R.V. "Influence of magnetoultrasonic fields on the quality of adhesive joint of wood", *Modern problems of science and education (Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya)*, 2013, no. 5, pp. 20.

Submitted 02.04.2018; revised 16.05.2018

#### Information about the authors

**Nikolay V. Mozgovoy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nv\_moz@mail.ru

**Viktor M. Popov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Academy of Forestry and Technologies (8 Timiryazev str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: etgvglta@mail.ru

**Dmitriy V. Popov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Academy of Forestry and Technologies (8 Timiryazev str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: etgvglta@mail.ru

## РАСЧЕТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТА ПО ОХЛАЖДАЮЩИМ КАНАЛАМ КАМЕРЫ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS CFX

© 2018 А.В. Кретинин<sup>1</sup>, Д.Н. Галдин<sup>1</sup>, Е.Е. Спицына<sup>2</sup>, А.Н. Попков<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>АО "Турбонасос", г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского  
Союза А.К. Серова, г. Борисоглебск, Россия

**Аннотация:** рассмотрена проточная часть регенеративной системы охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Выполнена оценка величины неравномерности распределения охладителя в каналах охлаждения при возникновении отклонения геометрии от проектной в результате особенностей технологии изготовления паяной двухслойной конструкции рубашки охлаждения. Геометрическая модель проточной части охлаждающего тракта камеры сгорания состояла из 101 канала системы наружного охлаждения в совокупности с коллекторами подвода и сбора охладителя. Итоговая сеточная модель содержала 8 млн элементов. Для моделирования был использован программный комплекс ANSYS Workbench. В качестве модели турбулентности использовалась стандартная k-ε модель. Моделирование выполнялось в стационарной постановке. Основными результатами расчетов являлись значения расходов через отдельные каналы тракта охлаждения. При моделировании изменялся угол наклона относительно перпендикулярной оси подводящего и отводящего штуцера. Установлено, что влияние подводящего штуцера сказывается приблизительно на 10 % всех каналов системы, обуславливая пониженные значения расходов через остальные 90% каналов, дополнительно неперпендикулярное исполнение штуцеров подвода и отвода охладителя приводят к изменению расходов через каналы максимум на 4-5 %

**Ключевые слова:** жидкостный ракетный двигатель, каналы охлаждения, гидродинамическое моделирование

### Введение

Проточная часть регенеративной системы охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя образована множеством однотипных каналов с коллекторным подводом и отводом охлаждающего компонента топлива. Данное конструктивное оформление исследуемой системы заранее предполагает наличие неравномерности распределения давления и расхода по длине коллекторов и по отдельным каналам тракта охлаждения. Величина данной неравномерности может составлять величину более 10 % и это приводит к снижению надежности наружного охлаждения стенки камеры. На величине неравномерности распределения охладителя могут сказаться и особенности технологии изготовления паяной двухслойной конструкции рубашки охлаждения, что неизбежно сказывается на различных коэффициентах гидравлического сопротивления отдельных каналов, не говоря уже о возможности возникновения "запаев" каналов, что приводит к резкому снижению расхода через такие каналы.

Всестороннее влияние всей совокупности факторов на величины расходов охладителя в отдельных каналах в настоящее время не может быть исследовано с достаточной надежностью

[1-3]. Поэтому, принимая "неизбежность" данной проблемы, т.е. то, что она присутствует практически во всех ЖРД, и соглашаясь таким образом на стохастическую природу исследуемой проблемы, важно выявить эпистемические неопределенности, формирующие значительную часть величины неравномерности, которые мы можем выявить и убрать их из общей совокупности неопределенностей и таким образом снизить величину негативной расходной неравномерности. С этой целью осуществлялось численное моделирование гидродинамики регенеративной системы охлаждения с использованием инструментария ANSYS Workbench.

### Математическая модель

Для анализа поставленной в работе задачи использовалось численное решение уравнений Навье-Стокса. Уравнения сохранения могут быть записаны в обобщенной форме. При их осреднении по времени с использованием модели разложения по Рейнольдсу, можно записать их следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \times u) = -\nabla p + \nabla \tau + S_M, \quad (1)$$

где  $S_M$  – возможные источники импульса, а  $\tau$  представляет собой тензор напряжений, связанный со скоростью сдвига выражением:

$$\tau = \left( \nabla u + \nabla u^T - \frac{2}{3} \sigma \nabla \cdot u \right). \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии, учитывающее изменение плотности ввиду температурных изменений в расчётной области может быть записано в обобщённом виде следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho H_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \cdot u \cdot H_{tot}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + u \cdot S_M + S_E, \quad (3)$$

в котором  $S_E$  представляет возможные источники энергии и  $H_{tot}$  - полная энтальпия, связанная со статической энтальпией  $H(T, p)$  как:

$$H_{tot} = H + \frac{1}{2} U^2. \quad (4)$$

Слагаемое  $\nabla \cdot (u \cdot \tau)$  представляет собой работу, вызванную вязкостным напряжением, также ещё называемую вязкостной работой. Член  $u \cdot S_M$  отражает работу внешних источников импульса и в данном моделировании опускается.

### Моделирование турбулентности

С использованием численных методов выполняется решение уравнений (1), (2) и (3), сложность которых значительно увеличивается из-за Рейнольдсовых напряжений в правой части уравнения (2). В данной работе было принято решение использовать стандартную  $k$ - $\varepsilon$  модель [4], которая часто используется в инженерных задачах, ввиду своей эксплуатационной надежности и умеренных вычислительных затратах. В данной модели Рейнольдсовы напряжения получаются следующим образом:

$$-\overline{p'u'u'} = -\frac{2}{3} \rho k \delta - \frac{2}{3} \mu_T \nabla \cdot u \delta + \mu_T (\nabla u + (\nabla u)^T). \quad (5)$$

Здесь  $\mu_T$  турбулентная вязкость,  $\delta$  - идентификационный тензор, а верхний индекс  $T$  - операция переноса.

Турбулентная кинетическая энергия ( $k$ ) и скорость диссипации турбулентной кинетической энергии ( $\varepsilon$ ) получаются из следующих уравнений:

$$\frac{\partial p k}{\partial t} + \nabla \cdot (p u k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \lambda - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\frac{\partial p \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (p u \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \lambda - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  - слагаемое, воспроизводящее эффект сдвига,

$$\lambda = \mu_{eff} \nabla u \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot u (\mu_{eff} \nabla \cdot u + \rho k), \quad (8)$$

а вязкость рассчитывается из уравнения:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_T, \quad (9)$$

$C_1$  (1,44),  $C_2$  (1,92),  $C_\mu$  (0,09),  $\sigma_k$  (1,00) и  $\sigma_\varepsilon$  (определяемое по уравнению (10)) являются константами при моделировании.

$$\sigma_\varepsilon = \frac{k^2}{(C_2 - C_1) \sqrt{C_\mu}}. \quad (10)$$

### Численные методы

Решение описанных выше уравнений выполнялось численным методом с использованием программного комплекса вычислительной гидродинамики ANSYS CFX (15.0), в котором применяется метод конечных объёмов для дискретизаций уравнений переноса. Использовалась схема интерполяции высокого порядка при всех численных экспериментах. Численное моделирование выполнялось с такой точностью, при которой среднеквадратичные невязки для Евклидовой нормы источника массы и сопряжения скорости и давления имели значения менее  $1 \times 10^{-5}$ . Моделирование выполнялось в стационарной постановке с использованием псевдо шага по времени равным  $1 \times 10^{-4}$  секунды.

### Сеточная модель и граничные условия

Рассматриваемая модель геометрии каналов охлаждения представляет собой сочетание из 101 канала, имеющих длину 200 мм и площадь  $4,25 \text{ мм}^2$ , сообщающихся посредством трёх отверстий диаметром 1,75 мм с кольцевыми коллекторами на входе и на выходе. Штуцеры на входе и на выходе из

проточной части имели различные параметры угла наклона относительно перпендикуляра к оси симметрии каналов охлаждения. Геометрическая модель проточной части охлаждающего тракта камеры сгорания, состоящая из 101 канала в совокупности с коллекторами подвода и сбора охладителя, построенная в модуле ANSYS Design Modeler представлена на рис. 1.

Для генерации сеточной модели использовался модуль ANSYS Meshing. Сеточная модель была не структурированной и содержала десять призматических пристеночных слоёв у каждой поверхности геометрии, кроме входной и выходной области. Итоговая модель содержала 8 млн. элементов. Общий вид сеточной модели представлен на рис. 2, а детальный вид соединения каналов с кольцевыми сборниками представлен на рис. 3.

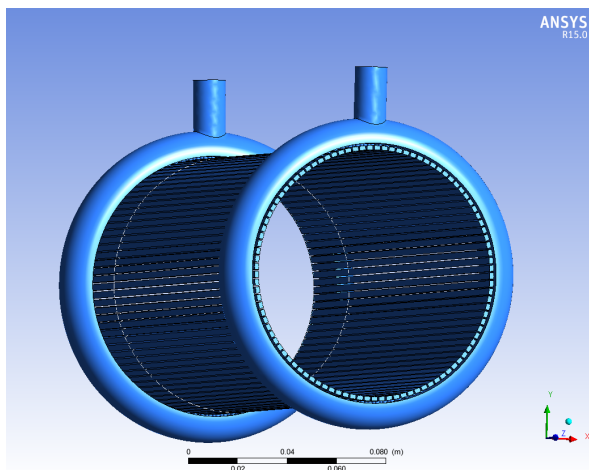


Рис. 1. Геометрическая модель проточной части охлаждающего тракта камеры сгорания

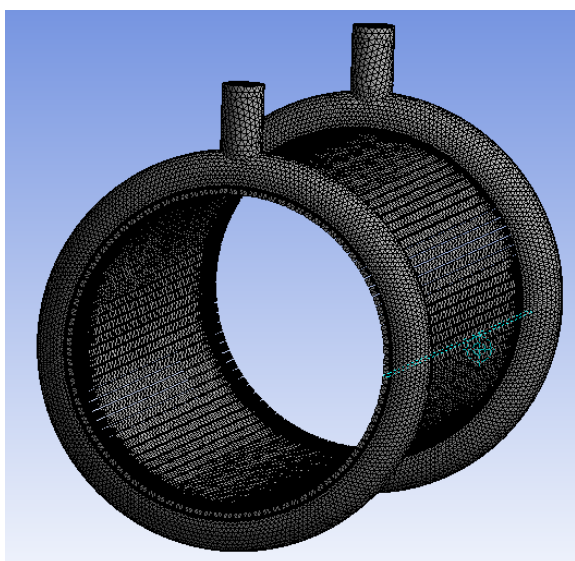


Рис. 2. Сеточная модель проточной части

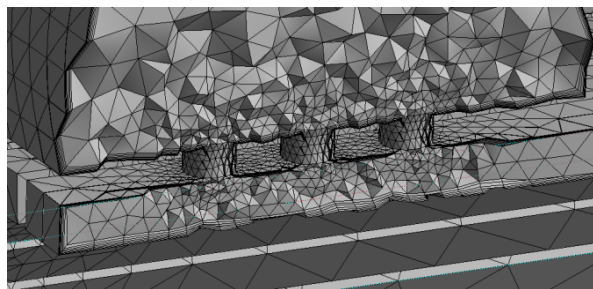


Рис. 3. Детальный вид сеточной модели

При построении расчетного блока осуществляется синтез математической модели исходя из возможностей модуля ANSYS CFX, т.е. выбирается модель турбулентности, подключается уравнение энергии для моделирования гидродинамики с теплообменом, осуществляется соответствующая постановка граничных условий, устанавливаются параметры сходимости: максимальное количество итераций и RMS ошибка в критерии сходимости [5]. Основными результатами расчета являются значения расходов через отдельные каналы тракта охлаждения.

На рис. 4 приведены линии тока движущейся жидкости в проточной части исследуемой системы регенеративного охлаждения цилиндрической камеры сгорания.

На рис. 5 представлены некоторые результаты расчета распределения компонента по каналам охлаждающего тракта, проведенного при изменении ряда граничных условий. Вариант "Противоток" означает, что подводящие штуцеры подвода и отвода компонента расположены диаметрально с противоположных сторон камеры. Вариант "Выход+1" также рассчитан для случая противотока, но со смещением выходного штуцера на один градус от перпендикулярного исполнения. Вариант "Смещение входа 2 гр" рассчитан для случая противотока со смещением входного штуцера на 2 градуса от перпендикулярного исполнения. Вариант "Прямоток" означает, что подводящие штуцеры подвода и отвода компонента расположены с одной стороны камеры. Вариант "Вход 2гр с одной стороны" рассчитан для случая прямотока со смещением входного штуцера на 2 градуса от перпендикулярного расположения. И, наконец, вариант "С теплообменом" рассчитан для сопряженной задачи моделирования гидродинамики с наличием подвода тепла в охладитель.



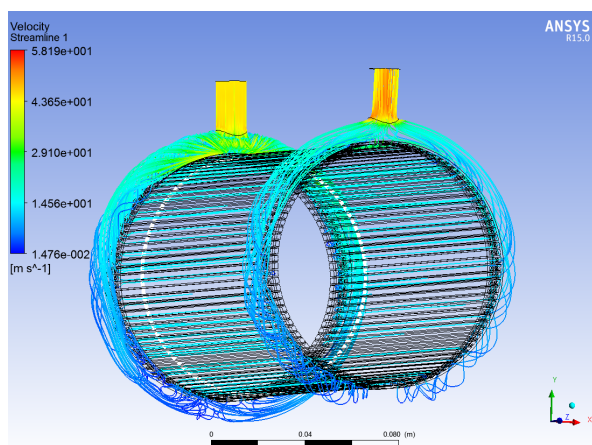


Рис. 4. Линии тока в проточной части охлаждающего тракта камеры сгорания

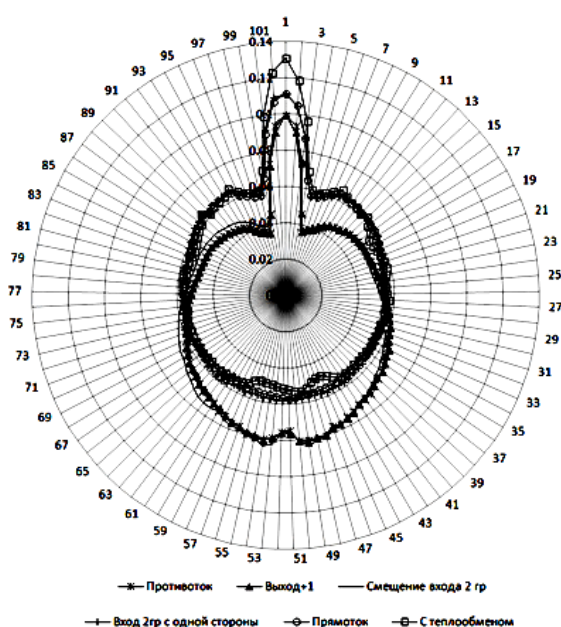


Рис. 5. Результаты распределения охладителя по отдельным каналам охлаждающего тракта камеры сгорания при различных вариантах конструктивного исполнения

## Выводы

Анализируя проведенные расчеты, можно отметить следующие результаты:

- в охлаждающих каналах напротив подводящего штуцера наблюдаются повышенные расходы, причем величина расхода в канале номер 1 может превышать средние значения расходов более чем в 2 раза. Влияние подводящего штуцера сказывается приблизительно на 10 % всех каналов системы, обуславливая пониженные значения расходов через остальные 90% каналов;
- для охлаждения "хуже" пониженные значения расходов через каналы. Поэтому, судя по рисункам, схема "прямоток" предпочтительнее схемы "противоток";
- неперпендикулярное исполнение штуцеров подвода и отвода охладителя приводят к изменению расходов через каналы максимум на 4-5 %;
- наличие теплового потока в охладитель еще более увеличивает величину расходной неравномерности.

## Литература

1. Dibike Y.B. Developing generic hydrodynamic models using artificial neural networks // J. of Hydraulic Research. 2002. Vol. 40. No. 2. P. 183-190.
2. Стохастический расчет распределения расхода по каналам тракта охлаждения камеры жидкостного ракетного двигателя / А.В. Кретинин, Ю.А. Булыгин, В.Ю. Климов, П.А. Дронов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2009. № 4. С. 42-44.
3. Кретинин А.В., Булыгин Ю.А., Ткаченко Ю.С. Недетерминированное моделирование теплофизических процессов в камере жидкостного ракетного двигателя // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 1. С. 88-92.
4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2-х тт. М.: Мир, 1991.
5. Neural Networks Tools for Improving Tacite Hydrodynamic Simulation of Multiphase Flow Behavior in Pipelines / I. Rey-Fabret, R. Sankar, E. Duret, E. Heintze and V. Henriot // Oil & Gas Science and Technology. 2002. Vol. 56. No. 5. P. 471-478.

Поступила 02.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

## Информация об авторах

**Кретинин Александр Валентинович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: avk-vrn@mail.ru

**Галдин Дмитрий Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dmgaldin@yandex.ru

**Спицына Екатерина Евгеньевна** – специалист, АО "Турбонасос" (394052, Россия, г. Воронеж, ул. Острогжская, 107), e-mail: kylikovna@mail.ru

**Попков Александр Николаевич** – врио начальника курса, 3 авиационный факультет (факультет бомбардировочной и штурмовой авиации), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова (397171, Россия, г. Борисоглебск, ул. Чкалова, д. 18А), e-mail: popkov.grop@yandex.ru

**CALCULATION OF NONUNIFORMITY OF THE DISTRIBUTION OF THE COMPONENT  
ALONG THE COOLING CHANNELS OF A LIQUID ROCKET ENGINE CHAMBER BASED ON  
MODELING IN ANSYS CFX**

**A.V. Kretinin<sup>1</sup>, D.N. Galdin<sup>1</sup>, E.E. Spitsyina<sup>2</sup>, A.N. Popkov<sup>3</sup>**

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

**<sup>2</sup>JSC "Turbonasos", Voronezh, Russia**

**<sup>3</sup>Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots, Borisoglebsk, Russia**

**Abstract:** the article deals with the flowing part of the regenerative cooling system of the liquid rocket engine chamber. The estimation of the uneven distribution of the coolant in the cooling channels was made at deviation of the geometry from the design one as a result of the features of the manufacturing technology of the brazed two-layer construction of the cooling jacket. The geometric model of the flow section of the cooling path of the combustion chamber consisted of 101 channels of the external cooling system in combination with the collectors of the coolant supply and collection. The resulting grid model contained 8 million elements. ANSYS Workbench was used for modeling. As a model of turbulence, we used the standard k-ε model. The simulation was performed in a stationary setting. The main results of calculations were the values of flow through separate channels of the cooling path. During the modeling, the angle of inclination relative to the perpendicular axis of the inlet and outlet nozzle was changed. It was established that the effect of the supply fitting affects about 10% of all channels of the system, causing lower flow rates through the remaining 90% of the channels, additionally non-perpendicular execution of the coolant inlet and outlet chutes lead to a change in the flow through the channels by a maximum of 4-5%

**Key words:** liquid rocket engine, cooling channels, hydrodynamic modeling

**References**

1. Dibike Y.B. "Developing generic hydrodynamic models using artificial neural networks", *J. of Hydraulic Research*, 2002, vol. 40, no. 2, p. 183-190.
2. Kretinin A.V., Bulygin Yu.A., Klimov V.Yu., Dronov P.A. "Stochastic calculation of the distribution of flow through the channels of the coolant chamber of the liquid rocket engine", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Aviation and Rocket-Space Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika)*, 2009, no. 4, pp. 42-44
3. Kretinin A.V., Bulygin Yu.A., Tkachenko Yu.S. "Nondeterministic modeling of thermophysical processes in the liquid rocket engine chamber", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 88-92.
4. Fletcher K. "Computational methods in the dynamics of liquids", Moscow, Peace, 1991.
5. Rey-Fabret I., Sankar R., Duret E., Heintze E. and Henriot V. "Neural Networks Tools for Improving Tacite Hydrodynamic Simulation of Multiphase Flow Behavior in Pipelines", *Oil & Gas Science and Technology*, 2002, vol. 56, no. 5, pp. 471-478.

Submitted 02.04.2018; revised 16.05.2018

**Information about the authors**

**Aleksandr V. Kretinin**, Dr. Si. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: avk-vrn@mail.ru

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

**Ekaterina E. Spitsyna**, Specialist of JSC "Turbonasos" (107 Ostrogozhskaya st., Voronezh 394052, Russia), e-mail: kylikovna@mail.ru

**Aleksandr N. Popkov**, Acting Head of the Course of Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (18A Chkalova st., Borisoglebsk 397171, Russia), e-mail: popkov.grop@yandex.ru

## ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

© 2018 В.Н. Крысанов, К.В. Иванов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается один из вариантов повышения уровня энергосбережения насосных и компрессорных установок за счет использования устройств компенсации реактивной мощности (КРМ). Рассматривается метод оценки энергоэффективности мероприятий по компенсации реактивной мощности на основе критерия минимума усредненных затрат. Приводятся формулы для расчета экономического эффекта, обусловленного оптимизацией режимов энергосистемы, а также формула исходных затрат и целевой функции. Описывается практическая реализация автоматизированного расчета затрат в зависимости от режима энергосистемы и конфигурации КРМ. Приводятся результаты расчетов оптимальных режимов работы узлов нагрузки при различных соотношениях видов потребителей, согласно графикам нагрузки, с применением КРМ в виде трехмерных графических зависимостей затрат от напряжения в сети и типа тиристорной конденсаторной установки. Делаются выводы о возможности эффективного применения устройств КРМ для турбомеханизмов, а также о возможности получить информативную картину оптимальных режимов работы узлов нагрузки с помощью разработанного алгоритма

**Ключевые слова:** энергоэффективность, компенсация реактивной мощности, оптимизация

### Введение

В сфере промышленной электро-энергетики существует множество потребителей реактивной энергии. К таким потребителям относятся, прежде всего, металлургические заводы, химические предприятия, предприятия электрохимической обработки металлов и драгоценных камней, предприятия, имеющие электродуговую и контактную сварку, обычные предприятия, использующие для освещения газоразрядные лампы, предприятия нефтяной, газовой и угольной отраслей, предприятия, имеющие электродвигатели различного типа.

Одним из потребителей реактивной мощности в составе промышленного предприятия являются насосные и компрессорные установки. В силу особенностей работы данных устройств, количество включений может достигать 100 раз в сутки.

Для максимальной реализации энергосберегающего режима необходимо компенсировать реактивную мощность в течение всего рабочего дня. Соответственно, периодичность коммутаций КРМ желательно реализовать в режиме, соответствующем графику нагрузки. Этого можно достичь путем оптимизации схемы подключения конденсаторных батарей и выбором оптимальных параметров КРМ, зависящих

непосредственно от графика нагрузки технологической установки.

Технико-экономический анализ основных аппаратных решений КРМ с учетом возможной экономии приведен в [1]. Ниже будет рассмотрена упрощенная методика оценки энергоэффективности КРМ.

### Теоретический анализ

Для качественной оценки энергоэффективности систем электро-снабжения промышленных предприятий, использующих КРМ, существует ряд методов, достаточно сложных для практической реализации. Авторами предлагается упрощенный подход решения этой многофакторной задачи, основанный на использовании принципов оптимального регулирования по критерию минимума усредненных затрат с использованием энергоэкономических характеристик [2], которые характеризуют приведенные затраты в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий от оптимизируемых параметров. Возмущающие воздействия (нагрузки, температура окружающей среды и др.) в общем случае являются функцией времени. Поэтому для получения приведенных затрат следует проинтегрировать энергоэкономические характеристики за год.

Задача оптимизации управления режимами систем электроснабжения промышленного предприятия будет состоять в поддержании основных параметров режима (обычно это уровень напряжения и степень компенсации реактивной мощности) во времени такими, чтобы при этом достигался максимальный экономический эффект или минимальные приведенные затраты при обеспечении заданного технологического процесса.

Экономический эффект (Э), обусловленный оптимизацией уровня напряжения и степени компенсации реактивной мощности с учетом энергоэкономических характеристик, определяется по выражению [2]:

$$\Theta = \int_0^T \psi_0(t) dt - \int_0^T \psi_i(t) dt, \quad (1)$$

$$\text{где } \psi_0(t) = \sum_{g=1}^m f_g \left( X_{1t}^H, X_{2t}^H, \dots, X_{nt}^H \right),$$

$$\psi_i(t) = \sum_{g=1}^m f_g \left( X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{nt} \right);$$

$X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{nt}$  – текущие оптимизируемые параметры режима;

$X_{1t}^H, X_{2t}^H, \dots, X_{nt}^H$  – текущие параметры исходного режима;

$T$  – продолжительность времени работы, ч/год;

$m$  – число рассматриваемых энергоэкономических характеристик за год.

Обычно параметры исходного режима известны, а первый член (1) характеризует исходные затраты:

$$\mathcal{Z}_0 = \int_0^T \psi_0(t) dt. \quad (2)$$

Вторая составляющая (1) определяет функцию затрат (целевую функцию), зависящую от параметров режима (от структуры и мощности компенсирующих и регулирующих средств в типовом узле нагрузки с учетом энергоэкономических характеристик отдельных электрических нагрузок):

$$\mathcal{Z}_\Sigma = \int_0^T \psi_i(t) dt. \quad (3)$$

В дальнейшем при использовании этой методики для определения оптимального управления основные параметры сети и типовых нагрузок задаются как постоянные, а параметры средств регулирования напряжения (РПН силовых трансформаторов) и реактивной мощности (КРМ) варьируются.

### Практическая реализация

Для практического применения важно определение двух основных параметров КУ — их реактивной мощности и требуемой дискретности регулирования (а она значительно влияет как на эффективность регулирования, так и на стоимость КУ). Для расчета данных параметров график нагрузки разбивается на ступени. Выбирается зона нечувствительности включения конденсаторной установки. Далее подбирается номинальная реактивная мощность конденсаторной установки и последовательно проводится расчет затрат при увеличении числа ступеней регулирования.

Для автоматизации данного расчета был использован специально разработанный алгоритм в программе «Matlab» [3]. Для осуществления расчетов по данному алгоритму задавались начальные параметры:  $k_{max}$  — число ступеней графика нагрузки,  $i_{max}$  — максимально допустимое число ступеней регулирования конденсаторной батареи при расчете,  $C(i)$  — стоимость конденсаторной установки с числом ступеней регулирования  $i$ ,  $Стр$  — цена 1кВАр/час,  $Q_p(k)$  — реактивная мощность, потребляемая на ступени  $k$  графика нагрузки,  $t(k)$  — продолжительность ступени  $k$  графика нагрузки,  $Q_{ku}(i)$  — дискретность включения ступеней конденсаторной батареи в порядке возрастания.

Результаты вычислений для наглядности и удобства дальнейшего анализа переводятся в графическую форму. Для различных типов нагрузки построены трехмерные графические зависимости суммарных затрат от напряжения, установленного в контрольной точке рассматриваемого узла нагрузки и количества ступеней конденсаторной установки (энергоэкономические характеристики типовых узлов нагрузок). На рис. 1: 80% — асинхронные двигатели, 20% — осветительная нагрузка; на рис. 2: 20% — асинхронные двигатели, 80% — осветительная нагрузка).

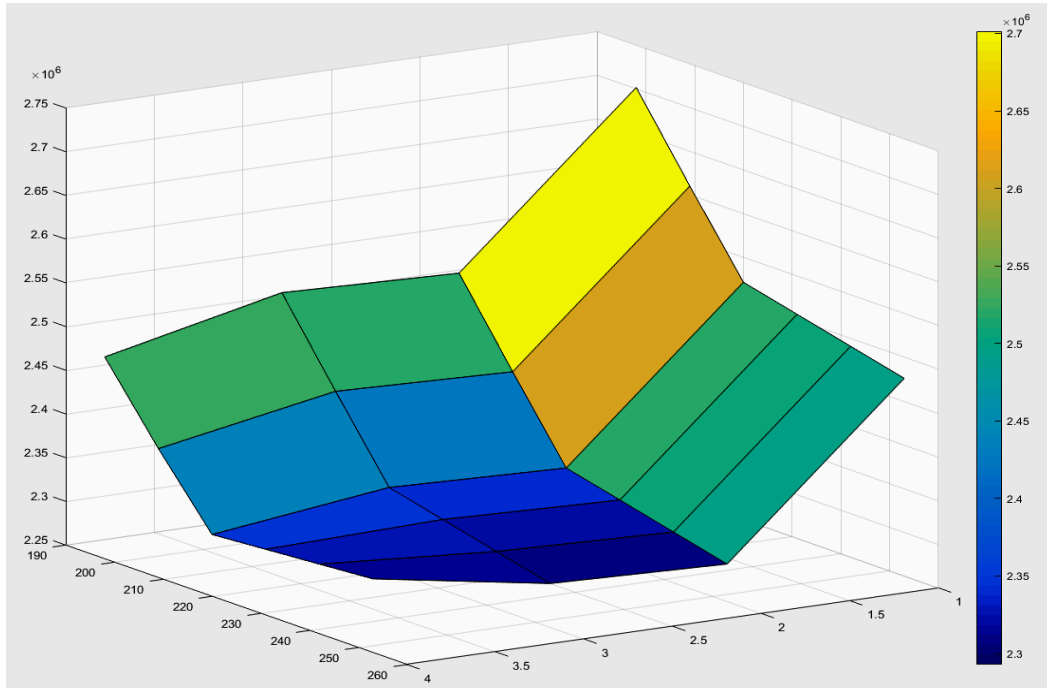


Рис. 1. Энергоэкономическая характеристика узла с нагрузкой: 80% — асинхронные двигатели, 20% — осветительная нагрузка

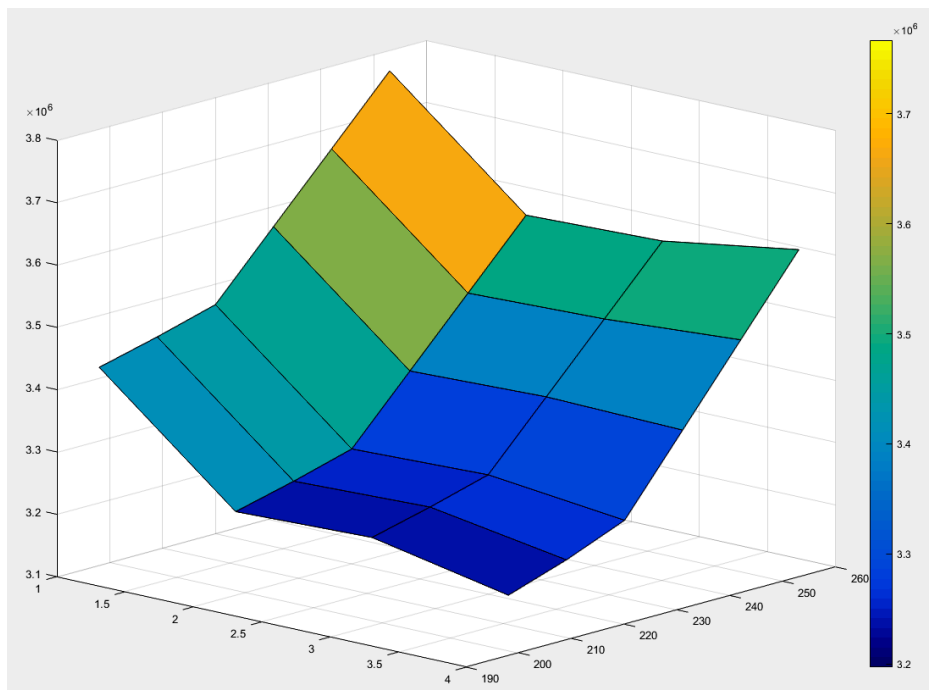


Рис. 2. Энергоэкономическая характеристика узла с нагрузкой: 20% — асинхронные двигатели, 80% — осветительная нагрузка

На трехмерных графических зависимостях рис. 4 и 5 фиксируются: по вертикальной оси суммарные затраты, по другим двум — напряжение (0.9, 0.95, 1, 1.05, 1.1, 1.15 от  $U_n$ ) и число ступеней КУ (от 1 до 4). По таким графикам удобно проводить анализ оптимизации режима работы типовых узлов нагрузки, определяя оптимальные значения

напряжения, установленной реактивной мощности КУ и количества ступеней ее регулирования.

Таким образом, проведя на основании исходных данных серию расчетов по приведенным выше алгоритмам, можно получить весьма информативную картину



анализа по нахождению оптимальных режимов работы типовых узлов нагрузки.

реактивной мощности) для электроприводов насосов и компрессоров.

### Выводы

В соответствии с проведенным анализом, можно сделать вывод о возможности эффективного применения устройств КРМ на основе КБ для широкого спектра турбомеханизмов с асинхронным приводом в составе многих энергоемких промышленных предприятий. При этом целесообразно реализовать специальный алгоритм подключения КБ на основе оптимальной схемы полупроводниковых ключей [4].

Проведя на основании исходных данных (используя нагрузочные характеристики объектов) серию расчетов по приведенным выше алгоритмам, можно получить информативную картину анализа нахождения оптимальных режимов работы типовых узлов нагрузки. Также можно определить оптимальные параметры для проектирования КРМ (количество ступеней и значение

### Литература

1. Крысанов В.Н., Иванов К.В. Возможности использования в автоматизированной системе управления электроснабжением промышленных предприятий тиристорных конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 40-45.
2. Зайцев А.И., Крысанов В.Н. Энергосберегающие технологии в распределенных электроэнергетических сетях. Воронеж: ВГТУ, 2016. 243 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618141, заявка № 2017615096, дата поступления 31.05.2017; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24.07.2017. «Определение оптимальных параметров конденсаторной установки для компенсации реактивной мощности по критерию минимума затрат» / В.Н. Крысанов, К.В. Иванов (Россия).
4. Крысанов В.Н., Демихов А.В. Оптимизация способов подключения конденсаторной батареи // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж: ВИТЦ, 2009. С. 53-58.

Поступила 03.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

### Информация об авторах

**Крысанов Валерий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sovteh2000@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Иванов Константин Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Dharma\_lost@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3181>

## ISSUES OF INCREASING THE LEVEL OF ENERGY SAVING OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVES OF PUMPING EQUIPMENT BASED ON COMPENSATION OF REACTIVE POWER

V.N. Krysanov, K.V. Ivanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers one of the options for increasing the energy saving level of pumping and compressor units by using reactive power compensation devices (RPCD). A method for estimating the energy efficiency of measures for reactive power compensation based on the criterion of minimum averaged costs is considered. Formulas are given for calculating the economic effect due to the optimization of the power system modes, as well as the formula for the initial costs and objective function. The practical implementation of the automated calculation of costs is described depending on the mode of the power system and the configuration of RPCD. The results of the calculation of the optimal operating modes of the load nodes for various customer types are presented, according to the load graphs, with the use of RPCD in the form of three-dimensional graphical dependences of the costs on the voltage in the main and the type of the thyristor capacitor installation. Conclusions are made about the possibility of the effective use of RPC devices for turbomechanisms, as well as the possibility of obtaining an informative picture of the optimal modes of load nodes using the developed algorithm

**Key words:** energy efficiency, reactive power compensation, optimization

References

1. Krysanov V.N., Ivanov K.V. "Possibilities of using thyristor capacitor installations for compensation of reactive power in an automated power supply control system for industrial enterprises", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 40-45.
2. Zaytsev A.I., Krysanov V.N. "Energy-saving technologies in distributed electric power grids" ("Energoberegayushchie tekhnologii v raspredelennykh elektroenergeticheskikh setyakh"), Voronezh, VSTU, 2016, 243 p.
3. Krysanov V.N., Ivanov K.V. "Determination of the optimum parameters of a capacitor plant for compensation of reactive power by the criterion of minimum costs" ("Opredelenie optimal'nykh parametrov kondensatornoy ustanovki dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti po kriteriyu minimuma zatrat"), certificate of state registration of the computer program #2017618141, application # 2017615096, date of submission May 31, 2017; date of state registration in the Register of Computer Programs July 24, 2017.
4. Krysanov V.N., Demikhov A.V. "Optimization of methods of connecting a capacitor bank", *Electrotechnical Complexes and Control Systems (Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya)*, 2009, pp. 53-58.

Submitted 03.04.2018; revised 16.05.2018

Information about the authors

**Valeriy N. Krysanov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: sovteh2000@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Konstantin V. Ivanov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: Dharma\_lost@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3181>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ КЛИМАТИЗАЦИИ В ОФИСНОМ ПОМЕЩЕНИИ

© 2018 Д.В. Лобанов, Р.А. Шепс, Н.В. Портнова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** выполнен анализ эффективности работы систем обеспечения микроклимата в офисном помещении, являющихся основными потребителями тепловой энергии в здании. По классификации ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» исследуемое помещение относится ко 2-й категории (помещения умственного труда), для которого нормативными документами регламентированы параметры внутреннего микроклимата и определено качество воздуха. Для исследуемого помещения были выполнены экспериментальные исследования по определению распределения в помещении и изменения во времени основных параметров микроклимата и концентрации углекислого газа для разных периодов года. Замеры выполнялись каждый рабочий день на протяжении двух календарных лет. Исследовали следующие режимы работы систем микроклимата: первый режим – системы кондиционирования воздуха и механическая вентиляция выключены, система естественной вентиляции работает (настежь открыты окна); второй режим – механическая и естественная системы вентиляции выключены, включена система кондиционирования воздуха; третий режим – естественная вентиляция не работает, работают системы кондиционирования воздуха и механическая вентиляция; четвертый режим – системы кондиционирования воздуха и естественной вентиляции не работают, работает механическая вентиляция; пятый режим – системы вентиляции и кондиционирования воздуха отключены. Установлено, что ни один из рассмотренных режимов не способен обеспечить в помещении одновременно температурный и газовый комфорт. Следствием являются огромные капитальные (оборудование, материалы и др.) и текущие (тепловая и электрическая энергии) траты на системы микроклимата, не обеспечивающие ожидаемого эффекта

**Ключевые слова:** вентиляция офисного помещения, системы обеспечения микроклимата, режимы работы систем вентиляции, персональная вентиляция, анализ работы вентиляционных систем

### Введение

Умственная работоспособность сотрудников организации, их желание трудиться в полную силу зависит, в том числе, от качества воздуха в офисных помещениях. Создавать и обеспечивать комфортный микроклимат призваны системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

В настоящее время сложились «определенные традиции» проектирования систем обеспечения микроклимата помещений: общеобменная приточно-вытяжная система вентиляции с механическим побуждением (схема организации воздухообмена сверху-вверх) совместно с установкой системы кондиционирования воздуха (чиллер-фанкойл, сплит-системы, VRF системы и т.д.). Как показывают многочисленные опросы, подавляющее большинство сотрудников не довольны работой вентиляционных систем: одним кажется жарко, вторым - холодно, третьим – душно и т.д. Причина недовольства состоит в том, что «традиционные» системы не способны обеспечивать тепловой, газовый комфорт в помещении (на рабочих местах) и создавать качественную воздушную среду, удовлетворяющую потребности всех

сотрудников. Дело в том, что человек индивидуален в предпочтениях внутреннего микроклимата: у каждого свое понимание «комфорта».

### Экспериментальные исследования

В данной работе выполнены экспериментальные исследования эффективности работы систем климатизации в офисном помещении, расположенном в г. Воронеже. Характеристика помещения (см. рис. 1): ориентация окон – юг, площадь 73,26 м<sup>2</sup>, высота 2,7 м), оборудовано 10 постоянными рабочими местами (8 – со стационарными ПЭВМ, 2 – с ноутбуками). Помещение оснащено системами приточной приточно-вытяжной механической общеобменной вентиляции (схема организации воздухообмена сверху-вверх) без охлаждения и кондиционирования воздуха (сплит-системы). Системы запроектированы с учетом требований и рекомендаций действующих нормативных документов. Проведем экспериментальные исследования распределения во времени основных параметров микроклимата в помещении умственного труда с применением ПЭВМ. Для их измерения использовался

комбинированный прибор оценки качества воздуха в помещении PCE-GA 70 (см. рис. 2).

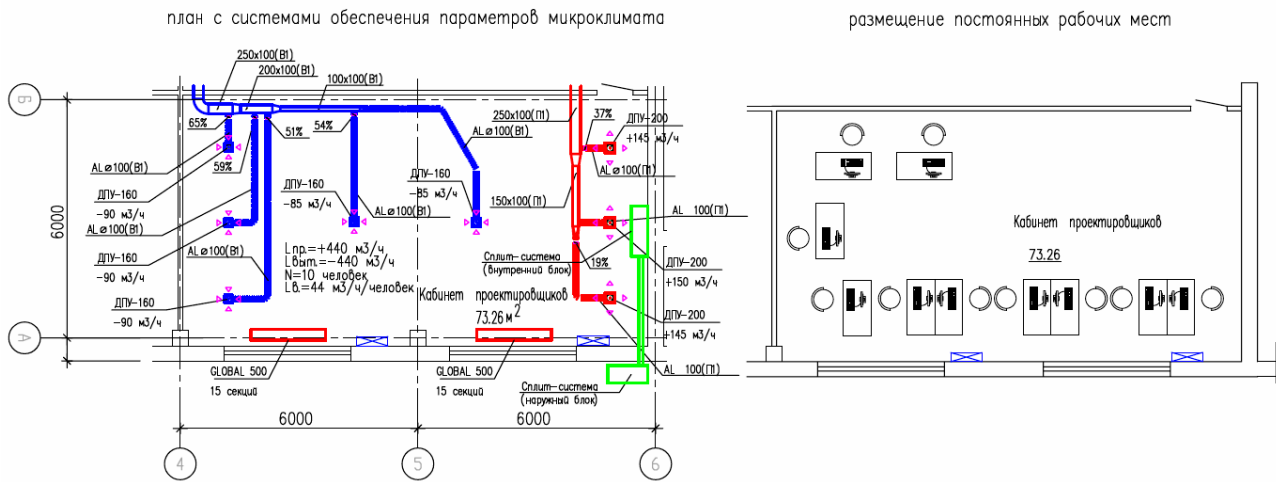


Рис. 1. Схема исследуемого помещения с размещением систем обеспечения микроклимата



Диапазон измерений концентрации CO <sub>2</sub>	0 ... 6000 ppm CO <sub>2</sub> ±3% vom Messwert oder ±50 ppm
Точность	±3% vom Messwert oder ±50 ppm
Разрешение	1ppm
Температура	-20 ... +60 °C
Точность	±0,5 °C
Разрешение	0,1 °C
Влажность воздуха	10 ... 95% отн. влажн.
Точность	±3% отн. влажн.
Разрешение	0,1% отн. влажн.
Ручное сохранение данных	99 значений
Память автоматическая	20000 значений
Условия эксплуатации	5 ... +50 °C / 10 ... 95% отн. влажн.
Питание	6 x 1,5 В батареи типа АА
Размеры	148 x 72x35 мм
Вес	255 гр.

Рис. 2. Внешний вид и технические характеристики комбинированного прибора оценки качества воздуха в помещении PCE-GA 70

Для помещений умственного труда принимают параметры внутреннего микроклимата и качество воздуха, приведенные

в табл. 1, 2, которые соответствуют требованиям действующих нормативных документов [1, 2, 3]:

Таблица 1

Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в обслуживаемой зоне общественных зданий

Период года	Наименование помещения или категория	Температура воздуха, °C		Результирующая температура, °C		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая	оптимальная	допустимая, не более	оптимальная, не более	допустимая, не более
Холодный	2 категория	19-21	18-23	18-20	17-22	45-30	60	0,2	0,3
Теплый	Помещения с постоянным пребыванием людей	23-25	18-28	22-24	19-27	60-30	65	0,3	0,5

Таблица 2

Классификация качества воздуха в помещениях

Класс	Качество воздуха в помещении		Допустимое содержание CO <sub>2</sub> *, ppm
	Оптимальное	Допустимое	
1	Высокое	—	400 и менее
2	Среднее	—	400—600
3	—	Допустимое	600—1000
4	—	Низкое	1000 и более

\* Допустимое содержание CO<sub>2</sub> в помещениях принимают сверх содержания CO<sub>2</sub> в наружном воздухе.

При обосновании выбора требуемого качества воздуха в помещении следует учитывать его влияние на здоровье и

работоспособность людей, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Влияние концентрации углекислого газа в помещении на здоровье и работоспособность человека

Уровень CO <sub>2</sub> (ppm)	Качество воздуха и его влияние на человека
Атмосферный воздух 300- 400 ppm	Идеальный для здоровья человека
400-600 ppm	Нормальное качество воздуха
До 600 ppm	Уровень, рекомендованный для спален, детских садов и школ
600-800 ppm	Появляются единичные жалобы на качество воздуха
800-1000 ppm	Более частые жалобы на качество воздуха
1000 ppm	Максимальный уровень стандартов ASHRAE и OSHA
Выше 1000 ppm	Общий дискомфорт, слабость, головная боль, проблемы с концентрацией внимания. Растет число ошибок в работе. Начинаются негативные изменения в ДНК
Выше 2000 ppm	Может вызвать серьезные отклонения в здоровье людей. Количество ошибок в работе сильно возрастает. 70% сотрудников не могут сосредоточиться на работе
5000 ppm	Максимально допустимая концентрация в течение 8 часового рабочего дня

Для исследуемого помещения были выполнены экспериментальные исследования по определению распределения в помещении и изменения во времени основных параметров микроклимата и концентрации углекислого газа, являющегося индикатором качества воздуха, для разных периодов года. Замеры выполнялись каждый рабочий день (с 9.00 до 18.00 часов), на протяжении двух календарных лет. Исследовали следующие режимы работы систем микроклимата.

Первый режим – механическая система вентиляции выключена, естественная работает (настежь открыты окна), система кондиционирования / охлаждения воздуха (сплит-система) выключена;

Второй режим – механическая и естественная системы вентиляции выключены,

включена система кондиционирования / охлаждения воздуха (сплит-система);

Третий режим – естественная вентиляция не работает, работает механическая вентиляция и сплит-система;

Четвертый режим – естественная вентиляция и сплит-система не работает, работает механическая вентиляция;

Пятый режим – системы вентиляции и охлаждения (сплит-система) отключены.

По результатам измерений выполнены графики распределения во времени температуры внутреннего воздуха, относительной влажности, концентрации углекислого газа для разных периодов года, которые представлены на рис. 3–5 (теплый период года), рис. 6–8 (холодный период года).



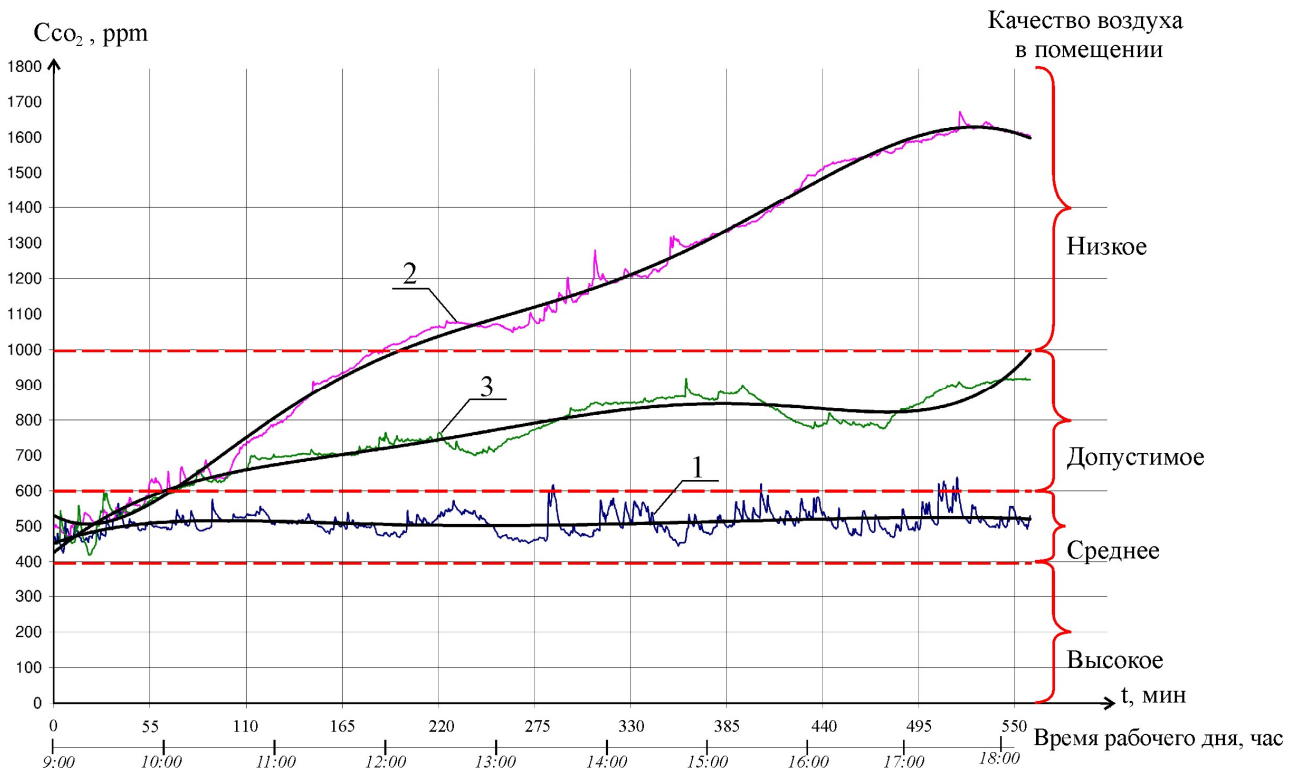


Рис. 3. Распределение концентрации углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в рабочей зоне с течением времени в теплый период года

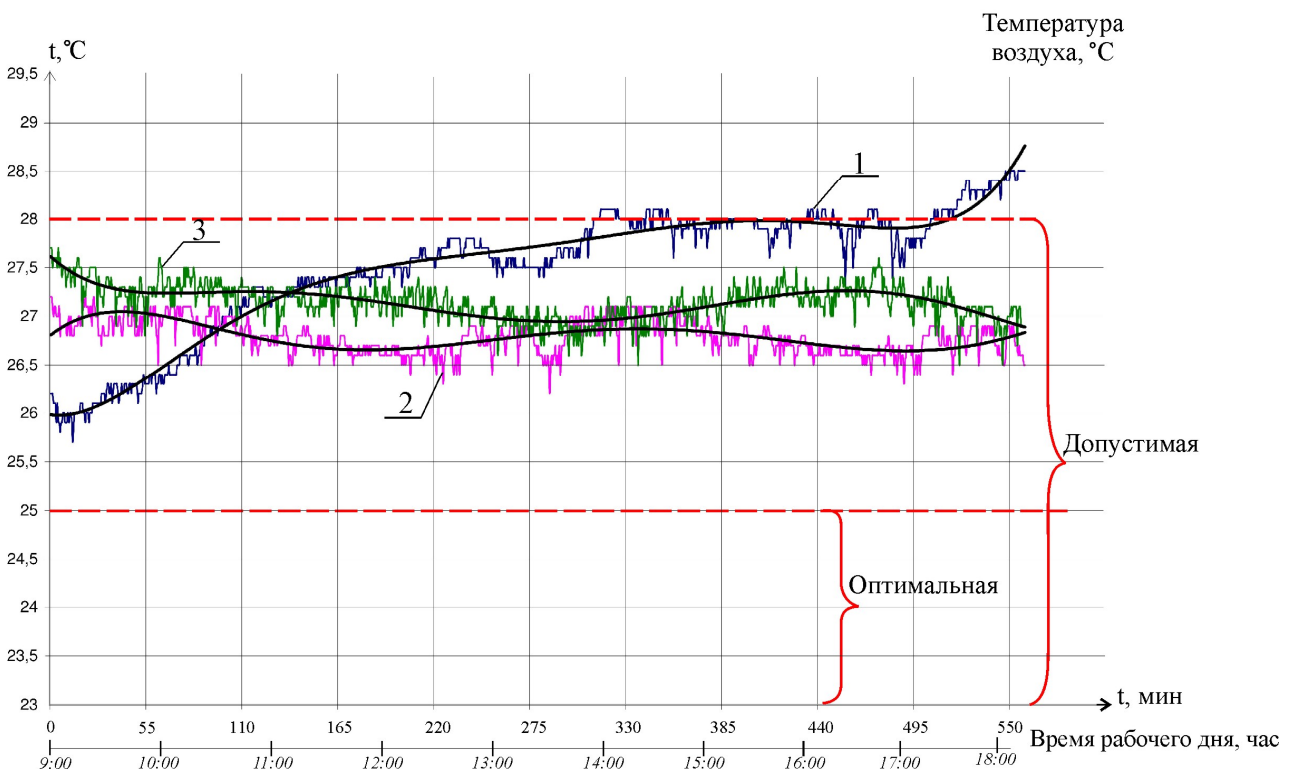


Рис. 4. Распределение температуры воздуха ( $t_a$ ) в рабочей зоне с течением времени в теплый период года

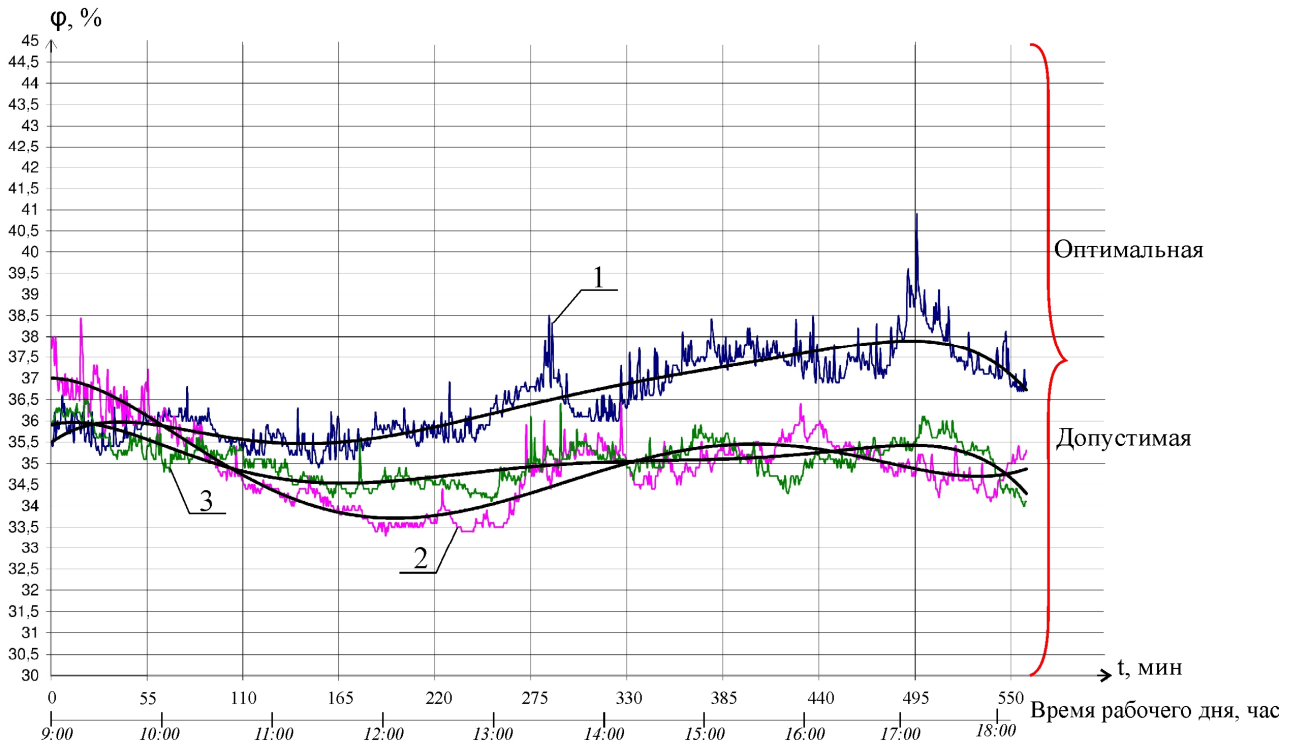


Рис. 5. Распределение относительной влажности ( $\varphi_{в}$ ) в рабочей зоне с течением времени в теплый период года

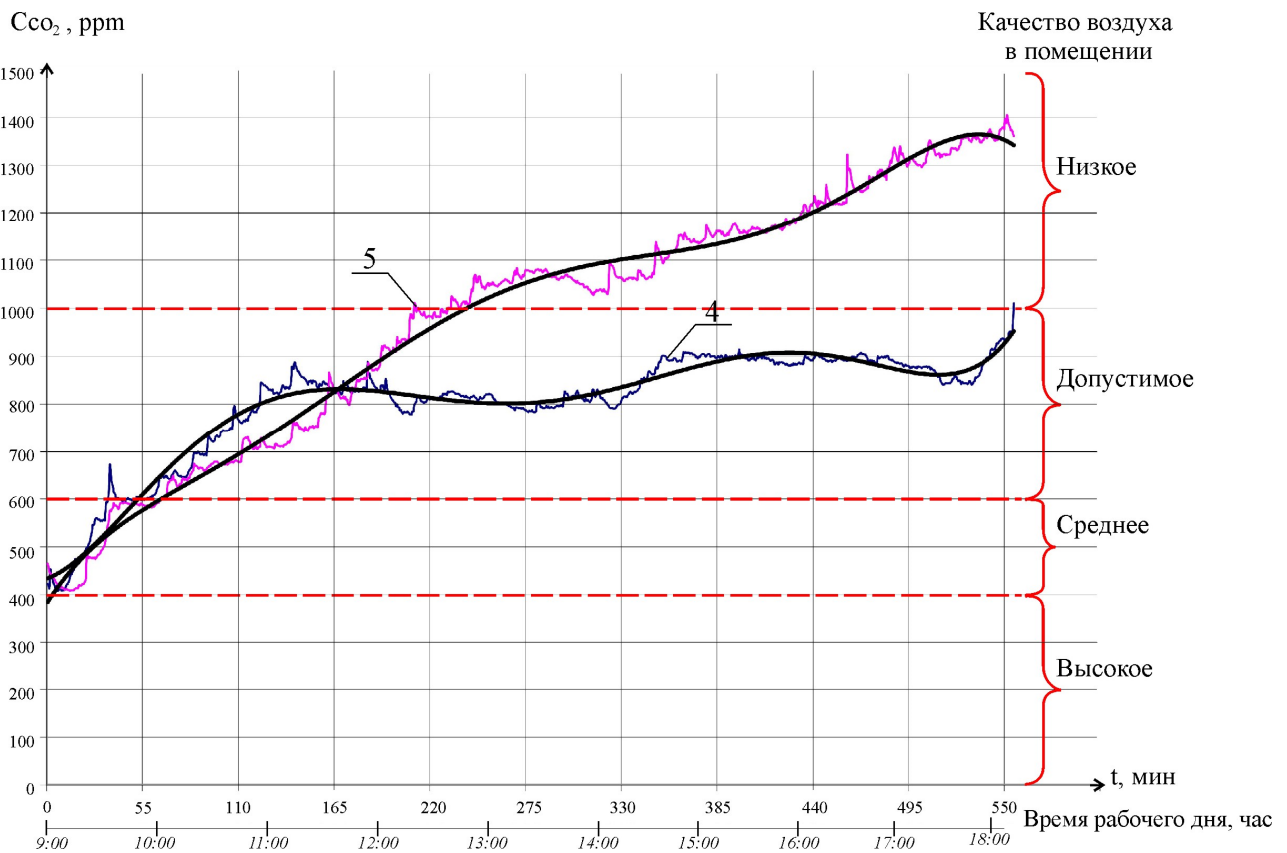


Рис. 6. Распределение концентрации углекислого газа ( $CO_2$ ) в рабочей зоне с течением времени в холодный период года

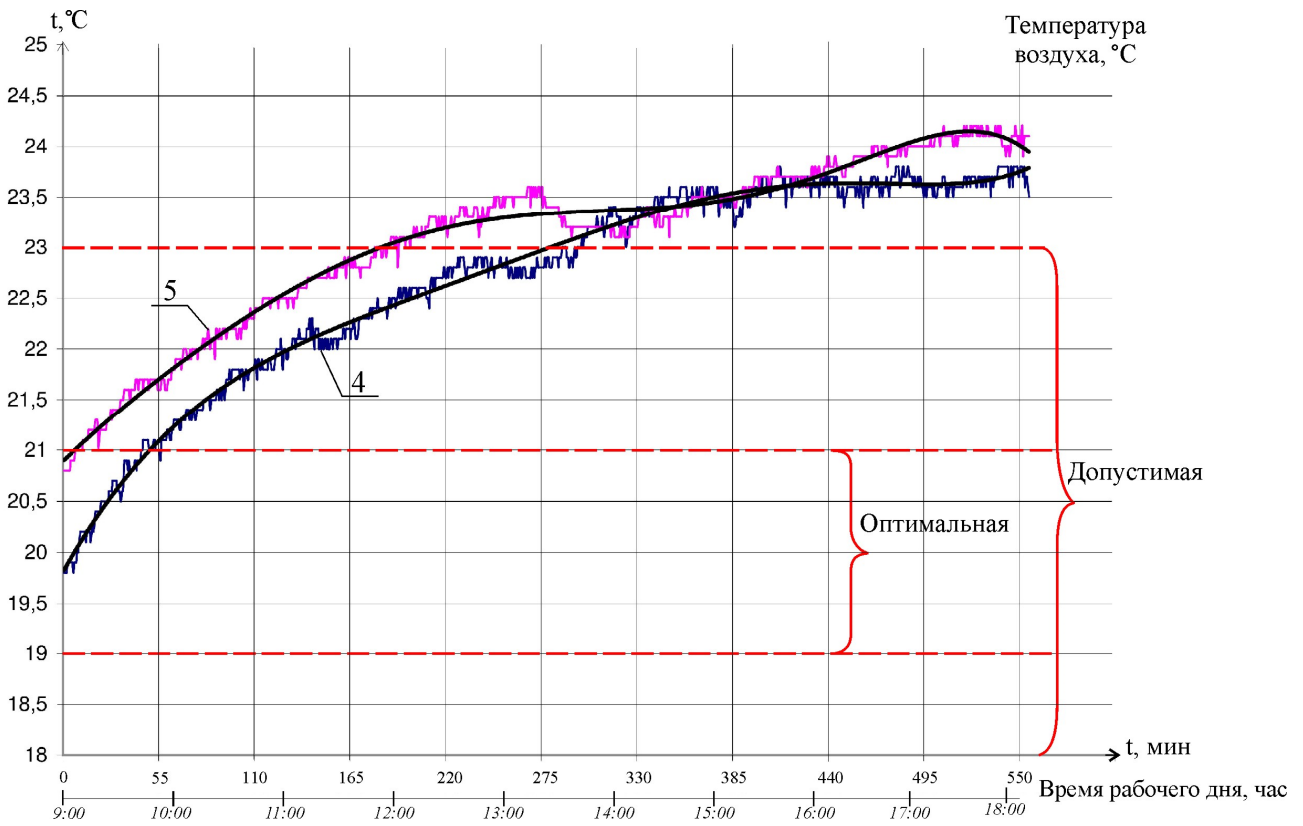


Рис. 7. Распределение температуры воздуха ( $t_{в}$ ) в рабочей зоне с течением времени в холодный период года

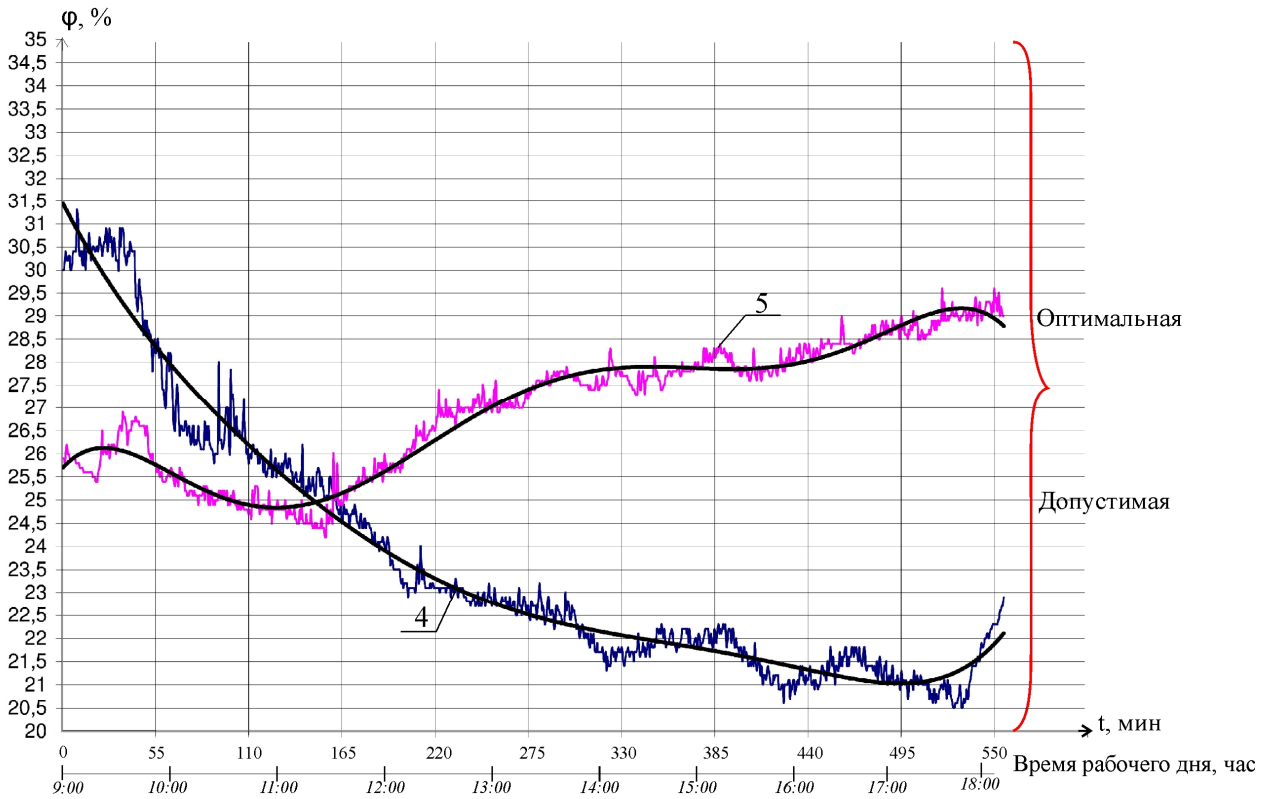


Рис. 8. Распределение относительной влажности ( $\phi_{в}$ ) в рабочей зоне с течением времени в холодный период года

Рассмотрим изменения параметров микроклимата в течение рабочего дня в зависимости от режима работы систем климатизации (режимы 1-5).

На графиках для удобства сравнения полученных экспериментальных значений с нормативными требованиями показаны соответствующие области.

При 1-м режиме: концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) варьируется в узких пределах от 450 ppm до 600 ppm и в значительной степени зависит от значения концентрации  $\text{CO}_2$  в наружном воздухе (практически становится равной). Температура внутреннего воздуха увеличивается в течение всего рабочего дня, в зависимости от изменения температуры наружного воздуха и может достигать значений выше допустимых нормативными документами. Относительная влажность воздуха в помещении также постепенно увеличивается/уменьшается в течение всего рабочего дня в зависимости от параметров наружной среды. Такой климатический режим в помещении возможен с конца апреля до середины сентября.

При 2-м режиме: концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) постоянно увеличивается с течением времени, достигая значений 1500 ppm и выше (в зависимости от характера внутренних источников выделения). Температура внутреннего воздуха с течением времени падает, достигая комфортных значений, заданных человеком на пульте управления сплит-системой. Относительная влажность воздуха в помещении также меняется в течение всего рабочего дня в зависимости от внутренних условий. Такой климатический режим в помещении характерен в летние месяцы (особо жаркие дни), когда температура наружного воздуха превышает допустимые параметры воздушной среды в помещении и, следовательно, применение естественной вентиляции не приносит желаемого температурного комфорта, воздух приходится охлаждать.

При 3-м режиме: концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) медленно увеличивается с течением времени, достигая значений 1000 ppm и выше (в зависимости от характера внутренних источников выделения). Изменения температуры внутреннего воздуха и относительной влажности аналогичны 2-му режиму. Такой климатический режим в помещении характерен в летние месяцы, когда

температура наружного воздуха превышает допустимые параметры воздушной среды в помещении и, следовательно, приходится воздух охлаждать, а применение естественной вентиляции невозможно из-за очень загрязненного наружного воздуха (крупные города, промышленные центры и т.д.)

При 4-м режиме: концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) медленно увеличивается с течением времени, достигая значений 1100 ppm и выше (в зависимости от характера внутренних источников выделения). Температура внутреннего воздуха с течением времени незначительно растет в зависимости от внутренних источников тепловыделения. Относительная влажность воздуха в помещении меняется в течение всего рабочего дня в зависимости от внутренних условий. Такой климатический режим в помещении характерен в холодные месяцы (с октября по март).

При 5-м режиме: концентрация углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) резко увеличивается с течением времени, достигая значений 1600 ppm и выше (в зависимости от характера внутренних источников выделения). Температура внутреннего воздуха с течением времени увеличивается в зависимости от внутренних источников тепловыделения. Относительная влажность воздуха в помещении меняется в течение всего рабочего дня в зависимости от внутренних условий. Такой климатический режим в помещении характерен в холодные месяцы (с октября по март) при отсутствии механической вентиляции.

Также возможны чередования климатических режимов помещения: 1 - 2, 1 - 3 и т.д.

## Выводы

Выполнив анализ вышесказанного и возможных комбинаций климатических режимов работы помещения, можно сделать следующие выводы: ни один из режимов или их комбинаций не способен обеспечить в помещении одновременно температурный и газовый комфорт (качество внутреннего воздуха на всех режимах допустимое или низкое). Наиболее благоприятным (с точки зрения содержания углекислого газа) климатическим режимом помещения в теплый период года является совмещение чередования

работы естественной вентиляции и работы охладителя (сплит-системы), что нерационально, т.к. охладив помещение, мы вновь его нагреваем.

Применение же традиционных систем климатизации (механической приточно-вытяжной вентиляции и сплит-систем) зачастую не решает поставленной задачи обеспечения в помещении одновременно газового и температурного комфорта, вследствие повсеместного применения схемы организации воздухообмена сверху-вверх. Причина неэффективности проста: смешивающая система вентиляции не способна «бороться» со всеми вредностями в помещении одновременно. Согласно современным отечественным нормам, расход воздуха следует определять отдельно для теплого, холодного периодов года и переходных условий по основным вредностям в помещении (в офисном – тепло-, влагоизбытки, углекислый газ), принимая большую из величин [4]. Сразу отметим, что приняв за расчетный воздухообмен большую из величин (например, для ассимиляции избытков теплоты), мы не гарантируем разбавление (удаление) расчетным расходом воздуха (при данной схеме воздухораспределения) других вредностей в помещении (влагоизбытки, углекислый газ). Это очень важный момент, так как углекислый газ (CO<sub>2</sub>) считается индикатором качества воздушной среды в помещении [1, 5]. Известно, что CO<sub>2</sub> примерно в 1,5 раза тяжелее воздуха, поэтому невозможно организовать комфортную воздушную среду в помещении с помощью смешивающей системы вентиляции без применения дополнительных мероприятий.

Решить данную проблему можно разными способами:

1. В реконструируемых помещениях доработать существующие системы обеспечения микроклимата с учетом возможности локального регулирования и установкой местных устройств, повышающих

качество воздушной среды (например, воздухоочистители «Аэролайф»);

2. Во вновь строящихся зданиях по возможности устраивать системы вентиляции с высоким коэффициентом эффективности системы воздухораспределения. Такими системами могут быть вытесняющая, персональная [6] и другие с установкой локальных средств улучшения комфортной среды.

Проведенные исследования доказывают актуальность и необходимость разработки и внедрения эффективных систем вентиляции, позволяющих создавать нормируемые параметры микроклимата непосредственно на рабочих местах. Создать эффективную систему микроклимата – это сложная задача, требующая не только удаления всех вредных веществ в помещении, но и создания благоприятной среды для здоровья, самочувствия и работоспособности людей.

#### Литература

1. ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
3. ГОСТ Р ЕН 13779—2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Требования к системам вентиляции и кондиционирования».
4. СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003».
5. Лобанов Д.В., Полосин И.И. Углекислый газ как показатель качества внутреннего воздуха и эффективности работы системы вентиляции // Высокие технологии. Экология: материалы 15-й межрегион. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГАСУ. 2013. С. 21-27.
6. Лобанов Д.В., Полосин И.И. Схема создания комфортных климатических параметров в офисах // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. № 2 (158). С. 58-61;
7. Шепс Р.А., Щукина Т.В. Теплозащитные свойства ограждений с учетом прогнозируемых условий эксплуатации // Жилищное строительство. 2015. № 7. С. 29-30.

Поступила 05.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

#### Информация об авторах

**Лобанов Дмитрий Валерьевич** - старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(908) 1415340; e-mail: LDV-36@mail.ru

**Шепс Роман Александрович** - старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(960) 1316601; e-mail: romansheps@yandex.ru



**Портнова Надежда Валериевна** - аспирант кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(950) 7624843; e-mail: nportnova@vgasu.vrn.ru

## EXPERIMENTAL STUDIES OF ENERGY EFFICIENCY OF CLIMATE SYSTEMS WORK IN THE OFFICE SPACE

**D.V. Lobanov, R.A. Sheps, N.V. Portnova**

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

**Abstract:** the analysis of the efficiency of microclimate maintenance systems in the office premises, which are the main consumers of thermal energy in the building, is performed. According to GOST 30494-2011 "Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures", the room under examination belongs to the 2nd category (mental work rooms) for which the regulatory documents set the parameters of the internal microclimate and determine the quality of the air. For the room, experimental studies were carried out to determine the distribution and the time variations in the main parameters of the microclimate and the concentration of carbon dioxide for different periods of the year in the room. The measurements were carried out every working day for two calendar years. The following operating modes of microclimate systems were investigated: the first mode - air conditioning and mechanical ventilation are switched off, the natural ventilation system works (windows are wide open); the second mode - mechanical and natural ventilation systems are switched off, the air conditioning system is switched on; the third mode - natural ventilation does not work, air conditioning systems and mechanical ventilation work; the fourth mode - air conditioning and natural ventilation systems do not work, mechanical ventilation works; fifth mode - ventilation and air conditioning systems are disabled. It was established that none of the regimes considered was capable of providing simultaneous temperature and gas comfort in the room. The consequence is huge capital (equipment, materials, etc.) and current (thermal and electrical energy) wastage for microclimate systems that do not provide the expected effect

**Key words:** ventilation of office premises, microclimate maintenance systems, operating modes of ventilation systems, personal ventilation, analysis of the operation of ventilation systems

### References

1. GOST 30494-2011 "Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures"
2. SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 "Hygienic requirements to personal electronic computers and work organization" ("Gigienicheskie trebovaniya k personal'nyim elektronno-vychislitel'nyim mashinam i organizatsii raboty")
3. GOST R EN 13779-2007 "Ventilation for non-residential buildings. Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems"
4. SP 60.13330.2016 "Heating, ventilation and air conditioning. The updated edition of SNiP 41-01-2003"
5. Lobanov D.V., Polosin I.I. "Carbon dioxide as an indicator of internal air quality and efficiency of the ventilation system", *Proc. of the 15th interregional scientific-practical conference "High technologies. Ecology" (Vysokie tekhnologii. Ekologiya: materialy 15-y mezhregional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii)*, Voronezh, VSUACE, 2013, pp. 21-27.
6. Lobanov D.V., Polosin I.I. "Scheme of creating comfortable climatic parameters in the office", *Plumbing, heating, air-conditioning (Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie)*, 2015, no. 2 (158), pp. 58-61.
7. Sheps R.A., Shchukina T.V. "Heat-shielding properties of barriers taking into account projected operating conditions", *Housing construction (Zhilishchnoe stroitel'stvo)*, 2015, no. 7, pp.29-30.

Submitted 05.04.2018; revised 16.05.2018

### Information about the authors

**Dmitriy V. Lobanov**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel: +7(908) 1415340; e-mail: LDV-36@mail.ru

**Roman A. Sheps**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel.: + 7 (960) 1316601; e-mail: romansheps@yandex.ru

**Nadezhda V. Portnova**, Graduate Student Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel: +7(950) 7624843; e-mail: nportnova@vgasu.vrn.ru

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

© 2018 С.В. Дахин, В.И. Рязских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** получено аналитическое решение, позволяющее провести анализ влияния условий теплообмена на длительность нестационарных тепловых режимов поверхностного теплообменника. Итоговая формула записана через термические сопротивления теплоотдачи и водяные эквиваленты, что упрощает такой анализ на любой стадии разработки, проектирования или промышленной эксплуатации теплотехнического оборудования. Показано, что в зависимости от конкретных численных значений термосопротивлений, водяных эквивалентов и начальной температуры стенки теоретически принципиально возможно создание условий для минимальной длительности нестационарных тепловых режимов теплообменника. Получено выражение, определяющее совокупность параметров теплообмена для минимизации времени выхода на стационарный режим. Приведённые решения справедливы для прямоточной или противоточной схемы течения теплоносителей, но могут быть распространены и на более сложные схемы, например, для перекрёстного тока. При значительном изменении теплофизических свойств теплоносителя или рассмотрении более сложных схем течения возможна адаптация полученного решения к интервально-итерационному расчёту

**Ключевые слова:** нестационарный режим, теплообмен, теплообменник, время

### Введение

В процессе работы любого теплообменника всегда присутствуют начальный и конечный режимы работы (пуск и останов), а при эксплуатации неизбежны переходы между стационарными режимами. Зачастую продолжительность таких переходных (нестационарных) периодов составляет достаточно большую долю времени работы теплообменника, что актуально для технологических линий, работающих по периодическому или циклическому графику.

Знание особенностей протекания подобных процессов и умение, в частности, определять время переходного процесса необходимо для проектирования теплотехнического оборудования, для разработки надёжной системы регулирования, а также для прогнозирования условий безопасной работы установки в аварийных ситуациях, например при отключении электропитания.

В данной работе приводятся результаты аналитического решения для времени установления стационарного режима поверхностного теплообменника и анализ влияния условий теплообмена на продолжительность переходного периода.

### Постановка задачи и описание модели

Рассмотрим рекуперативный теплообменный аппарат, в данном случае конструкция аппарата не принципиальна и может быть любой,

с простейшей схемой течения теплоносителей - прямоток или противоток.

Считаем, что изменение температуры теплоносителей по длине аппарата является линейным, а средняя температура определится как среднее арифметическое

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}; \bar{t}_2 = \frac{t_2' + t_2''}{2}. \quad (1)$$

Здесь и далее индекс 1 относится к греющему теплоносителю, индекс 2 - к нагреваемому; верхний индекс "штрих" - параметры теплоносителя на входе в аппарат, "два штриха" - на выходе.

Уравнения теплового баланса и теплоотдачи для каждого теплоносителя:

$$\left. \begin{aligned} dQ_1 &= G_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') d\tau; \\ dQ_1 &= \alpha_1 F_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_w) d\tau; \\ dQ_2 &= G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') d\tau; \\ dQ_2 &= \alpha_2 F_2 (\bar{t}_w - \bar{t}_2) d\tau, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $dQ_1, dQ_2$  - тепловые потоки, Дж;  $G_1, G_2$  - массовые расходы теплоносителей, кг/с;  $c_{p1}, c_{p2}$  - удельные изобарные теплоёмкости теплоносителей, Дж/(кг·К);  $\alpha_1, \alpha_2$  - средние по поверхности коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_1, F_2$  - поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>, в общем случае,  $F_1 \neq F_2$ ;  $\bar{t}_w$  - средняя температура стенки, °С;  $\tau$  - время, с.

Так как при переходном режиме часть теплоты аккумулируется стенкой, то  $dQ_1 \neq dQ_2$ . Тогда в качестве динамической характеристики можно принять

$$dQ_1 - dQ_2 = m_w c_{pw} dt_w, \quad (3)$$

где  $m_w$  - масса теплообменной поверхности, кг;  $c_{pw}$  - удельная изобарная теплоёмкость материала стенки, Дж/(кг·К).

Система (2) и уравнение (3) с учётом (1) позволяют получить математическую модель в следующем виде:

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} = \alpha_1 F_1 \left[ \frac{\dot{t}_1 + \dot{t}_1''(\tau)}{2} - \bar{t}_w(\tau) \right]; \quad (4)$$

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} = G_1 c_{p1} [\dot{t}_1' - \dot{t}_1''(\tau)]; \quad (5)$$

$$\frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = \alpha_2 F_2 \left[ \bar{t}_w(\tau) - \frac{\dot{t}_2 + \dot{t}_2''(\tau)}{2} \right]; \quad (6)$$

$$\frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = G_2 c_{p2} [\dot{t}_2''(\tau) - \dot{t}_2']; \quad (7)$$

$$\frac{dQ_1(\tau)}{d\tau} - \frac{dQ_2(\tau)}{d\tau} = m_w c_{pw} \frac{d\bar{t}_w(\tau)}{d\tau}; \quad (8)$$

$$\dot{t}_1'(0) = \dot{t}_1'; \quad (9)$$

$$\dot{t}_2'(0) = \dot{t}_2'; \quad (10)$$

$$\bar{t}_w(0) = \bar{t}_w; \quad (11)$$

где  $\dot{t}_1''(\tau), \dot{t}_2''(\tau)$  - текущая конечная температура соответствующих теплоносителей, °С;  $\bar{t}_w(\tau)$  - текущая средняя температура стенки теплопередающей поверхности, °С.

### Решение и обсуждение

Выразив из (1) и (2), (3) и (4) соответственно  $\dot{t}_1''(\tau)$  и  $\dot{t}_2''(\tau)$  через  $\bar{t}_w$ , затем, подставив (4) и (6) в (8), получим

$$\begin{aligned} & \dot{t}_1' \frac{\alpha_1 F_1}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_1 F_1 - 2G_1 c_{p1}}{\alpha_1 F_1 + 2G_1 c_{p1}} \right) - \\ & - \dot{t}_2' \frac{\alpha_2 F_2}{2} \left( \frac{\alpha_2 F_2 - 2G_2 c_{p2}}{\alpha_2 F_2 + 2G_2 c_{p2}} - 1 \right) + \\ & + \bar{t}_w \alpha_1 F_1 \left[ \left( \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_1 F_1 + 2G_1 c_{p1}} - 1 \right) - \right. \\ & \left. - \alpha_2 F_2 \left( 1 - \frac{\alpha_2 F_2}{\alpha_2 F_2 + 2G_2 c_{p2}} \right) \right] = \\ & = m_w c_{pw} \frac{d\bar{t}_w(\tau)}{d\tau}. \end{aligned} \quad (12)$$

Обозначив

$$R = \frac{1}{\alpha F}; W = G c_p,$$

после преобразований получим:

$$\begin{aligned} & \frac{d\bar{t}_w(\tau)}{d\tau} + \frac{2}{m_w c_{pw}} \left[ \frac{W_1}{1 + 2R_1 W_1} + \frac{W_2}{1 + 2R_2 W_2} \right] \bar{t}_w = \\ & = \frac{2}{m_w c_{pw}} \left[ \frac{W_1}{1 + 2R_1 W_1} \dot{t}_1' + \frac{W_2}{1 + 2R_2 W_2} \dot{t}_2' \right], \end{aligned} \quad (13)$$

где  $R_{1,2}, W_{1,2}$  - термосопротивление теплоотдачи, К/Вт, и водяной эквивалент, Вт/К, соответствующего теплоносителя.

В [1], при решении задачи в подобной постановке, получено следующее уравнение в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} & \frac{dT_w(\theta)}{d\theta} + \left( \frac{2\xi_1 Nu_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} + \right. \\ & \left. + \frac{2A\xi_2 Nu_2 Re_2 Pr_2}{Nu_2 + 2\xi_2 Re_2 Pr_2} \right) T_w(\theta) = \\ & = \xi_1 Re_1 Pr_1 \left( 1 + \frac{Nu_1 - 2\xi_1 Re_1 Pr_1}{Nu_1 + 2\xi_1 Re_1 Pr_1} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{Здесь } \theta = \frac{F_1 \lambda_1 \tau}{M_w c_{pw} d_1}; \quad T_{1,2}^\infty(\theta) = \frac{t_{1,2}^\infty(\tau) - t_2^0}{t_1^0 - t_2^0};$$

$$T_w^\infty(\theta) = \frac{t_w(\tau) - t_2}{t_1^0 - t_2^0}; \quad A = \frac{F_2 \lambda_2 d_1}{F_1 \lambda_1 d_2}; \quad \xi_{1,2} = \frac{k_F^{(1,2)} d_{1,2}}{2\pi l};$$

$$Nu_{1,2} = \frac{\alpha_{1,2} d_{1,2}}{\lambda_{1,2}}; \quad Re_{1,2} = \frac{w_{1,2} d_{1,2}}{v_{1,2}}, \quad t_1^0, \quad t_2^0, \quad t_1^\infty(\tau),$$

$t_2^\infty(\tau)$  - начальная и текущая температура соответствующих теплоносителей;  $t_w(\tau)$  - текущая средняя температура стенки теплопередающей

поверхности;  $\tau$  - время;  $Pr_{1,2}$ ,  $\lambda_{1,2}$ ,  $\nu_{1,2}$  - критерий Прандтля и коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости соответствующего теплоносителя;  $d_{1,2}$  - гидравлические диаметры со стороны теплоносителей;  $k_F^{(1,2)}$  - коэффициент формы проходного сечения со стороны теплоносителей;  $w_{1,2}$  - скорость теплоносителей;  $l$  - характерный размер теплопередающей поверхности.

Но так как численные значения  $Re$  и  $Nu$  зависят от выбора характерного размера, который, в свою очередь, определяется требованиями к выбранному критериальному уравнению, то для приведения в соответствие безразмерных критериев греющего и нагреваемого теплоносителей необходимо знать зависимость коэффициента формы проходного сечения от характерного размера. Причём, такая зависимость является сложной и трудоёмкой в определении. Исключение составляют спиральные или пластинчатые теплообменники с прямыми гладкими каналами, в которых для всех теплоносителей характерный размер одинаков. Таким образом, сложность в определении  $k_F^{(1,2)}$  при численном анализе не даёт никаких преимуществ безразмерной форме уравнения.

Вводя обозначения:

$$\Omega = \frac{2}{m_w c_{pw}} \left[ \frac{W_1}{1 + 2R_1 W_1} + \frac{W_2}{1 + 2R_2 W_2} \right]; \quad (15)$$

$$\Psi = \frac{2}{m_w c_{pw}} \left[ \frac{W_1}{1 + 2R_1 W_1} t_1' + \frac{W_2}{1 + 2R_2 W_2} t_2' \right], \quad (16)$$

уравнение (13) примет вид:

$$\frac{d\bar{t}_w(\tau)}{d\tau} + \Omega \bar{t}_w(\tau) = \Psi. \quad (17)$$

Решение (17) и (11) в формулировке задачи Коши таково:

$$\bar{t}_w(\tau) = \bar{t}_w(0) e^{-\Omega\tau} + \frac{\Psi}{\Omega} [1 - e^{-\Omega\tau}]. \quad (18)$$

Для численной оценки влияния условий теплообмена на длительность нестационарных тепловых режимов теплообменника определим диапазон изменения основных факторов.

Положим, что

$$\alpha_{1,2} = 50 \div 150000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$G_{1,2} = 1,7 \cdot 10^{-5} \div 20 \text{ кг}/\text{с};$$

$$c_{p1,2} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Тогда

$$R_{1,2} = 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-2};$$

$$W_{1,2} = 10^{-2} \div 10^5.$$

За базовый вариант принимаем:  $R_1 = R_2 = 10^{-3}$ ;  $W_{1,2} = 1000$ ;  $F_1 = F_2 = 1$ ;  $m = 10 \text{ кг}$ ;  $t_1' = 100^\circ\text{C}$ ;  $t_2' = 10^\circ\text{C}$ ;  $\bar{t}_w = 20^\circ\text{C}$ ; материал стенки - медь.

На рис. 1 и 2 показаны динамические характеристики теплообменника, рассчитанные по (18), при разной начальной температуре стенки. Линия на графике характеризует влияние изменяемого параметра на динамику средней температуры стенки, все остальные величины соответствуют базовому варианту. Для  $W$  введена дополнительная ось  $\tau$  с обратным порядком значений. Сплошные линии относятся к греющему теплоносителю, пунктирные - к нагреваемому.

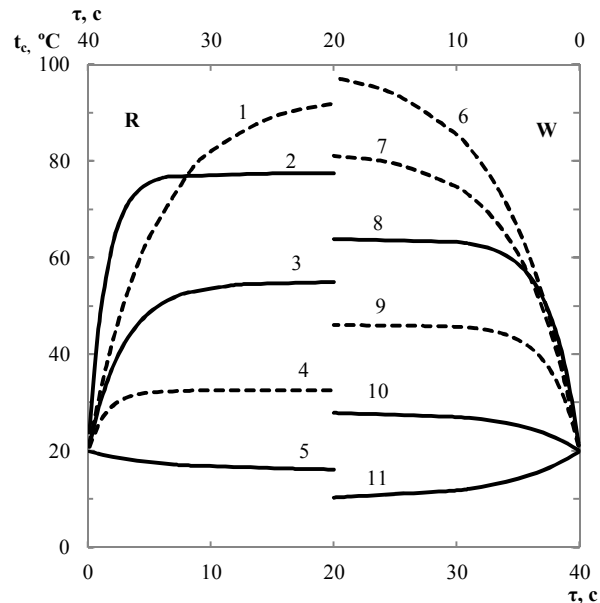


Рис. 1. Динамическая характеристика теплообменника при  $\bar{t}_w = 20^\circ\text{C}$

- 1 -  $R_2 = 0,02$ ; 2 -  $R_1 = 0$ ; 3 -  $R_1 = 0,001$ ; 4 -  $R_2 = 0$ ; 5 -  $R_1 = 0,02$ ;
- 6 -  $W_2 = 0,01$ ; 7 -  $W_2 = 100$ ; 8 -  $W_1 = 10000$ ; 9 -  $W_2 = 10000$ ;
- 10 -  $W_1 = 100$ ; 11 -  $W_1 = 0,01$

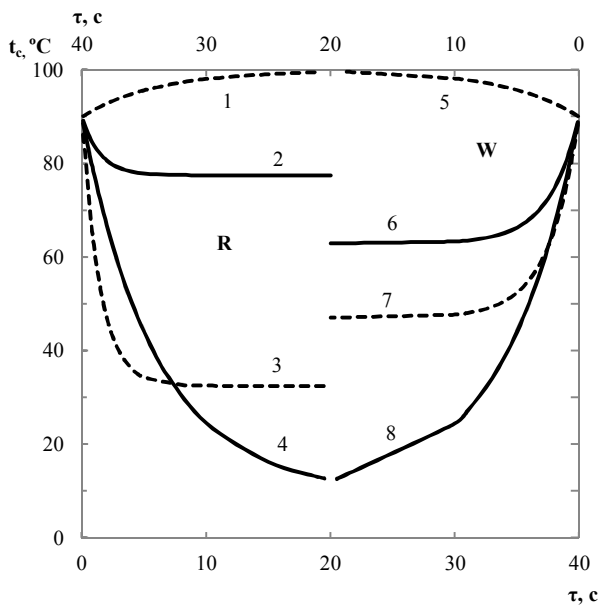


Рис. 2. Динамическая характеристика теплообменника при  $\bar{t}_w = 90^\circ\text{C}$

- 1 -  $R_2 = 1$ ; 2 -  $R_1 = 0$ ; 3 -  $R_2 = 0$ ; 4 -  $R_1 = 1$ ;
- 5 -  $W_2 = 0$ ; 6 -  $W_1 = 10000$ ; 7 -  $W_2 = 10000$ ; 8 -  $W_1 = 0$

Из рисунков видно, что на динамику изменения температуры стенки практически в одинаковой степени, но по-своему оказывают влияние все изменяемые параметры. А температура стенки при установившемся режиме зависит от численного соотношения значений всех рассматриваемых параметров.

- Анализ решения показал, что практически: при  $W \geq 10^4$  можно принять, что  $W \rightarrow \infty$ ;
- если  $W \leq 1$ , то  $W = 0$ ;
- если  $R \leq 10^{-5}$ , то  $R = 0$ ;
- если  $R \geq 0,1$ , то  $R \rightarrow \infty$ .

На рис. 1 линии 5 и 11 имеют нисходящую направленность, тогда как все остальные линии направлены вверх. Тоже наблюдается на рис. 2 для линий 1 и 5, но для нагреваемого теплоносителя и, соответственно, в противоположном направлении.

Это объясняется тем, что существует режим теплообмена, при котором установившаяся температура стенки равна её начальному значению  $\bar{t}_w(\infty) = \bar{t}_w(0)$ . В этом случае время выхода теплообменника на стационарный режим стремится к нулю.

Подобные режимы возможны при условии, что для греющего теплоносителя начальная температура стенки будет меньше максимально возможной при стационарном режиме,

для нагреваемого - больше минимально возможной:

$$\begin{aligned} \bar{t}_w(0) &< \max_{\substack{R_1 \rightarrow 0; \\ W_1 \rightarrow \infty}} \bar{t}_w(\infty); \\ \bar{t}_w(0) &> \min_{\substack{R_2 \rightarrow 0; \\ W_2 \rightarrow \infty}} \bar{t}_w(\infty). \end{aligned} \quad (19)$$

Для многих практических задач, необходимо знать время выхода на стационарный режим, которое определяется из условия:

$$\left| 1 - \frac{\bar{t}_w(\tau)}{\bar{t}_w(\infty)} \right| = \varepsilon, \quad (20)$$

где  $\varepsilon$  - относительная невязка.

Для стационарного случая из (18) получим

$$\bar{t}_w(\infty) = \frac{\Psi}{\Omega}. \quad (21)$$

Таким образом, при  $\tau \rightarrow \infty$  начальные условия не влияют на температуру стенки, которая зависит только от условий теплообмена.

Тогда из (20) с учётом (18) и (21) получим

$$\tau = \frac{1}{\Omega} \ln \left[ \frac{1 - \bar{t}_w(0) \frac{\Omega}{\Psi}}{\varepsilon} \right]. \quad (22)$$

Проанализируем влияние условий теплообмена на время выхода теплообменника на стационарный режим при  $\varepsilon = 0,01$ . Результаты сравнения удобно представить графически в безразмерном виде (рис. 3). По оси ординат отложим безразмерное время  $Y = \tau_x / \tau_x^{\text{баз}}$ , по оси абсцисс изменяемые величины в безразмерном виде  $X = f_x / f_x^{\text{баз}}$ , где

$$\tau_x = \begin{cases} f_1(W_1); \\ f_2(W_2); \\ f_3(R_1); \\ f_4(R_2); \end{cases} \tau_x^{\text{баз}} = \begin{cases} f_1(W_1^{\text{баз}}); \\ f_2(W_2^{\text{баз}}); \\ f_3(R_1^{\text{баз}}); \\ f_4(R_2^{\text{баз}}). \end{cases}$$



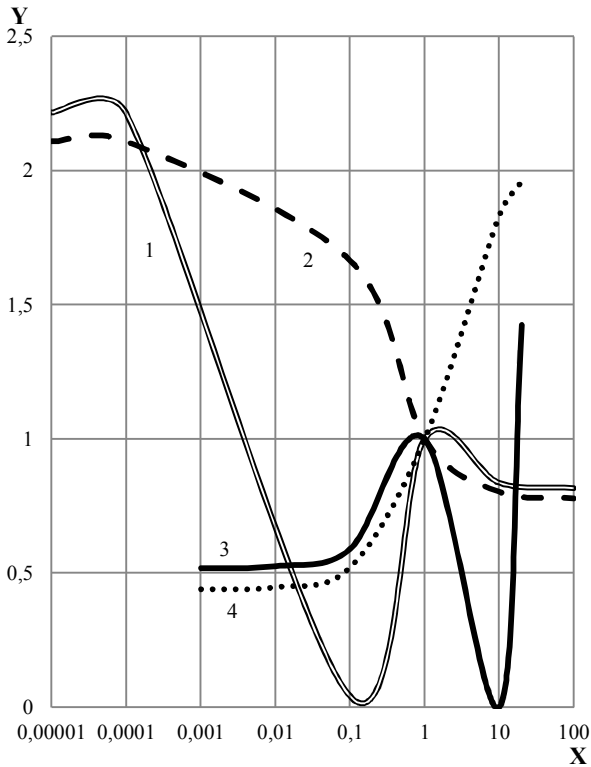


Рис. 3. Зависимость времени выхода на стационарный режим от различных факторов при  $\bar{t}_w = 20^\circ\text{C}$   
 1 -  $\bar{W}_1$ ; 2 -  $\bar{W}_2$ ; 3 -  $\bar{R}_1$ ; 4 -  $\bar{R}_2$

Анализ (22) показывает, что существуют условия теплообмена, при которых  $\tau = 0$ . Для чего достаточно положить

$$\left| 1 - t_w(0) \frac{\Omega}{\Psi} \right| = \varepsilon.$$

Откуда

$$\frac{\Omega}{\Psi} = \frac{1 - \varepsilon}{t_w(0)}. \quad (23)$$

Поступила 16.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

**Информация об авторах**

**Дахин Сергей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: svdakhin@ya.ru

**Рязских Виктор Иванович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru

**INFLUENCE OF HEAT EXCHANGE CONDITIONS ON DURATION OF THE NON-STATIONARY THERMAL MODES OF THE SUPERFICIAL HEAT EXCHANGER**

**S.V. Dakhin, V.I. Ryazhskikh**

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

Численные значения минимума  $\tau$  для греющего теплоносителя, линии 1 и 3, соответствуют условию (23).

**Заключение**

Полученное аналитическое решение задачи (4)-(11) позволяет провести анализ влияния условий теплообмена на длительность нестационарных тепловых режимов поверхностного теплообменника. А запись итоговой формулы через термические сопротивления теплоотдачи и водяные эквиваленты упрощает такой анализ на любой стадии разработки, проектирования или промышленной эксплуатации теплотехнического оборудования.

Получено условие (23), определяющее совокупность параметров теплообмена для минимизации времени выхода на стационарный режим.

Приведённые решения справедливы для прямоточной или противоточной схемы течения теплоносителей, но могут быть распространены и на более сложные схемы, например, для перекрёстного тока. У теплоносителя, движущегося в поперечном направлении, вместо средней температуры по потоку используется средняя температура по поверхности.

При значительном изменении теплофизических свойств теплоносителей или рассмотрении более сложных схем течения возможна адаптация полученного решения к интервально-итерационному расчёту.

**Литература**

1. Дахин С.В., Дроздов И.Г., Рязских В.И. Влияние геометрических характеристик трубного пучка на основные параметры воздухоохлаждаемых теплообменников с учётом нестационарных режимов их работы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 50-56.

**Abstract:** an analytical solution was obtained that makes it possible to analyze the effect of heat exchange conditions on the duration of the unsteady thermal conditions of a surface heat exchanger. The final formula is written with thermal resistance of heat transfer and water equivalents, which simplifies such analysis at any stage of development, design or industrial operation of heating equipment. It is shown that, depending on the specific numerical values of the thermoresistance, water equivalents and initial wall temperature, it is theoretically possible to create conditions for the minimum duration of the unsteady thermal conditions of the heat exchanger. An expression is obtained that determines the set of heat transfer parameters to minimize the time to reach the stationary mode. The solutions given are valid for a straight-through or countercurrent flow of heat transfer media, but can be extended to more complex circuits, for example, for cross current. With a significant change in the thermophysical properties of coolants or consideration of more complex flow patterns, it is possible to adapt the solution obtained to the interval-iterative calculation

**Key words:** non-stationary mode, heat exchange, heat exchanger, time

#### References

1. Dakhin S.V., Drozdov I.G., Ryazhskikh V.I. "Influence of geometrical characteristics of the low-line pipe bunch on key parameters of air-cooled heat exchangers taking into account the non-stationary modes of their work", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 50-56.

Submitted 16.04.2018; revised 16.05.2018

#### Information about the authors

**Sergey V. Dakhin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: svdakhin@ya.ru

**Viktor I. Ryazhskikh**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ryazhskih\_vi@mail.ru

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЖИДКОСТНЫХ КАНАЛАХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БЛОКА ОХЛАЖДЕНИЯ

© 2018 А.В. Кретинин<sup>1</sup>, Д.Н. Галдин<sup>1</sup>, Е.Е. Спицына<sup>2</sup>, А.Н. Попков<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>АО "Турбонасос", г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, г. Борисоглебск, Россия

**Аннотация:** для численного моделирования тепломассопереноса в жидкостных каналах термоэлектрического блока охлаждения сформирована сеточная модель проточной части с использованием модуля ANSYS Meshing. Осуществлен синтез математической модели компьютерной динамики жидкости с подключенным уравнением энергии в модуле ANSYS CFX. Построена сеточная модель термоэлектрического модуля в модуле ANSYS ThermalElectric. Построены модели типа Response Surface термоэлектрического анализа для термоэлектрических модулей и тепломассопереноса для жидкостных каналов блока охлаждения. Результаты моделирования показали, что, во-первых, значительная часть жидкостных каналов работает в области нестабилизированного течения жидкости как на входе в каналы, так и на выходе. Во-вторых, развитая (зубчатая) поверхность теплообмена со стороны жидкости оставляет открытым вопрос о преобладающем механизме (молярном либо молекулярном) переноса тепла от теплоносителя в стенку термоэлектрического модуля охлаждения (ТЭМО). В-третьих, перенос тепла осуществляется в термоэлектрический материал при различных значениях подведенной к ТЭМО электрической энергии. И в этом случае тепло передается от холодного к горячему спаю, т.е. задействуется термоэлектрический механизм теплопереноса при существенном влиянии тепловых процессов, проходящих в соответствии с законами Фурье и Джоуля. Проведенные экспериментальные исследования показали значительное влияние термоэлектрической природы поглощения тепла на холодном спае на интенсивность теплообмена между теплоносителем и стенками ТЭМО. Получена идентифицированная зависимость закона теплообмена на стенке жидкостного канала, граничащего с термоэлектрическим модулем

**Ключевые слова:** численное моделирование, теплообмен, термоэлектрический элемент

**Благодарности:** представленная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы (Соглашение №14.577.21.0202, уникальный идентификатор RFMEFI57715X0202)

### Введение

Перспективность применения термоэлектрических охладителей (ТЭО) обуславливается целым рядом достоинств, в том числе малыми габаритами, массой, временем выхода на режим, простотой конструкции, высокой надежностью, бесшумностью при эксплуатации, практически неограниченным ресурсом и т.д. Вышеприведенный комплекс достоинств, обеспечение которого для ТЭО является тривиальным, делает их наиболее предпочтительными для охлаждения узлов радиоэлектронной аппаратуры.

### Математическая модель

Моделирование компонента блока охлаждения, по которому циркулирует жидкость, проводилось с использованием модуля вычислительной гидродинамики Ansys CFX [1]. Размеры конечных объемов варьировались от 0,05 мм до 10 мм в зависимости от решаемой задачи и геометрического расположения в проточной

части. Исходная модель моделируемого блока охлаждения представлена на рис. 1. Для отображения внутренних компонентов из модели исключён внешний корпус. Блок охлаждения состоит из следующих основных компонентов: термоэлектрические модули, жидкостный теплообменник, воздушный теплообменник. В данной статье проведено моделирование жидкостного теплообменника.

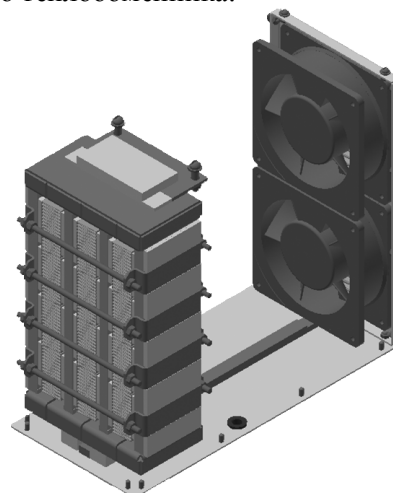


Рис. 1. Модель блока охлаждения

В жидкостном теплообменнике содержится 4 группы по 11 каналов в каждой. По двум группам жидкость циркулирует в прямом направлении, а по двум другим – в обратном. Общий вид проточной части представлен на рис. 2. Имеется два различных варианта сечения каналов. Первый вариант каналов имеет треугольную форму с дополнительно развитой поверхностью теплообмена. Площадь сечения данного варианта составляет  $23,218 \text{ мм}^2$ . Второй вариант каналов имеет вид прямоугольной трапеции. Площадь сечения второго варианта составляет  $24,906 \text{ мм}^2$ . Длина каждого канала составляет 200 мм. Второй тип каналов расположен на граничных позициях в каждой из групп, в то время как первый занимает всё остальное пространство. На рис. 3 представлены проточные части вариантов каналов и их компоновка в одной из групп.

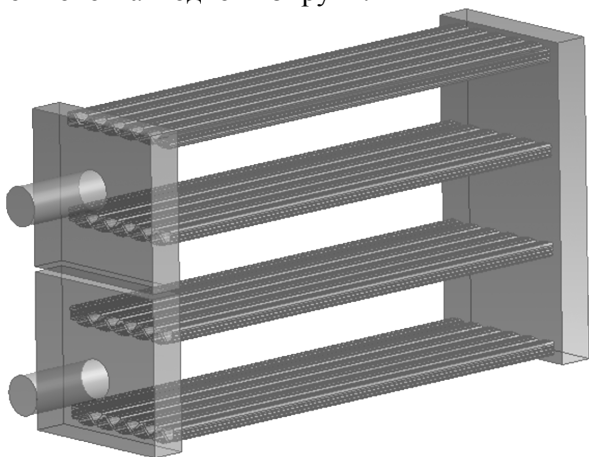


Рис. 2. Общий вид проточной части жидкостного теплообменника



Рис. 3. Компоновка каналов

После создания трёхмерной модели проточной части каналов теплообменника производилась генерация сеточной модели для проведения дальнейшего анализа. Полученная геометрия является весьма сложной для проведения анализа, поскольку она состоит из 1124 поверхностей, образованных 3152 гранями. В исходном варианте построение сеточной модели является ресурсоёмкой задачей, поэтому было принято решение о разделении геометрии на 47 отдельных тел (44 канала, входной, промежуточный и выходной коллекторы).

Для входного и выходного коллектора сеточная модель генерировалась с использовани-

ем тетраэдральных элементов и активацией дополнительного алгоритма улучшения сеточной модели по приближению и искривлению геометрии (proximity and curvature). Минимальный размер грани элемента сеточной модели задавался равным  $0,01 \text{ мм}$ , а максимальный ограничивался  $5 \text{ мм}$ . Приращение длины граней элементов составляло  $1,2$  для соседних элементов. Дополнительно создавались семь пристеночных призматических слоёв. Толщина первого слоя задавалась равной  $0,05 \text{ мм}$ , с темпом увеличения толщины  $1,2$ . Полученные модели содержали около 1 млн. элементов каждая. На рис. 4 представлены сеточная модель входного коллектора и область построения призматических слоёв.

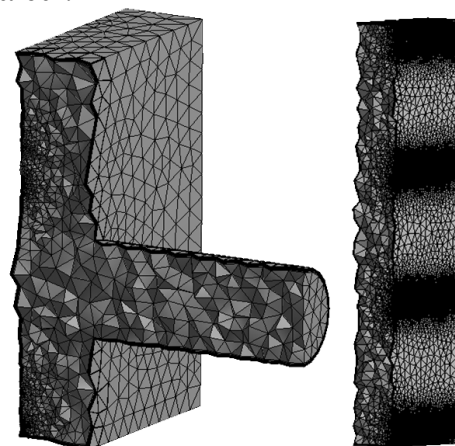


Рис. 4. Сеточная модель входного и промежуточного коллектора

Сеточная модель промежуточного коллектора генерировалась со схожими установками сеточной модели. На рис. 5 представлена сеточная модель и область построения пристеночного слоя. В регионах контакта с телами каналов происходит значительное измельчение сеточной модели. Полученная сеточная модель содержала приблизительно  $1,8 \text{ млн.}$  элементов.

Сеточные модели каналов генерировались с использованием тетраэдральных элементов и активацией дополнительного алгоритма улучшения сеточной модели по приближению и искривлению геометрии (proximity and curvature). Минимальный размер грани элемента сеточной модели задавался равным  $0,01 \text{ мм}$ , а максимальный ограничивался  $5 \text{ мм}$ . Приращение длины граней элементов составляло  $1,2$  для соседних элементов. Дополнительно создавались семь пристеночных призматических слоёв. Толщина первого слоя задавалась равной  $0,05 \text{ мм}$ , с темпом увеличения толщины  $1,2$ . Сеточные модели каналов треугольного сечения со-

Таблица 1

держали приблизительно 300 тыс. элементов, а трапециевидные каналы по 340 тыс. элементов. Общее число элементов в сеточной модели каналов с жидкостью приблизительно 16,3 миллионов.

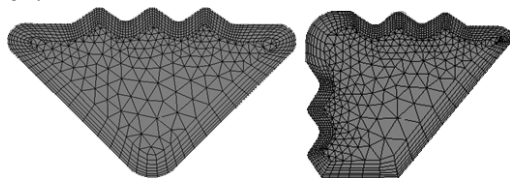


Рис. 5. Сеточная модель первого и второго видов каналов

### Результаты расчета

При расчёте гидродинамики блока охлаждения было проведено несколько расчётов согласно плану проведения лабораторного эксперимента. Ниже представлен пример решения для иллюстрации реализации расчетных алгоритмов. Моделирование проводилось в стационарной постановке. В качестве граничных и начальных условий в демонстрационном варианте постановки задачи использованы следующие значения:

- на входе в проточную часть (рис. 6) задавался массовый расход жидкости 0,05 кг/с; температура жидкости задавалась равной 70 °С;
- на выходе из проточной части – среднее статическое давление 2 атм;
- температура на поверхностях теплообмена задавалась равной 25 °С.

Температуры на поверхностях теплообмена 25 С

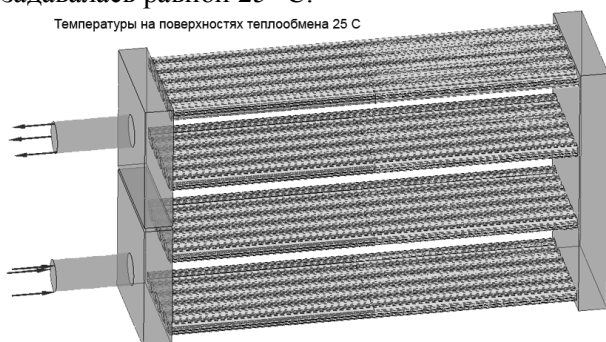


Рис. 6. Граничные условия

Как уже упоминалось выше, система охлаждения состоит из 4 групп, в каждой из которых 11 каналов. В табл. 1 представлены распределения расходов жидкости по каналам при суммарном расходе на входе 0.05 кг/с. На рис. 7 представлена схема обозначением позиции каналов.

Массовые расходы через каналы системы охлаждения

Расход (кг/с×10 <sup>3</sup> )	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4
Канал 1	2,131	2,447	2,449	2,587
Канал 2	2,187	2,149	2,096	2,391
Канал 3	2,249	2,343	2,222	2,311
Канал 4	2,306	2,237	2,097	2,323
Канал 5	2,294	2,364	2,160	2,237
Канал 6	2,387	2,321	2,090	2,267
Канал 7	2,262	2,359	2,144	2,226
Канал 8	2,239	2,238	2,087	2,301
Канал 9	2,206	2,337	2,215	2,283
Канал 10	2,212	2,150	2,108	2,363
Канал 11	2,167	2,464	2,481	2,552

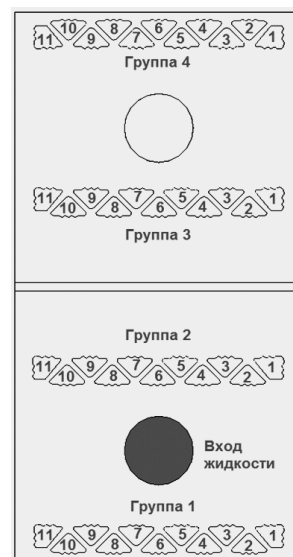


Рис. 7. Схема обозначением позиции каналов

На рис. 8 представлено распределение скорости движения жидкости в проточной части рассмотренной геометрии вдоль линий тока при расходе 0.05 кг/с.

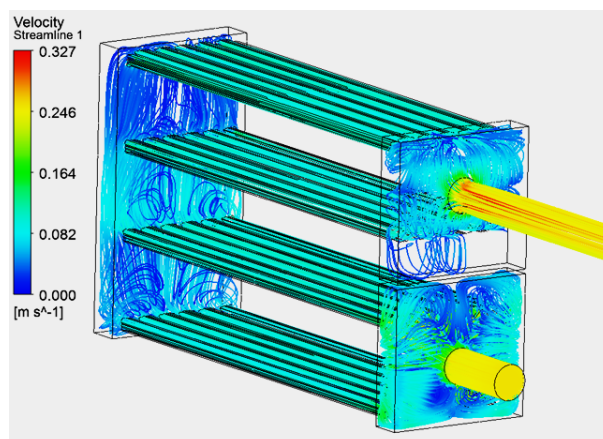


Рис. 8. Распределение скорости движения жидкости



Как можно наблюдать по рис. 8, в каналах при данном расходе жидкости устанавливается стабильный режим течения. Во входном коллекторе, ввиду особенностей геометрии, наблюдаются вихревые течения, которые оказывают влияние на течение жидкости при входе в каналы. В промежуточном коллекторе наблюдается незначительная зона вихрей на выходе из первой и второй группы каналов.

### Анализ Response Surface

Для определения зависимостей параметров ТЭМО был выполнен анализ элемента [2]. Геометрия исследуемого модуля имела конфигурацию, представленную на рис. 9. В составе элементов использовано 35 пар полупроводниковых элементов, соединённых между собой медными подложками. Сверху и снизу имеется керамическая подложка.

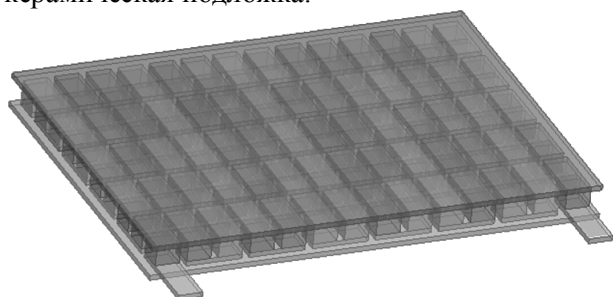


Рис. 9. Геометрия ТЭМО

На основе трёхмерной модели ТЭМО была сформирована сеточная модель на основе сеточных элементов SOLID226. В качестве граничных условий использовались следующее:

- сила тока, проложенная к одному из соединительных контактов;
- на противоположный контакт применялось условие нулевого потенциала;
- фиксированная температура горячей поверхности;
- фиксированная температура холодной поверхности.

При планировании эксперимента были заданы следующие диапазоны изменения параметров: сила тока (current) 3,5-10 А, температура горячей поверхности (Temperature\_Gor) 35-65°C, температура окружающей среды с холодной стороны (Temperature\_Hol), значения температуры выбирались таким образом, чтобы был рассмотрен диапазон значений разности температур ( $\Delta T$ ) в интервале от 10 до 40 °С.

По итогам расчётов определялось значение теплового потока с холодной стороны ( $Q_{hol}$ ) Вт.

Коэффициент детерминации данного параметра для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным  $R^2 = 0.99996$ , т.е. практически в 99,99 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

В табл. 2 приведены сводные результаты моделирования функционирования ТЭМО на режимах, реализованных в ходе физического эксперимента. Максимальная погрешность определения холодильной мощности составляет менее 0,05 % для точки № 6 плана эксперимента.

Таблица 2

Верификация математической модели по результатам физического эксперимента

№	Сила тока на блоках ТЭМО, А	Темп-ра холодной поверхности ТЭМО, °С	Темп-ра горячей поверхности ТЭМО, °С	$Q_x$ эксп, Вт	$Q_x$ теор, Вт
1	30.1	2.5799	46.1	216.29	216.23
2	31.3	0.39	45.72	203.38	203.35
3	20	9.2701	38.21	209.72	207.54
4	22.1	9.3401	39.33	267.17	267.26
5	18	13.300	38.55	227.46	227.36
6	22.8	7.670	41.1	209.26	209.16
7	16.4	12.610	36.2	197.44	197.42
8	27.5	12.400	44.71	429.85	429.85
9	36.5	11.150	56.17	443.92	443.86
10	28.9	15.940	52.7	397.81	397.92
11	32.7	12.150	51.09	462.00	461.86
12	33.4	12.690	55.3	405.22	405.20
13	16.2	25.090	41.4	392.98	392.90
14	28.7	23.570	53.56	586.58	586.68
15	15.6	25.520	40.31	402.63	402.57
16	26.1	14.790	46.78	397.06	396.99
17	17.2	27.470	44.08	437.64	437.74
18	26.1	26.660	50.29	646.66	646.62
19	36.1	25.760	61	754.46	754.57
20	20.6	32.410	48.66	613.19	613.14
21	33.2	30.100	62.96	732.13	732.28
22	35.5	25.840	59.51	769.44	769.47
23	28.2	30.060	56.43	686.45	686.36
24	25.7	36.409	53.37	834.05	834.10
25	23.3	34.260	49.31	764.78	764.90

Для формирования граничных теплообменных соотношений на стенках жидкостных каналов использовался специализированный

модуль для параметрических исследований и нелинейной оптимизации ANSYS DesignXplorer [3], интегрированный в инженерную платформу компьютерного анализа ANSYS Workbench. Для построения многомерной функции отклика использовался инструмент Response Surface модуля DesignXplorer.

При планировании эксперимента использовались следующие параметры:

- расход теплоносителя через систему охлаждения, м<sup>3</sup>/ч;
- сила тока на блоках ТЭМО, А;
- средняя температура рабочей жидкости, °С;
- температура холодной поверхности ТЭМО, °С;
- температура горячей поверхности ТЭМО, °С.

В качестве контролируемого параметра использовался коэффициент теплоотдачи (*alfa*), Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Был составлен план эксперимента с использованием процедуры Design of Experiments. Было использовано 6 параметров, из которых 5 отнесены к входным факторам, а 1 – зависимый параметр.

В качестве уравнения регрессии проверялось эффективность использования уравнения полного квадратичного полинома для нелинейных моделей с помощью инструмента Goodness of Fit (рис. 10).

	A	B
1	Name	P6 - Alfa
2	Goodness Of Fit	
3	Coefficient of Determination (Best Value = 1)	☆☆☆ 0,99996
4	Adjusted Coeff of Determination (Best Value = 1)	☆☆☆ 0,99991
5	Maximum Relative Residual (Best Value = 0%)	☆☆☆ 0,83789
6	Root Mean Square Error (Best Value = 0)	0,59455
7	Relative Root Mean Square Error (Best Value = 0%)	☆☆☆ 0,23814
8	Relative Maximum Absolute Error (Best Value = 0%)	☆☆☆ 1,986
9	Relative Average Absolute Error (Best Value = 0%)	☆☆☆ 0,40034

Рис. 10. Значения коэффициентов детерминации

Коэффициент детерминации данного параметра для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным, т.е. практически в 99,99 % случаев изменение критериев в функции отклика является случайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Были вычислены коэффициенты чувствительности при средних значениях параметров (рис. 11).

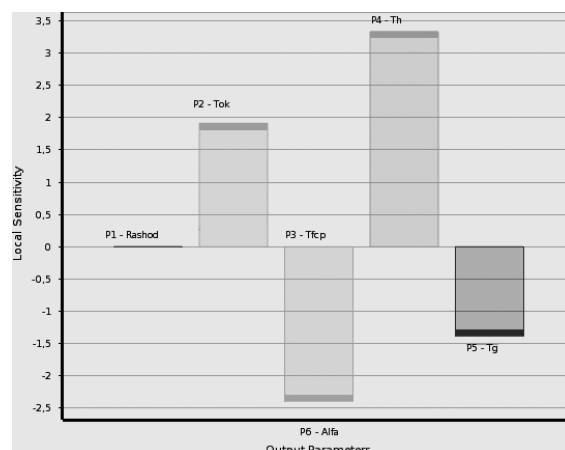


Рис. 11. Значения коэффициентов детерминации

Критерий *alfa* при средних значениях параметров чувствителен к изменению всех изменяемых параметров, за исключением расхода охлаждающей жидкости.

В табл. 3 приведен сравнительный анализ результатов определения коэффициента теплоотдачи, полученных на основе методики Response Surface [4], и экспериментальных данных. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи во всех точках не превышает 1.5 %. Аппроксимационная формула для определения коэффициента теплоотдачи со стороны жидкости имеет вид:

$$\alpha_{ж} = -25.981755 + 73,2158396 \cdot T_x - 22.644839 \times T_f + 2.61022986 \cdot T_f^2 + 1.28292285 \cdot T_f^2 - 4.1723389T_x \cdot T_f + 74.2391083 \cdot I - 25.621 \cdot T_g - 0.14647315 \cdot I^2 + 0.104869597T_g^2 + 2.34 \cdot I \cdot T_f + 1.76037 \cdot I \cdot T_x - 0.49132 \cdot I \cdot T_g + 0.56715222 \times T_f \cdot T_g - 0.96986872 \cdot T_x \cdot T_g + 0.015616455 \times I \cdot T_f \cdot T_x + 0.017657 \cdot I \cdot T_f \cdot T_g - 0.00252416 \times I \cdot T_x \cdot T_g + 0.005895081 \cdot T_x \cdot T_f \cdot T_g - 0.000297 \times I \cdot T_x \cdot T_f \cdot T_g$$

Здесь *I* - сила тока на всю установку, А; *T<sub>f</sub>*, *T<sub>x</sub>*, *T<sub>g</sub>* - средние температуры жидкости, холодной и горячей сторон ТЭМО на данном режиме.

Таблица 3  
Сравнительный анализ значений коэффициента теплоотдачи со стороны жидкости

№ точки	Коэф. теплоотдачи по результатам эксперимента, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Коэф. теплоотдачи по Response Surface, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
1	178.1525	179.3260
2	131.9882	131.6076
3	235.0633	236.0682
4	249.4634	248.5435
5	267.791	266.7569

Продолжение табл. 3

6	152.2172	150.2355
7	173.2731	174.8957
8	281.867	282.2270
9	252.4233	250.7333
10	283.488	283.6124
11	253.6872	254.1574
12	232.9627	234.2964
13	347.5518	347.3508
14	435.5429	434.7602
15	310.5985	309.8679
16	211.7792	212.3534
17	368.4691	368.5234
18	372.9465	373.9416
19	385.0645	385.9650
20	429.0968	430.7135
21	408.7966	408.9244
22	382.0154	381.6486
23	375.1342	373.5013
24	483.2941	483.8643
25	435.1458	433.9384

### Выводы

Проведена верификация математической модели гидродинамики каналов охлаждения ТЭМО, реализованной в среде ANSYS CFX, по величине гидравлических потерь. В результате расчетов получено, что при расходе теплоносителя, что соответствует примерно  $0.1775 \text{ м}^3/\text{час}$ , гидравлические потери составляют примерно 110 Па. Данное значение превышает любое значение потерь давления для любой точки из плана эксперимента, т.к. значение расхода  $0.1775 \text{ м}^3/\text{час}$  почти вдвое превышает максимальное значение расхода, реализованное при физическом эксперименте. Поэтому применяемыми средствами измерения данные потери не могут быть определены. Но это и не является необходимостью, т.к. столь незначительное изменение давления по длине охлаждающих каналов ТЭМО не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на параметры рабочего процесса.

Проведена верификация математической модели термоэлектрического анализа ТЭМО, выполненной с использованием инструментария ANSYS Thermal Electric. С помощью технологии Response Surface построена зависимость холодильной мощности от силы тока и температур холодной и горячей поверхностей.

Определены температуры холодной стенки ТЭМО, при которых погрешность расчета  $Q_x$  в сравнении с экспериментальными значениями не превышает 0,05 %.

С использованием ANSYS CFX проведена серия расчетов гидродинамики и теплообмена в каналах жидкого теплоносителя с целью верификации по величине холодильной мощности. Однако, из 25 точек плана эксперимента, только в 6 точках получено удовлетворительное совпадение с экспериментом по величине  $Q_x$ . Данный вывод обусловил необходимость идентификации теплообменных соотношений на основании результатов физического эксперимента.

На основе обработки экспериментальных данных получены значения коэффициента теплоотдачи во всех 25 точках плана физического эксперимента, которые обеспечивают приемлемую точность определения основных параметров функционирования ТЭМО. На основе технологии Response Surface модуля ANSYS DesignXplore установлено, что коэффициент теплоотдачи от жидкости в стенку зависит от 4 параметров:  $I$  - силы тока,  $T_f, T_x, T_g$  средних температур жидкости, холодной и горячей сторон ТЭМО на данном режиме. Получена зависимость  $\alpha_{ж}(T_f, T_x, T_g)$ , которая обеспечивает точность не менее 1.5 % по определению коэффициента теплоотдачи от жидкости на холодной стороне ТЭМО.

### Литература

1. Seebeck phenomenon, calculation method comparison / Kamil Lubikowski, Stanisław Radkowskia, Krzysztof Szczurowskia, Michał Wikarya // Journal of Power Technologies 95 (Polish Energy Mix). 2015. P. 63–67.
2. Electro-thermal analysis of peltier cooling using FEM / D. Enescu, E.O. Virjoghe, M. Ionel, M.F. Stan // Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – Year 10. №. 1 (12).
3. Development of an experimental and analytical model of an active cooling method for high-power three-dimensional integrated circuit (3d-ic) utilizing multidimensional configured thermoelectric modules, HUY NGOC PHAN, PhD Thesis, the university of Texas at Arlington, 2011.
4. Modelling and simulation of a thermoelectric structure with pellets of non-standard geometry and materials, International Journal of Refrigeration (2013) [Electronic resources] / F.X. Villasevil et al. // <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.014>.

## Информация об авторах

**Кретинин Александр Валентинович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: avk-vrn@mail.ru

**Галдин Дмитрий Николаевич** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dmgaldin@yandex.ru

**Спицына Екатерина Евгеньевна** – специалист, АО "Турбонасос" (394052, Россия, г. Воронеж, ул. Острогжская, 107), e-mail: kylikovna@mail.ru

**Попков Александр Николаевич** – врио начальника курса, 3 авиационный факультет (факультет бомбардировочной и штурмовой авиации), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова (397171, Россия, г. Борисоглебск, ул. Чкалова, д. 18А), e-mail: popkov.grop@yandex.ru

## NUMERICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN LIQUID CHANNELS OF THERMOELECTRIC COOLING UNIT

A.V. Kretinin<sup>1</sup>, D.N. Galdin<sup>1</sup>, E.E. Spitsyna<sup>2</sup>, A.N. Popkov<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>JSC "Turbonasos", Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots, Borisoglebsk, Russia

**Abstract:** to simulate the heat and mass transfer in the liquid channels of the thermoelectric cooling unit, a grid model of the flow section was generated using the ANSYS Meshing module. The mathematical model of computer dynamics of a liquid was synthesized with the connected energy equation in the module ANSYS CFX. The grid model of the thermoelectric module was constructed in the ANSYS ThermalElectric module. Models of the Response Surface type of thermoelectric analysis for thermoelectric modules and heat and mass transfer for liquid channels of the cooling unit were constructed. The results of the simulation showed that, firstly, a significant part of the liquid channels operates in the field of non-stabilized fluid flow both at the inlet and outlet. Secondly, the developed (uneven) heat exchange surface from the side of the liquid leaves open the question of the prevailing mechanism (molar or molecular) heat transfer from the coolant to the thermoelectric cooling unit's wall. Thirdly, the transfer of heat was carried out into a thermoelectric material at different values of the electrical energy supplied to the thermoelectric power. In this case, heat is transferred from cold to hot junction, i.e. the thermoelectric mechanism of heat transfer is involved at essential influence of the thermal processes passing according to laws of Fourier and Joule. The conducted experimental studies showed a significant influence of thermoelectric nature of heat absorption on the cold junction on the intensity of heat exchange between the coolant and thermoelectric cooling unit's wall. The identified dependence of the law of heat exchange on the wall of the liquid-bone channel bordering the thermoelectric module was obtained

**Key words:** numerical simulation, heat transfer, thermoelectric element

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the Federal Target Program (Agreement No. 14.577.21.0202, unique identifier RFMEFI57715X0202)

### References

1. Lubikowski K., Radkowskia S., Szczurowskia K., Wikarya M. "Seebeck phenomenon, calculation method comparison", *Journal of Power Technologies* 95 (Polish Energy Mix), 2015, pp. 63–67.
2. Enescu D., Vîrjoghe E.O., Ionel M., Stan M.F. "Electro-thermal analysis of peltier cooling using FEM", *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*, 2010, no. 1 (12).
3. Huy Ngoc Phan "Development of an experimental and analytical model of an active cooling method for high-power three-dimensional integrated circuit (3d-ic) utilizing multidimensional configured thermoelectric modules", PhD Thesis, the University of Texas at Arlington, 2011.
4. Villasevil F.X. "Modelling and simulation of a thermoelectric structure with pellets of non-standard geometry and materials", *International Journal of Refrigeration*, 2013, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.02.014>.

Submitted 01.05.2018; revised 01.05.2018

### Information about the authors

**Aleksandr V. Kretinin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: avk-vrn@mail.ru

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

**Ekaterina E. Spitsyna**, Specialist of JSC "Turbonasos" (107 Ostrogzhskaya st., Voronezh 394052, Russia), e-mail: kylikovna@mail.ru

**Aleksandr N. Popkov**, Acting Head of the Course of Krasnodar Higher Military Aviation School for Pilots (18A Chkalova st., Borisoglebsk 397171, Russia), e-mail: popkov.grop@yandex.ru



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ ПОДХОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗОВОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ

© 2018 К.В. Кружаев<sup>1</sup>, Д.П. Шматов<sup>1</sup>, К.В. Зубарев<sup>1</sup>, И.Г. Перевезенцев<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ООО НПП «ИнтерПолярис», г. Нововоронеж, Россия

**Аннотация:** выделены наиболее важные задачи в области создания современного газового термоэлектрического генераторного модуля, который в составе автономного источника тока предназначен для преобразования тепловой энергии, выделяемой при сжигании природного газа, в электрическую энергию. Рассмотрены некоторые физические процессы, протекающие в вертикальном термосифоне применительно к системе охлаждения термоэлектрического генераторного модуля. По результатам моделирования с использованием инструментария ANSYS Fluent, в котором рассчитывались и анализировались распределения температур, скоростей жидкой и паровой фаз, распределение объемных долей фаз, давления, определены оптимизационные подходы при проектировании системы охлаждения газового термоэлектрического генераторного модуля в среде ANSYS Fluent. Сформулированные оптимизационные подходы позволяют определить коэффициент детерминации для функции ошибки расчета, тем самым можно утверждать, что изменение температуры внутренней теплоподводящей поверхности определяется изменением рассматриваемых переменных, также граф анализа чувствительности показывает, что на величину ошибки расчета влияют все факторы, причем наибольшее влияние оказывают величина тепловой нагрузки и вид охлаждающей жидкости. В результате в общем виде сформированы требования к системе охлаждения, концептуальный облик и схема системы охлаждения на основе термосифона и определены направления дальнейших исследований

**Ключевые слова:** оптимизационные подходы, термоэлектрический генераторный модуль, термосифон, ANSYS

**Благодарности:** 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)

### Введение

Термоэлектрический генераторный модуль (ТЭГМ), в составе термоэлектрического автономного источника тока, предназначен для преобразования тепловой энергии, выделяемой при сжигании природного газа, в электрическую энергию. Цель данного преобразования энергии – автономное энергообеспечение 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. Преобразование тепловой энергии, выделяемой при сжигании природного газа, в электрическую энергию происходит в термоэлектрической батарее, к которой постоянно подводится тепло, которое необходимо отводить [1].

В процессе разработки ТЭГМ возникает необходимость снятия низкопотенциального тепла (когда градиент температур охлаждаемых

сред составляет лишь несколько десятков градусов и меньше), применение конвективного теплообмена через разделяющую поверхность (кожухотрубчатые, пластинчатые теплообменники, аппараты воздушного охлаждения) является нецелесообразным, в связи с необходимостью значительного увеличения поверхности теплообмена и соответственно металлоемкости аппарата [2]. При низких температурных напорах целесообразно использовать тепловые трубы и термосифоны [3].

Таким образом, можно выделить наиболее важные задачи в области создания современного газового ТЭГМ: необходимость разработки нового высокоэффективного теплообменного оборудования для снятия низкопотенциального тепла на основе термосифонов и тепловых труб, утилизация энергии выходящих с установок потоков, снижение металлоемкости и повышение надежности аппаратуры, а также ее ремонтпригодности.



Система охлаждения ТЭГМ на основе термосифона должна обеспечивать постоянную величину температуры на поверхности термоэлектрической батареи приблизительно 70 °С. Термосифон является на данный момент одной из наиболее эффективных систем для передачи тепловой энергии. Основным её преимуществом является тот факт, что большое количество тепла может быть транспортировано на значительное расстояние через небольшую площадь поперечного сечения без дополнительного привлечения мощности в систему [4].

### Синтез расчетной модели в ANSYS Fluent

Для расчета термосифонов в качестве исходных данных задаются греющий и нагреваемый поток, их физические и теплотехнические характеристики, температуры теплоносителей на входе и выходе из аппарата, их расходы, а также форма течения теплоносителей.

При расчете термосифона обычно принимаются следующие допущения [5]:

- 1) процесс парообразования происходит при испарении конденсата;
- 2) температура пара одинакова во всех зонах термосифона;
- 3) в зоне конденсации происходит процесс пленочной конденсации по Нуссельту;
- 4) влияние парового потока на движение конденсата по стенке термосифона отсутствует;
- 5) режим течения пленки конденсата ламинарный;
- 6) термосифон располагается вертикально.

Рассмотрим некоторые физические процессы, протекающие в вертикальном термосифоне применительно к системе охлаждения термосифона (рис. 1).

Участок нагрева (испарения) должен быть заполнен рабочей жидкостью [6].

Следует отметить, что на участке охлаждения теплообмен с окружающей средой происходит за счет естественной конвекции.

Для обоснования выбранной конструкции системы охлаждения на основе термосифона была составлена упрощенная математическая модель и проведен многофакторный вычислительный эксперимент с целью подтверждения возможности использования термосифона для переноса необходимого количества тепла от системы нагрева ТЭГМ. Одновременно исследовалось влияние ряда

конструктивно-технологических факторов, которые можно использовать для последующих разработок системы охлаждения ТЭГМ, таких как:

- ширина канала на участке испарения (внутренний диаметр канала участка испарения и его высота предварительно рассчитываются на основе расчета ТЭГМ);
- степень заполнения термосифона рабочей жидкостью;
- величина подводимого теплового потока (тепловая нагрузка);
- температура окружающей среды;
- форма теплоподводящей поверхности со стороны жидкости (гладкая, рифленая и т.д.);
- вид рабочей жидкости.

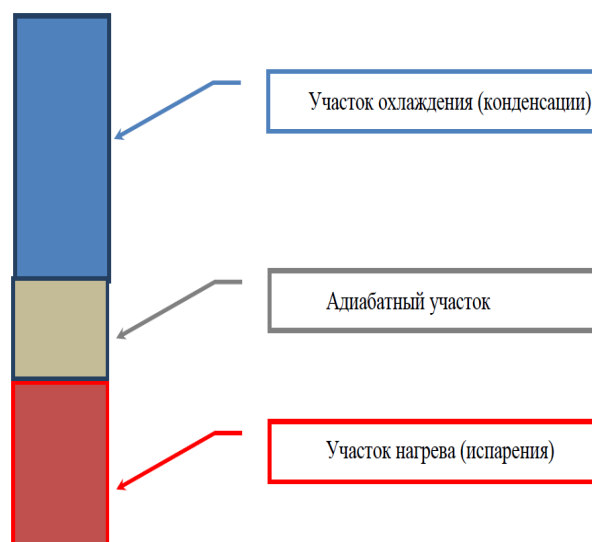


Рис. 1. Концептуальная схема системы охлаждения на основе термосифона

В результате моделирования с использованием инструментария ANSYS Fluent рассчитывались и анализировались распределения температур, скоростей жидкой и паровой фаз, распределение объемных долей фаз, давления и пр. [7]. Критерием оптимизации принималась температура внутренней теплоподводящей поверхности [8], которая для заданной тепловой нагрузки должна принимать минимальное значение или, по крайней мере, не выше заданного значения.

Учитывалось также и то, что наиболее неблагоприятное с точки зрения функционирования системы охлаждения значение температуры плюс 40 °С. Различная форма теплоподводящей поверхности

моделировалась заданием величины абсолютной шероховатости (высота выступа). Самым проблематичным является включение в состав факторов вида рабочей жидкости, т.е. невещественного фактора, который может принимать ряд номинальных значений (вода, этанол, метанол и пр.). Чтобы в дальнейшем иметь возможность оперировать и этим фактором была предпринята попытка заменить невещественный фактор (вид рабочей жидкости) вещественным, в качестве которого было решено использовать температуру парообразования (Saturation Temperature) при нормальном атмосферном давлении. При этом по заданному значению температуры парообразования из плана эксперимента выбирается наиболее подходящая рабочая жидкость из заданного набора, и уже в модели задается соответствующая зависимость Saturation Temperature от давления. С учетом вышесказанного для дальнейшего анализа и проведения вычислительного эксперимента принимались пять факторов в следующих диапазонах их изменения:

$p_1$  - ширина канала испарения 40 мм  $< K < 100$  мм (внутренний диаметр нагреваемой поверхности назначался равным 78 мм, а высота данной поверхности 560 мм);

$p_2$  - степень заполнения термосифона жидкостью 20 %  $< Z < 70$  %;

$p_3$  - величина подводимого теплового потока  $q_p = 10 \div 30$  кВт/м<sup>2</sup>.

$p_4$  - величина абсолютной шероховатости внутренней теплоподводящей поверхности (Roughness Height) 0 мм  $< H < 5$  мм.

$p_5$  - Saturation Temperature при нормальном атмосферном давлении  $T_s = 330 \div 373$  К.

При проведении многофакторного эксперимента применялся инструментарий ANSYS DesignXplorer, а именно технология Response Surface Optimization. План эксперимента для 5 входных варьируемых переменных (параметров) составлялся на основе алгоритма Optimal Space-Filling Design (OSF). План OSF предполагает генерацию максимально удаленных друг от друга точек во всей области факторного пространства. Таким образом, достигается наиболее равномерное распределение точек плана в рассматриваемом гиперкубе факторного пространства. Для пяти независимых факторов план OSF имеет 27 точек.

Математическая модель и вычислительный эксперимент были

реализованы средствами ANSYS Fluent, интегрированными в платформу ANSYS Workbench [7]. Геометрическая модель была построена в модуле ANSYS Design Modeler и представляет собой упрощенную модель термосифона (рис. 2).

При настройке проекта в установках решения General используется нестационарная постановка, подключается сила тяжести. В установках Models включается уравнение энергии и используется RNG k-ε модель турбулентности с масштабируемыми стандартными пристеночными функциями (рис. 3). В качестве модели многофазной среды используется модель Mixture (рис. 4).

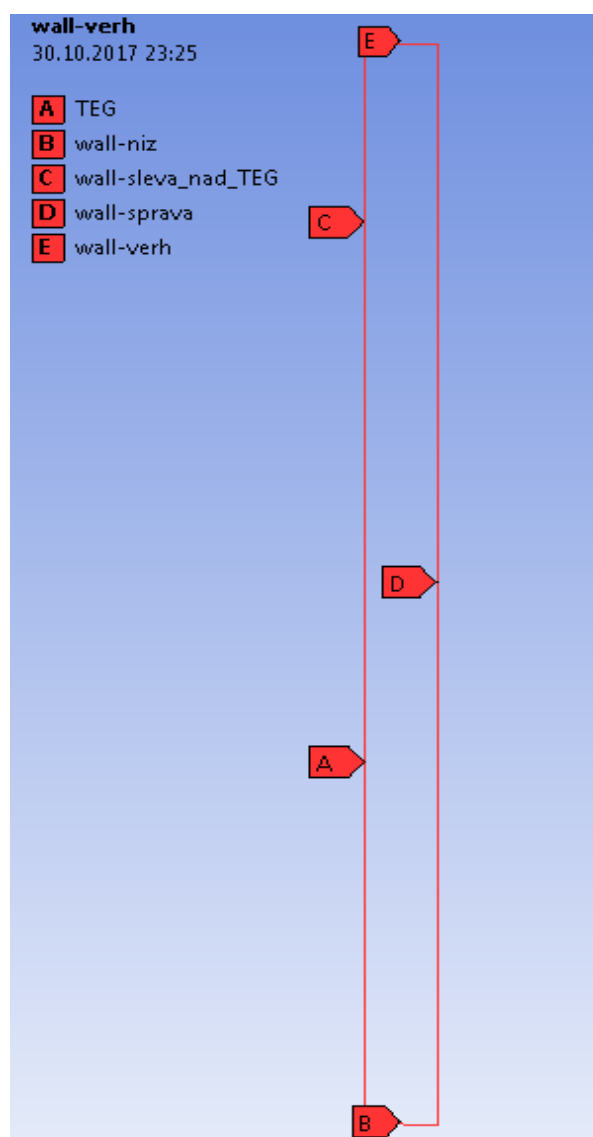


Рис. 2. Исследуемая модель и граничные поверхности

В качестве базовой рабочей жидкости из базы данных Fluent выбираются жидкий и газообразный метанол и задаются их свойства.

Необходимо отметить, что для корректного моделирования необходимо задавать температурные зависимости для плотности и теплоемкости жидкого метанола, а для газообразного метанола возможно использование модели идеального газа. Это позволяет при отсутствии теплового баланса подвода-отвода тепла от рабочей жидкости в термосифоне автоматически переходить на новый уровень давления и, следовательно, новый уровень температур парообразования.

Важным параметром является теплота образования парообразного метанола. Это значение задается с учетом заданного значения Standard State Enthalpy для жидкого метанола, чтобы разность данных двух значений равнялась скрытой теплоте парообразования метанола. Причем здесь необходимо справочное значение Latent Heat, доступное, как правило, в кДж/кг, умножить на молекулярный вес вещества (для метанола на 32,04) и в таблицу свойств вносить уже полученное значение Standard State Enthalpy.

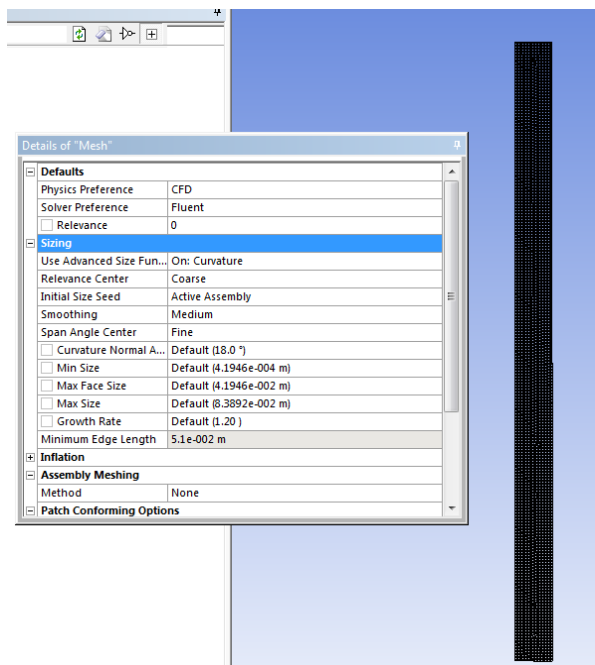


Рис. 3. Параметры расчетной сетки

В настройках Phases в качестве приоритетной фазы выбирается жидкая фаза. В настройках для второй фазы (газообразного метанола) включается опция теплообмена

между газовой и жидкой фазами через поверхность раздела фаз и включаются модели, представленные на рис. 5.

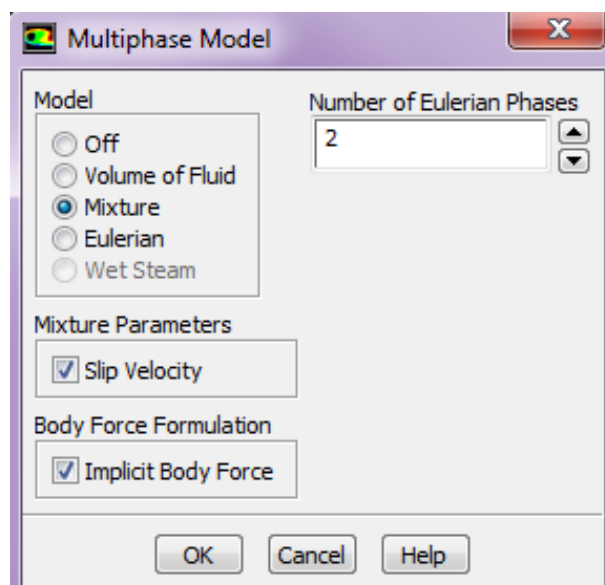


Рис. 4. Установки многофазной модели

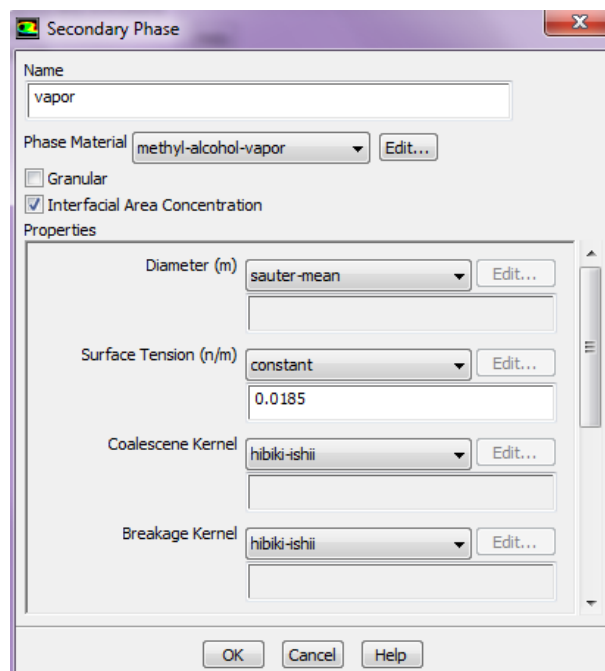


Рис. 5. Настройки второй фазы

В настройках взаимодействия фаз Phase Interaction включаются следующие модели (рис. 6):

- Drag - schiller-naumann;
- Slip - manninen et al;
- Mass - модель испарения-конденсации (evaporation-condensation) с зависимостью

температуры парообразования Saturation Temperature от давления;

- Surface Tension - задается температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения.

При постановке граничных условий на стенке ТЭГМ (рис. 2) задается значение теплового потока (рис. 7).

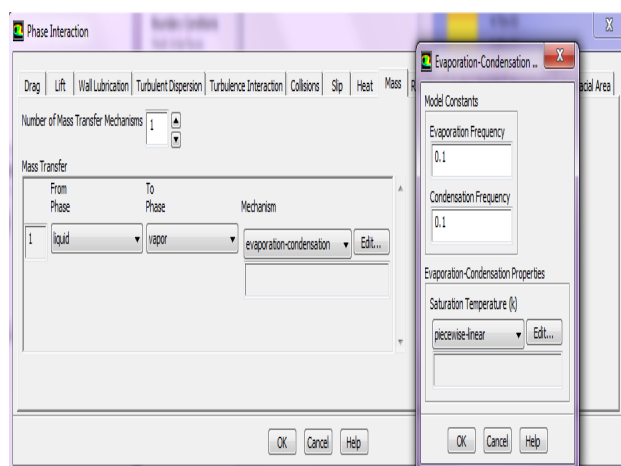


Рис. 6. Настройка панели Phase Interaction

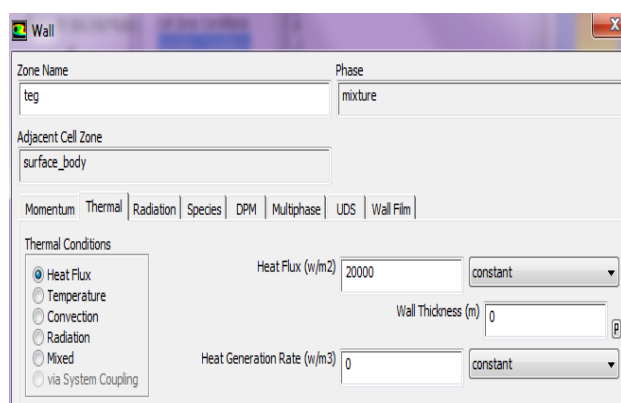


Рис. 7. Постановка граничных условий для теплоподводящей поверхности

На всех других стенках задаются граничные условия третьего рода (коэффициент теплоотдачи и температура). Причем, на стенках трубки линии конденсации коэффициент теплоотдачи необходимо вычислить по формуле:

$$\alpha = \frac{q_{teg}}{(T_c - T_\infty)} \cdot \frac{S_e}{S_c},$$

где  $q_{teg}$  - подводимый к рабочей жидкости тепловой поток;

$T_c$  - температура конденсации;  
 $T_\infty$  - температура окружающей среды;  
 $S_e/S_c$  - отношение площадей поверхностей испарения и конденсации.

Моделирование процессов тепломассопереноса во внутреннем объеме термосифона осуществляется в нестационарной постановке, поэтому представляет интерес динамика изменения ключевых параметров во времени. На рис. 8 приведено распределение объемной доли паровой фазы в различные моменты времени.

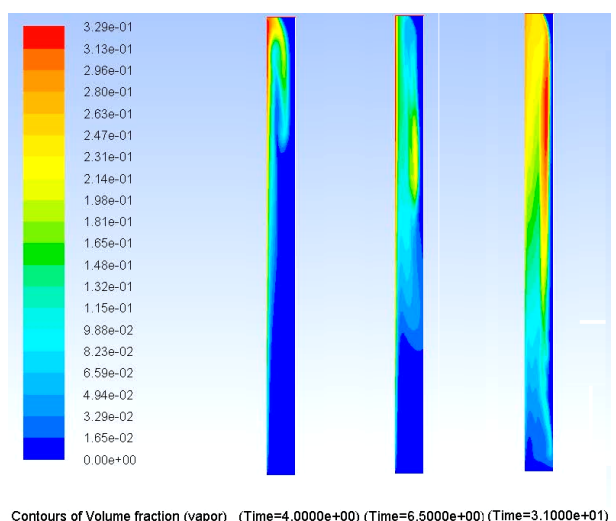


Рис. 8. Распределение объемной доли паровой фазы в различные моменты времени

Моделирование осуществляется до наступления теплового баланса, т.е. установления таких температур граничных поверхностей, при которых количество тепла, подводимое к системе через теплоподводящую поверхность, равняется количеству тепла, сбрасываемому в атмосферу через поверхности конденсации.

### Оптимизация с использованием поверхностей отклика

Поверхность отклика формировалась согласно алгоритму Kriging. На рис. 9, 10, 11 приведены некоторые результаты по построению Response Surface.

Среди основных результатов, представленных на рис. 9, 10, 11 можно отметить следующее:

- коэффициент детерминации для функции ошибки расчета (критерий P18-Tv) достиг значения 1, поэтому изменение температуры

внутренней теплоподводящей поверхности определяется изменением рассматриваемых варьируемых переменных (факторов);

- граф анализа чувствительности показывает, что на значение ошибки расчета влияют все факторы, причем максимальное влияние оказывают величина тепловой нагрузки и вид охлаждающей жидкости.

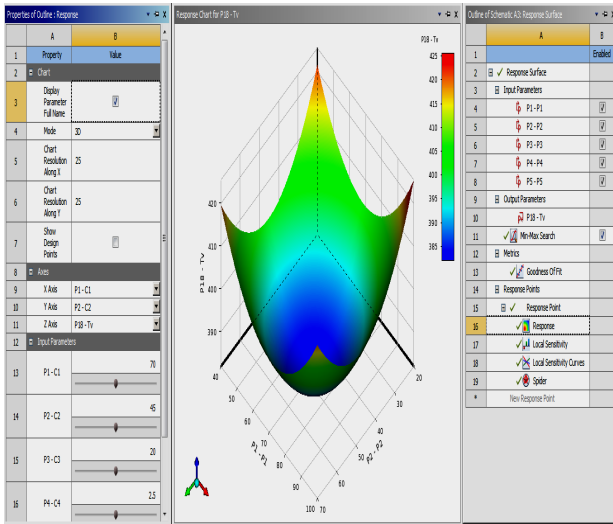


Рис. 9. Поверхность отклика в зависимости от факторов P1 и P2

Table of Outline A13: Goodness Of Fit		
	A	B
1	Name	P18 - Tv
2	Goodness Of Fit	
3	Coefficient of Determination (Best Value = 1)	★★★★ 1
4	Maximum Relative Residual (Best Value = 0%)	★★★★ 0
5	Root Mean Square Error (Best Value = 0)	7.5273E-08
6	Relative Root Mean Square Error (Best Value = 0%)	★★★★ 0
7	Relative Maximum Absolute Error (Best Value = 0%)	★★★★ 0
8	Relative Average Absolute Error (Best Value = 0%)	★★★★ 0

Рис. 10. Показатели качества поверхности отклика

Для нелинейной оптимизации применялся многокритериальный генетический алгоритм оптимизации MOGA. Настройки алгоритма приведены на рис. 12. Там же показана история оптимизационного поиска.

Определено множество точек-кандидатов варьируемых параметров модели и соответствующих значений критерия

моделирования, полученное по результатам многокритериальной оптимизации. Данные точки-кандидаты могут быть использованы для формирования эскизного проекта предварительного «базового» варианта системы охлаждения на основе термосифона газового ТЭГМ. Более точные значения конструктивно-технологических параметров термосифона будут определяться в результате последующего комплексного расчетно-экспериментального исследования.

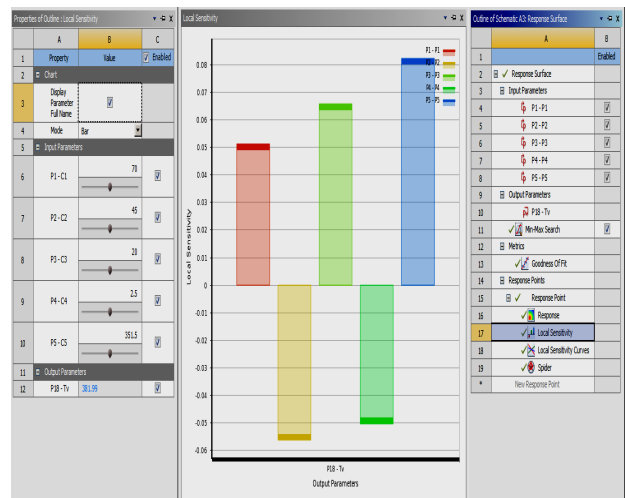


Рис. 11. Анализ чувствительности целевой функции к изменению факторов

Properties of Outline: Method		Outline of Schematic A4: Optimization	
A	B	A	B
1	Property	Value	Enabled
2	Design Points		
3	Preserve Design Points After DX Run		
4	Failed Design Points Management		
5	Number of Retries	0	
6	Optimization		
7	Method Name	MOGA	
8	Verify Candidate Points		
9	Number of Initial Samples	100	
10	Number of Samples Per Iteration	100	
11	Maximum Allowable Pareto Percentage	70	
12	Convergence Stability Percentage	2	
13	Maximum Number of Iterations	20	
14	Maximum Number of Candidates	10	
15	Optimization Status		
16	Converged	Yes	
17	Pareto Percentage	1	
18	Stability Percentage	1.4108	
19	Number of Iterations	11	
20	Number of Evaluations	1053	
21	Number of Failures	0	
22	Size of Generated Sample Set	100	
23	Number of Candidates	10	

Рис. 12. Настройки алгоритма оптимизации

## Выводы

По результатам определения оптимизационных подходов при проектировании системы транспортирования тепла газового ТЭГМ можно отметить следующее:



- изменение температуры внутренней теплоподводящей поверхности определяется изменением рассматриваемых варьируемых переменных, так как коэффициент детерминации для функции ошибки расчета достиг значения 1;

- граф анализа чувствительности показывает, что на величину ошибки расчета влияют все факторы, причем наибольшее влияние оказывают величина тепловой нагрузки и вид охлаждающей жидкости.

Рассматриваемая система охлаждения газового ТЭГМ при проведении дальнейших исследований будет испытана и рассчитана на выполнение условия баланса тепловых потоков при оптимальном температурном режиме. В случае, если потребуется увеличение эффективности, можно рассматривать следующие направления для дальнейшей проработки:

- введение в систему конусного участка между испарительной и конденсационной секцией;

- использование паровых структур;

- использование гидрофобных покрытий на стенках конденсационной секции для интенсификации процессов возврата жидкости в испарительную секцию;

- использование различных технических решений с целью увеличения воздушного потока для охлаждения конденсационной секции;

- в зоне конденсации термосифона использование оребренных труб, т.е. труб, имеющих кольцевые, винтовые, продольные или другие виды ребер;

- использование наклонного пучка труб в секции конденсации.

#### Литература

1. Тимошинова Т.С., Свиридов И.Э., Шматов Д.П. Определение оптимизационных подходов при проектировании горелочного устройства автономного источника тока на основе термоэлектрического генераторного модуля кольцевой геометрии // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 52-57.

2. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонах. Теория и практика. Киев: Факт, 2005. 704 с.

3. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.

4. Термосифоны и тепловые трубы. Различия, особенности и способы применения / Е.С. Швинденкова, О.А. Меньшикова, Н.С. Филиппов, Б.М. Хасанов // Теория. Практика. Инновации. 2017.

5. Бакиев Т.А. Разработка теплообменных агрегатов на базе термосифонов для производств нефтепереработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.09. Уфа: УГНТУ, 2003.

6. Пиоро И.П., Антоненко В.А., Пиоро П.С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. Киев: Полиграфкнига, 1991. 245 с.

7. Fluent 6.1 Tutorial Guide [электронный ресурс <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/pdf/tg/fl61tg.pdf>].

8. Чепелев С.А., Скоморохов Г.И. Коммерческий учёт энергоносителей, параметр оптимизации технологического процесса // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. 1999. С. 194-197.

Поступила 06.04.2018; принята к публикации 16.05.2018

#### Информация об авторах

**Кружаев Константин Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Шматов Дмитрий Павлович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Зубарев Константин Вячеславович** – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Перевезенцев Игорь Геннадьевич** – директор, ООО НПП «ИнтерПолярис» (396073, Россия, г. Нововоронеж, Парковый проезд, 6), e-mail: director@interpolyaris.ru

#### DETERMINATION OF OPTIMIZATION APPROACHES IN THE DESIGNING OF THE COOLING SYSTEM OF THE GAS THERMOELECTRIC GENERATOR MODULE

K.V. Kruzhayev<sup>1</sup>, D.P. Shmatov<sup>1</sup>, K.V. Zubarev<sup>1</sup>, I.G. Perevezentsev<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Limited Liability Company «InterPolyaris», Novoronezh, Russia

**Abstract:** this article highlights the most important tasks in the field of creating a modern gas thermoelectric generator module, which, as part of an autonomous thermoelectric power source, is designed to convert the heat energy released from the combustion of natural gas into electrical energy. Some physical processes occurring in a vertical thermosiphon with respect to the thermosiphon cooling system are considered. Based on the simulation results, using ANSYS Fluent instrumentation, in which temperature distributions, liquid and vapor phase distributions, the distribution of volumetric fractions of phases and pressures were calculated and analyzed, optimization approaches were determined for the design of the cooling system for the gas thermoelectric generator module in the ANSYS Fluent environment. The formulated optimization approaches make it possible to find the determination coefficient for the calculation error function, thereby confirming that the change in the temperature of the internal heat-conducting surface is determined by changing of the variables under consideration, as well as the sensitivity analysis graph showing that the magnitude of the calculation error is influenced by all factors, and the type of coolant. As a result, the requirements for the cooling system, the conceptual design and the scheme of the cooling system based on thermosiphon are formed and directions for further research are also determined

**Key words:** optimization approaches, thermoelectric generator module, thermosiphon, ANSYS

**Acknowledgements:** the work was financially supported by the Ministry of education and science of the Russian Federation within the framework of the Government of the Russian Federation dated April 9, 2010 no. 218 (Contract number 03.G25.31.0246)

### References

1. Timoshinova T.S., Sviridov I.E., Shmatov D.P. "Determination of optimization approaches for designing a burner device of an autonomous current source based on a thermoelectric generator module of circular geometry", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 52-57.
2. Bezrodny M.K., Piro I.L., Kostiuk T.O. "Transfer processes in biphasic thermosiphons. Theory and practice" ("Protsessy perenosy v dvukhfaznykh termosifonakh. Teoriya i praktika"), Kiev, Fakt, 2005, 704 p.
3. Chi C. "Heat pipes: theory and practice" ("Teplovy truby: teoriya i praktika"), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 207 p.
4. Shvindenkova E.S., Men'shikova O.A., Filippov N.S., Khasanov B.M. "Thermosiphons and heat pipes. Differences, features and methods of application", *International Scientific and Technical Journal "Theory. Practice. Innovation" (Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal «Teoriya. Praktika. Innovatsii»)*, 2017.
5. Bakiev T.A. "Development of heat-exchange units on the basis of thermosiphons for oil refining industries" ("Razrabotka teploobmennyykh agregatov na baze termosifonov dlya proizvodstv neftepererabotki"), The dissertation author's abstract on the competition of a scientific degree of Doctor of Technical Sciences on specialty 05.04.09., Ufa, USSTU, 2003.
6. Piro I.P., Antonenko V.A., Piro P.S. "Effective heat exchangers with two-phase thermosiphons" ("Effektivnye teploobmenniki s dvukhfaznymi termosifonami"), Kiev, Poligrafkniga, 1991, 245 p.
7. "Fluent 6.1 Tutorial Guide", available at: <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/pdf/tg/fl61tg.pdf>.
8. Chepelev S.A., Skomorokhov G.I. "Commercial accounting of energy carriers, process optimization parameter", *Mathematical modeling, computer optimization of technologies, equipment parameters and forest management systems. Interuniversity collection of scientific works (Matematicheskoe modelirovanie, komp'yuternaya optimizatsiya tekhnologiy, parametrov oborudovaniya i sistem upravleniya lesnogo kompleksa. Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov)*, 1999, pp. 194-197.

Submitted 06.04.2018; revised 16.05.2018

### Information about the authors

**Konstantin V. Kruzhaev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Dmitriy P. Shmatov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Konstantin V. Zubarev**, Seeker, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: rd-vgtu@mail.ru

**Igor' G. Perevezentsev**, Director, Limited Liability Company «InterPolyaris» (6 Parkoviy proezd, Novovoronezh 396073, Russia), e-mail: director@interpolyaris.ru

## Радиотехника и связь

УДК 621.396

### ЭФФЕКТИВНАЯ АРХИТЕКТУРА НА ОСНОВЕ ПЛИС ДЛЯ ПОЛНОСТЬЮ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СТОХАСТИЧЕСКОГО LDPC-ДЕКОДЕРА

© 2018 А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Д.С. Андреева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** стохастическое декодирование - новый альтернативный метод низкой сложности расшифровки кодов с исправлением ошибок. Представлен вариант аппаратной архитектуры для стохастического декодирования низкоплотностных кодов. Данная архитектура позволяет производить полностью параллельное декодирование с помощью новейших технологий при работе с алгоритмами с малой плотностью проверок на чётность (LDPC), со специализированной возможностью реализации такого декодера на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Архитектура параллельного стохастического декодера в данной работе реализуется на ПЛИС Xilinx Virtex 4 (XC4VLX200) с пропускной способностью 706 Мбит/с, при скорости битовой ошибки около  $10^{-6}$ , с потерей производительности около 0,1 дБ. Представлен обзор стохастических вычислений и метода стохастического декодирования. Описаны проблемы аппаратной реализации и архитектура стохастических декодеров. Приведены результаты синтеза и декодирования для (1024,512) LDPC-кодов с малой плотностью проверок на чётность декодера. Показано, что архитектурные особенности, имеющиеся во многих программируемых логических интегральных схемах, могут быть использованы для зонально-эффективной реализации стохастических декодеров LDPC

**Ключевые слова:** итерационное декодирование, коды с низкой плотностью проверок на чётность, стохастическое декодирование, ПЛИС, внешняя память

#### Введение

Коды с низкой плотностью проверок на чётность (LDPC) представляют собой класс линейных блочных кодов, который включает в себя некоторые из самых мощных кодов коррекции ошибок с производительностью, близкой к пределу Шеннона. Эти коды рассматриваются в данной статье применительно к следующим стандартам связи: спутниковое телевидение и связь, IEEE 802.16 (Wireless MAN). LDPC-коды итеративно декодируются с использованием алгоритма распространения доверия. Алгоритм распространения доверия декодирует сообщения, проходящие по ребрам двудольного факторного графа. Узлы в факторном графе разделены на две различные группы, а именно, переменные узлы и узлы проверки чётности.

Сложность декодирования LDPC-кодов, побудило исследователей использовать максимально возможное количество параллелизма в LDPC-декодерах для повышения пропускной способности и производительности. Однако из-за проблемы перегрузки маршрутизации и межсоединения (в основном связанной с перемежением в

декодере с малой плотностью проверок на чётность) реализация полностью параллельных декодеров с малой плотностью проверок на чётность по-прежнему является сложной задачей для кодов большой длины. Маршрутизация для перемежения кода LDPC может занимать большую часть архитектуры декодера. Поэтому методы, которые облегчают проблему маршрутизации и/или уменьшают сложность узлов, являются предпочтительными при построении LDPC-декодеров. Известный алгоритм min-sum является приближенной вариацией алгоритма распространения доверия, который предлагает менее сложные узлы, но связан с потерей декодирования около 0,5-1 дБ. Реализовать такой декодер можно как с использованием ПЛИС, так и на базе специализированной интегральной схемы (ASIC). Реализация на основе ПЛИС позволяет создать один из самых «быстрых» декодеров на основе полностью параллельного кода с малой плотностью проверок на чётность. Этот декодер занимает около 84% ПЛИС Altera Stratix EP1S80 с пропускной способностью 650 Мбит/с с максимальной тактовой частотой 61 МГц.

Стохастическое декодирование - это относительно новый подход к декодированию

низкоплотностных кодов. Он позволяет создавать вычислительные узлы низкой сложности в графе факторов, а также облегчает проблему перегрузки маршрутизации. Стохастическое декодирование вдохновлено стохастическими вычислениями, введенными в 1960-х годах для проектирования схем низкой точности. В стохастических вычислениях вероятности представлены потоками стохастических битов. Это представление приводит к снижению сложности вычислительных узлов для выполнения таких операций, как умножение и деление на вероятности в битовой последовательной форме. Стохастические вычисления рассматривались для таких приложений, как нейронные сети и контроллеры двигателей. Впервые рассмотрено применение стохастических вычислений для декодирования кодов с исправлением ошибок, для декодирования (16,8) LDPC и (7,4) кодов Хэмминга. Было также рассмотрена возможность их применения для решетчатого декодирования ациклического (16,11) кода Хэмминга и (256,121) кода Турбо-кода на основе (16,11) ациклических декодеров Хэмминга. Единственная аппаратная реализация стохастических декодеров декодирует специально сконструированный (16,8) хвостовой код с малой плотностью проверок на чётность. Вышеупомянутые ранее стохастические методы могли декодировать только специальные короткие / ациклические коды и не применялись для декодирования современных кодов с малой плотностью проверок на чётность на факторных графах. Стохастические декодеры чувствительны к уровню коммутационной активности внутри факторного графа, а также к проблеме фиксации (блокировки) стохастических узлов. Эти проблемы могут серьезно ухудшить производительность декодера с битовой частотой ошибок (BER), особенно для практических (длинных) кодов с малой плотностью проверок на чётность. Недавно в зарубежной литературе был предложен новый метод, который рассматривается как первый успешный стохастический метод декодирования практических кодов с малой плотностью проверок на чётность на факторных графах. Этот метод способен обеспечить почти оптимальную производительность показателей алгоритма суммирования с плавающей точкой.

### Стохастические вычисления и LDPC-декодирование

При стохастических вычислениях вероятности преобразуются в потоки стохастических битов с использованием последовательностей Бернулли. Каждый бит в потоке равен 1 с вероятностью трансформации. Например, кадр из 10 бит с 7 битами, равными 1, представляет вероятность 0,7. Следует подчеркнуть, что стохастические последовательности не обязательно являются фреймами битов и могут использоваться как стохастические потоки, в которых не требуется кадрирование/пакетизация. Преобразование из вероятностного в стохастический поток не является универсальным, следовательно, для одной и той же вероятности возможны разные потоки. Например, на рис. 1 показаны некоторые возможные потоки для вероятности 7/13 или 0.5385.

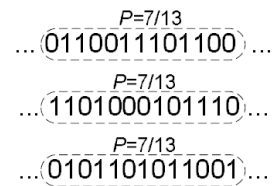


Рис. 1. Некоторые возможные стохастические потоки для вероятности 7/13 или 0.5385

Сложные вероятностные операции, такие как умножение и деление, выполняются с использованием простых схем с помощью стохастического представления. Например, шумовой гейт, показанный на рис. 2, может использоваться для умножения двух стохастических потоков. Стохастическое представление и вычисление также может быть применено к вероятностным операциям в факторных графах. Простота стохастических структур привлекательна для декодирования кодов с исправлением ошибок, таких как коды с малой плотностью проверок на чётность.

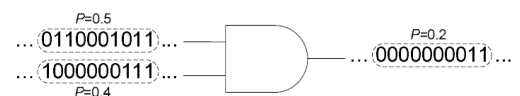


Рис. 2. Пример умножения двух стохастических потоков

При стохастическом декодировании вероятности, полученные из канала, преобразуются в стохастические потоки, а декодирование осуществляется стохастически.

ческими переменными узлами и узлами проверки четности, обменивающимися битами. Пусть  $P_a = \text{Pr}(a_i = 1)$  и  $P_b = \text{Pr}(b_i = 1)$  - входные вероятности, представленные стохастическими потоками  $\{a_i\}$  и  $\{b_i\}$ . Операция с переменным узлом выглядит следующим образом:

$$P_c = \frac{P_a P_b}{P_a P_b + (1 - P_a)(1 - P_b)} \quad (1)$$

Для операций проверки четности в узле проверки четности  $d_c = 3$  для входов  $P_a$  и  $P_b$  применяется формула (2).

$$P_c = P_a(1 - P_b) - P_b(1 - P_a) \quad (2)$$

Стохастические структуры для узла переменной  $d_v = 3$  и узла проверки четности  $d_c = 3$  показаны на рис. 3. Структура узла стохастической переменной использует свой предыдущий выходной бит (т. е.  $c_i = c_{i-1}$ ), если входные биты  $a_i$  и  $b_i$  не равны. Это называется состоянием удержания для узла переменной.

С использованием стохастических структур, операция декодирования продолжается через переменные узлы и узлы проверки четности, обменивающимися битами вдоль каждого ребра в графе факторов. Цикл декодирования не соответствует итерации в алгоритме распространения доверия. В конце такого цикла выходные данные узла переменной передаются реверсивному счётчику. Этот счетчик увеличивается на 1 бит и уменьшается на 0 бит. После фиксированного числа циклов декодирования (или когда все проверки четности выполнены) для определения декодированного кодового слова к содержимому счетчиков применяется усложненное решение с помощью реверсивного счетчика, где 1 знаковый бит определяет положительное содержимое (или символ +1), а знаковый бит 0 определяет отрицательное содержимое (или символ -1) в передаче двоичной фазовой манипуляции. В дополнение к простым структурам для переменных и узлов проверки четности стохастическое декодирование значительно уменьшает проблему перегрузки маршрутизации.

Стохастические структуры на рис. 3 не могут быть непосредственно применены для декодирования практических кодов LDPC. Как упоминалось ранее, стохастические декодеры чувствительны к уровню коммутационной активности (битовому переходу). Эта проблема

может быть обострена при высоких соотношениях сигнал / шум, в которых вероятностные сообщения близки к 0 (или 1) и, следовательно, соответствующие стохастические биты в основном равны 0 (или 1). Кроме того, стохастическое декодирование также подвержено проблеме фиксации (блокировки). Проблема фиксации относится к случаю, когда существование циклов в факторном графе коррелирует стохастические потоки (сообщения) таким образом, что стохастические узлы «прилипают» к фиксированному состоянию для нескольких циклов декодирования (т. е. для итерации стохастического декодирования).

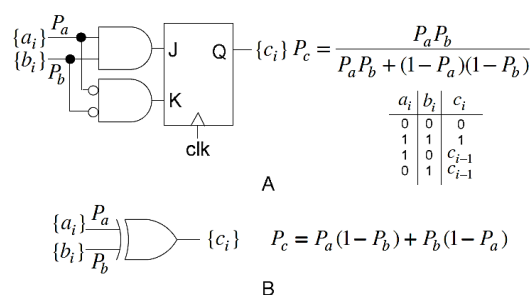


Рис. 3. Структура (A) узла переменной степени 3 и (B) узла проверки четности степени 3

Внешняя память - это память, назначенная исходящим ребрам на графике. Внешняя память использует механизм, который рерандомизирует и декоррелирует стохастические сообщения и значительно снижает вероятность застревания узлов стохастических переменных в фиксированных состояниях. Принципы этих механизмов заключаются в том, что внешняя память в них обновляется только с исходящих битов, которые не создаются в состоянии удержания. Также, когда состояние удержания происходит для ребра, переменный узел обращается к соответствующей внешней памяти, чтобы произвести/генерировать исходящий бит. Третий принцип трактуется так: генерация бита из внешней памяти в состоянии удержания должна быть произведена случайным/стохастическим способом, чтобы перезаписать стохастические потоки и разорвать связь. Этот механизм может быть реализован по-разному. Например, можно подсчитать регенеративные биты с помощью реверсивных счетчиков (т. е. преобразовать регенеративные биты в вероятности), а затем создать новый (рерандомизированный) стохастический бит на



основе измеренных вероятностей. Другой путь реализации внешней памяти происходит путем использования регистра переноса с одиночными дискретными битами. Эта реализация не требует преобразования регенеративных битов в вероятности и работает на потоках битов; она также подходит для реализации ПЛИС. С помощью этой реализации внешняя память обновляется только регенеративными битами, а в случае состояния удержания бит случайным образом выбирается из сдвигового регистра.

После получения блока символов из канала аддитивного белого Гауссовского шума масштабирование, зависящее от шума, применяется согласно уравнению (3). Хорошую стохастическую производительность декодирования вероятности битовых ошибок можно получить для кода (1024,512) LDPC, используя  $\alpha = 3$  и  $Y = 6$ , (т. е.  $4\alpha/Y = 2$ ). Поэтому вероятности могут быть легко сгенерированы на основе 1-битных сдвинутых полученных значений.

Для реализации декодера (1024,512) LDPC мы использовали 8-битное представление для полученных вероятностей канала. Эти вероятности преобразуются в стохастические потоки с помощью структуры, показанной на рис. 4. Эта структура состоит из компаратора, который сравнивает вероятность канала  $P$  с (псевдо) случайным числом  $R$  на каждом цикле декодирования.  $P$  фиксируется во время декодирования блока. Однако  $R$  - случайное число (с равномерным распределением), которое обновляется в каждом контроллере домена. Выходной бит компаратора равен 1, если  $P > R$ , и равен 0 в противном случае. Выходной бит компаратора подается на переменный узел, и поскольку  $R$  имеет равномерное распределение и может принимать значения от 0 до  $2^8 - 1$ , то каждый бит в выходном стохастическом потоке равен 1 с вероятностью  $P/2^8$ . Декодеру нужен один компаратор для каждого узла переменной.

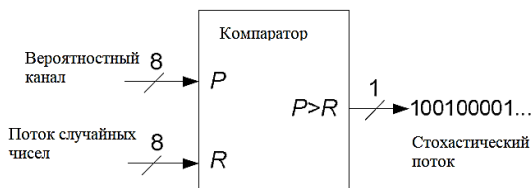


Рис. 4. Преобразование вероятностей каналов в стохастические потоки

Внешняя память работает как регистры сдвига  $M$ -бита, однако (одиночный) бит во внешней памяти выбирается по адресным строкам в каждом цикле декодирования. Каждый из них инициализируется, чтобы содержать нули. Рис. 5 показывает архитектуру узла переменной  $d_v = 3$  (показаны только 2 входа и соответствующий выход). Когда входные биты переменной узла равны, сигнал  $U$  на рис. 5 равен 1, и переменный узел применяет уравнение равенства и вычисляет исходящий бит для ребра. В этом случае узел переменной обновляет внешнюю память способом "первый в первый". В случае состояния удержания (т. е. когда входные биты не равны)  $U$  равно 0 и соответствующая внешняя память не обновляется. Вместо этого мы случайным образом выбираем бит из внешней памяти ребра и используем его в качестве исходящего бита. В аппаратных средствах случайный выбор бита из внешней памяти сделан, генерируя (псевдо) случайный адрес для каждой внешней памяти в каждом цикле декодирования.

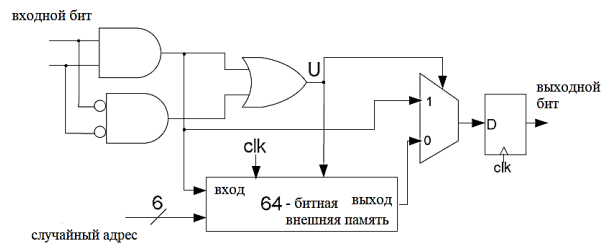


Рис. 5. Структура узла переменной  $d_v = 3$

Для аппаратной реализации декодера (1024,512) LDPC мы использовали внешнюю память с  $M = 64$ . Декодер использует одну внешнюю память на каждое ребро. Много архитектур ПЛИС позволяют осуществлять эффективную вставку внешней памяти. Они позволяют использовать как базовый логический элемент ПЛИС, так и базовый логический элемент ПЛИС сдвигового регистра соотношения сигнал/шум и получать доступ к одиночному биту в регистре. Также возможно каскадировать любое количество соотношений сигнал/шум для формирования регистров сдвига произвольного размера. В качестве примера в нашем целевом ПЛИС - устройстве Xilinx Virtex-4 64-битная внешняя память может быть эффективно реализована каскадом

из четырех входных базовых логических элементов ПЛИС. Каждый из четырех входных базовых логических элементов ПЛИС формирует 16-битный регистр сдвига с одним выходом, к которому обращается его адресная строка. Созданная таким образом 64-битная внешняя память занимает всего 2 часть ПЛИС Xilinx Virtex-4.

Выход узла стохастической переменной передается реверсивному счетчику в конце каждого цикла декодирования. Поэтому для каждого узла переменной требуется один реверсивный счетчик. В этой реализации мы использовали 6-разрядное насыщение счетчика, которое считает от -31 до 31. Насыщая реверсивный счетчик, его значение увеличивается в случае получения 1 и уменьшается в случае получения 0. Он прекращает уменьшение/приращение, если достигает своих минимальных/максимальных пределов.

Реализация проверки четности проста. Рис. 6 показывает структуру проверки четности  $d_c = 6$ , используемой в декодере.

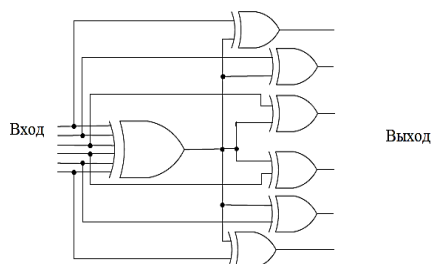


Рис. 6. Структура узла проверки четности  $d_c = 6$

Механизм рандомизации отвечает за генерацию случайных вероятностей для компараторов, а также за генерацию случайных адресов для внешней памяти. Хотя необходимое количество случайных чисел может показаться слишком большим. Случайные числа могут быть распределены на двух уровнях без значительных потерь эффективности в вероятности битовой ошибки: биты в случайных (вероятностных) числах, генерируемых для компараторов, тоже могут использоваться для адресов внешней памяти, а также разные группы внешней памяти могут совместно использовать один и тот же случайный адрес.

Механизм рандомизации для декодера (1024, 512) LDPC состоит из десяти 16-

разрядных линейных регистров сдвига обратной связи, в которых каждый такой регистр связан с простым многочленом. Механизм рандомизации производит 32 восьмиразрядных случайных числа в каждом цикле декодирования для всего дешифратора.

Рис. 7 показывает вероятность битовых ошибок стохастического декодера для декодирования с максимальным циклом декодирования 6К.

(1024,512) LDPC-код при  $d_v=3$  и  $d_c=6$

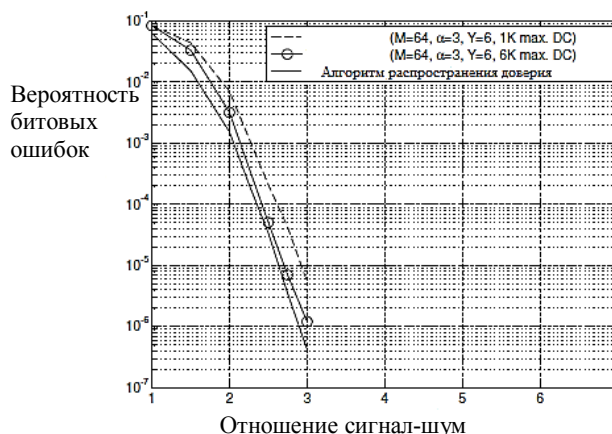


Рис. 7. Декодирование результатов производительности

Как показано, стохастический декодер обеспечивает производительность декодирования, близкую к алгоритму распространения доверия с плавающей точкой, с 32 итерациями. Потеря расшифровки около 0.1 дБ на вероятность битовой ошибки около  $10^{-6}$  (для расшифровки с максимальным циклом декодирования 6К). Стохастический декодер прекращает декодирование, как только все проверки четности выполнены или достигнуто максимальное число 6К циклов декодирования. Однако наблюдаемый средний постоянный ток был значительно ниже максимального постоянного тока, особенно для низких вероятностей битовых ошибок. На самом деле, в таких низких вероятностях битовых ошибок есть только несколько блоков, которым нужно большое количество циклов для декодирования. Например, наблюдаемый средний цикл декодирования в соотношении сигнал/шум = 3 дБ (вероятность битовой ошибки  $10^{-6}$ ) был приблизительно 300 вероятностей битовых ошибок, приводящий к пропускной способности приблизительно 706 Мбит/с в этой вероятности.

Необходимо заметить, что вышеупомянутая скорость (средний и максимальный цикл декодирования) и требования к площади

предназначены для обеспечения производительности, близкой к алгоритму распространения доверия с плавающей запятой. Стохастический декодер способен обмениваться областью, скоростью и задержкой с производительностью вероятности битовых ошибок. Например, для производительности, аналогичной алгоритму с  $\min \text{sum}$  (т. е. обычно около 0,5-1 дБ потери, по сравнению с алгоритмом распространения доверия), может использоваться более короткая внешняя память и/или меньшее количество циклов декодирования. Кроме того, для программ, в которых строгое требование максимальной задержки, можно уменьшить максимальный цикл декодирования с некоторой потерей производительности.

### Заключение

В данной статье была представлена архитектура на основе ПЛИС для полностью параллельного (1024,512) стохастического декодера LDPC. Предлагаемый декодер является самым «быстрым» полностью параллельным декодером LDPC на ПЛИС.

В работе рассмотрена архитектура стохастического декодера LDPC. Результаты синтеза и производительности, представленные в статье, подтверждают потенциал методов стохастического декодирования для декодирования с низкой сложностью и высокой

пропускной способностью современных кодов LDPC с производительностью, близкой к алгоритму распространения доверия с плавающей точкой.

### Литература

1. Белооголовый А.В., Крук Е.А. Многопороговое декодирование кодов с низкой плотностью проверок на четкость // Информационно-управляющие системы. 2006. С. 35-37, 46-50, 73-81.
2. Берлекэмп Э.Р. Техника кодирования с исправлением ошибок // ТИИЭР. 1980. Т. 68. №5. С. 24-58
3. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие / под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. С. 125-132.
4. Овечкин Г.В., Овечкин П.В., Денисова М.А. Применение многопорогового декодера в системах передачи данных с многопозиционными системами модуляции // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: 13-я междунар. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТА, 2004. С.58–59.
5. Золотарёв В.В. Использование многопорогового декодера вместо алгоритма Витерби // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. 2002. Вып. 10. С.117–119.
6. Свиридова И.В., Башкиров А.В., Коротков Л.Н. Использование LDPC-кодов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.3. С. 41-44.
7. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.

Поступила 03.04.2018; принята к публикации 11.05.2018

### Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [fab7@mail.ru](mailto:fab7@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>  
**Свиридова Ирина Владимировна** - ассистент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [ri-ss-ka@mail.ru](mailto:ri-ss-ka@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>  
**Андреева Дарья Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [dashyli98@mail.ru](mailto:dashyli98@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

## AN AREA-EFFICIENT FPGA-BASED ARCHITECTURE FOR FULLY-PARALLEL STOCHASTIC LDPC DECODING

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, D.S. Andreeva

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** stochastic decoding is a new alternative method of low complexity decoding of error correcting codes. This paper presents a variant of the hardware architecture for stochastic decoding low band codes. This architecture allows for full parallel decoding using the latest technologies when working with algorithms with LDPC, working on a field-programmable

gate array (FPGA). The architecture of the parallel stochastic decoder is implemented on LDPC in device Xilinx Virtex - 4 XC4VLX200 with a bandwidth of 706 Mbit / s, at a bit error rate of about  $10^{-6}$ , with a loss of performance of about 0.1 dB.

A survey of stochastic computing and stochastic decoding methods is also presented. The problem of hardware implementation and architecture of stochastic decoders are described. The results of the synthesis and decoding for the (1024,512) LDPC-codes with low density parity check decoder are presented. It is shown that the architectural features present in many programmable logic integrated circuits, can be used for area-efficient implementation of stochastic LDPC decoders

**Key words:** iterative decoding, low-density parity-check (LDPC) codes, stochastic decoding, FPGA, external memory

#### References

1. Belogolovyy A.B., Kruk E.A. "Multithreshold decoding of codes with low-density checks for definition", *Information control systems (Informatsionno-upravlyayushchie sistemy)*, 2006, pp. 35-37, 46-50, 73-81
2. Berlekamp E.R. "Coding technique with error correction", *Proc. of the Institute of Engineers in Electronics and Radio Engineering (Trudy instituta inzhenerov po elektronike i radiotekhnike)*, 1980, vol. 68, no. 5, pp. 24-58.
3. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. "Antinoise coding. Methods and algorithms. Manual", Reference book, Moscow, pp. 125-132.
4. Denisova M.A., Ovechkin G.V., Ovechkin P.V. "The use of multithreshold decoder in the data transmission system with multi-position modulation systems", *Problems of transmission and processing of information in telecommunications networks and systems: 13th Intern. Scientific-Techn. Conf. (Problemy peredachi i obrabotki informatsii v setyakh i sistemakh telekommunikatsiy: 13-ya mezhdunar. nauch.-tekh. konf.)*, Ryazan', RSRTA, 2004, pp. 58-59.
5. Zolotarev V.V. "The use of multithreshold decoder instead of a Viterbi algorithm", *Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering Academy (Vestnik Ryazanskoy gosudarstvennoy radiotekhnicheskoy akademii)*, 2002, iss. 10, pp. 117-119.
6. Sviridova I.V., Bashkirov A.V., Korotkov L.N. "The use of LDPC codes", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6-3, pp. 41-44.
7. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Using stochastic computing to implement non-binary LDPC-decoder on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 70-73.

Submitted 03.04.2018; revised 11.05.2018

#### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [fab7@mail.ru](mailto:fab7@mail.ru), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

**Irina V. Sviridova**, Assistant, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [riss-ka@mail.ru](mailto:riss-ka@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

**Dar'ya S. Andreeva**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [dashyli98@mail.ru](mailto:dashyli98@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

## АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЁТА НАДЁЖНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

© 2018 А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** испытания изделий на надёжность являются одним из важнейших этапов производства любой техники. Без этого показателя невозможно иметь полного представления о правильности изготовления изделия, т.к. во время производства возможны неверные технические действия, которые оказывают негативное влияние на устройство. Для выявления таких действий и выполняют испытания на надёжность. В настоящее время существуют несколько способов определения надёжности, которые используются массово в производстве. Самыми распространёнными считаются априорный и апостериорный анализ надёжности, а также метод граничных и матричных испытаний. На последнем способе анализа необходимо остановиться отдельно и пояснить его подробнее. Это связано с тем, что метод определения надёжности с помощью граничных и матричных испытаний является маловостребованным в связи с их трудоёмкостью. Сам метод состоит из двух испытаний, а именно: граничного и матричного, начальные данные для обоих испытаний находятся по одной и той же методике, но характеристики, полученные в ходе расчёта по этим испытаниям, отличаются. Кратко изложены особенности каждого из методов определения надёжности, раскрыты достоинства и недостатки способов анализа. Представлено сравнение данных методов, из которого можно сделать вывод о том, какой метод определения надёжности является наиболее актуальным, точным и достаточным в тех или иных условиях определения надёжности

**Ключевые слова:** граничные испытания, матричные испытания, матрица испытаний

### Введение

Исследования на надёжность являются важной частью проектирования электронных средств (ЭС). В настоящее время существуют несколько наиболее распространённых способов определения надёжности ЭС [1]:

- априорный анализ надёжности, основанный на расчёте вероятности отказа РЭС по уже известным данным;

- апостериорный анализ надёжности - он же исследование надёжности с помощью статистических данных, данный способ предполагает исследование уже готового изделия, которое поставлено на серийное производство;

- метод граничных и матричных испытаний [1].

Цель данной статьи - сравнить эти методы между собой и выяснить их достоинства и недостатки, а также определить, в каких условиях какой из способов определения надёжности будет наиболее эффективным.

В настоящее время для первоначального расчёта надёжности ЭС, которое только начали проектировать, используют априорный анализ надёжности. Данный вид анализа рассчитывается при помощи различных математических распределений, например, распределение Вейбула, Рейля, Гамма-распределения, Треугольное распределение и

т.п. Самым распространённым видом расчётов, которые используются для априорного анализа надёжности, является экспоненциальное распределение [1].

Для любого вида априорного анализа начальными данными для расчёта будут являться уже известные характеристики вероятности безотказной работы  $P$ , или же время наработки на отказ  $T_{ср}$ , или же интенсивность отказов  $\lambda$  и т.п. элементов, из которых состоит разрабатываемое устройство. В зависимости от схемы устройства данные значения либо группируют, либо суммируют, а потом находят необходимые коэффициенты, по которым и определяют надёжность ЭС.

Достоинства априорного анализа заключаются в том, что можно оценить надёжность ЭС ещё на стадии проектирования изделия и при необходимости внести соответствующие изменения, даже без использования подобного образца и серии устройств.

Недостатки анализа заключаются в том, что для проведения данного расчёта необходимы уже известные характеристики вероятности безотказной работы  $P$  или времени наработки на отказ  $T_{ср}$  радиоэлементов, из которых состоит ЭС. Если этих значений нет или же в ЭС используется элементная база нового образца, то априорный



анализ невозможно использовать для расчёта надёжности устройства.

Другим распространённым способом исследования надёжности [1] является апостериорный анализ надёжности. Расчёт поданному виду анализа состоит в том, что первоначальными данными для расчёта являются данные, полученные статистическим путём из экспериментов с выборкой ЭС.

Точность данного анализа за счёт статистических данных очень высока. Но в связи с тем, что требуется обрабатывать большое количество статистических данных, его трудоёмкость возрастает.

К недостаткам данного способа анализа относится то, что для его реализации необходимо специальное оборудование, квалифицированные специалисты и большое количество времени на проведение самих испытаний и обработки полученных данных.

Апостериорный анализ надёжности хорошо проводить на ЭС, которые уже выпускают в больших сериях для их модернизации, выявления отказов и, как следствие, повышения надёжности.

Также существует ещё один метод исследования надёжности, а именно, метод граничных и матричных испытаний, который совмещает в себе как элементы априорного, так и апостериорного анализов. Данный способ представляет собой два вида испытаний: граничные и матричные [1].

С помощью граничных испытаний можно определить область безотказной работы ЭС, предсказать место и время появления постепенного отказа элементов ЭС, а также можно сравнить запас надёжности элементов ЭС.

В матричных испытаниях происходит определение вероятности безотказной работы Р устройства, по которой можно определить и другие параметры надёжности, такие как время наработки на отказ  $T_{cp}$ , интенсивность отказов  $\lambda$  и т.п. Как следствие - оценить общую надёжность ЭС как в априорном, так и апостериорном анализе. Также в матричных испытаниях можно определить коэффициент гарантированной надёжности устройства.

Суть испытаний заключается в следующем: есть опытный образец ЭС, с которого снимают выходные характеристики (например, выходное напряжение сигнала), после чего из этих данных составляется матрица, по которой происходит расчёт

необходимых коэффициентов по граничным или матричным испытаниям.

Достоинства метода заключаются в том, что данный метод очень гибок, в нём можно определить много параметров, по которым оценивается надёжность ЭС. Данный факт говорит о высокой точности метода. Благодаря граничным испытаниям можно оценивать надёжность радиоэлементов РЭС, особенно это актуально для военной и космической техники, а также если устройство используется как новейшая элементная база, на которую в настоящее время нет данных о надёжности. В отличие от апостериорного анализа, для граничных и матричных испытаний хватает единичного экземпляра ЭС, а не целой серии для проведения испытаний, что позволяет существенно экономить ресурсы при разработке новейшей радиотехники [2].

К недостаткам анализа можно отнести большую трудоёмкость, необходимость квалифицированного персонала, а также наличие специального оборудования для проведения исследований.

Все вышеперечисленные достоинства и недостатки методов приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Сравнение методов анализов надёжности

Название	Достоинства	Недостатки	Вывод
Априорный анализ	Можно оценить надёжность ЭС ещё на стадии проектирования изделия	Необходимы уже известные характеристики радиоэлементов, из которых состоит ЭС	Данный способ расчёта надёжности хорошо использовать для предварительного анализа надёжности проектируемого устройства
Апостериорный анализ	Высокая точность метода	Необходимо специальное оборудование и квалифицированные специалисты, большая трудоёмкость проведения исследования	Данный способ расчёта надёжности хорошо использовать для модернизации изделий, которые выпущены в массовое производство

Продолжение табл. 1

Метод граничных и матричных испытаний	Данный метод возможно использовать для определения многих характеристик надежности, высокая точность полученных данных	Необходимо специальное оборудование и квалифицированные специалисты, большая трудоёмкость проведения исследования	Данный способ расчёта надёжности хорошо использовать для предварительного анализа надёжности проектируемого устройства
---------------------------------------	--	---	--

Анализируя табл. 1, можно прийти к выводу, что метод граничных и матричных испытаний при всех своих недостатках является универсальным методом определения надёжности, его можно использовать как на стадии проектирования ЭС, так и для дальнейшей модернизации и повышения надёжности конструкции.

**Первый эксперимент по определению надёжности**

В качестве эксперимента произведём анализ надёжности амплитудного детектора (АД) по априорному анализу, а именно с помощью экспоненциального распределения и с помощью метода матричных испытаний, полученные значения сравним и сделаем вывод.

Определим надёжность АД по экспоненциальному распределению амплитудного детектора, схема которого представлена на рисунке.

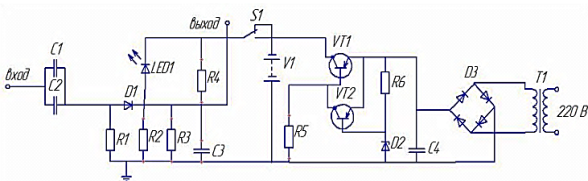


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная амплитудного детектора

Согласно этой схеме выход из строя одного из элементов приводит к выходу из строя всего устройства, поэтому для расчёта воспользуемся последовательной схемой [2].

Интенсивность отказа всего изделия рассчитывается согласно формуле (1):

$$\lambda_i = N \cdot \lambda_{iR} + N \cdot \lambda_{iCкер} + N \cdot \lambda_{iCэл} + N \cdot \lambda_{iVT} + N \cdot \lambda_{iVD} + N \cdot \lambda_{iCB} + N \cdot \lambda_{iП} + N \cdot \lambda_{iCm} + N \cdot \lambda_{iDM} + N \cdot \lambda_{iTp} + N \cdot \lambda_{iПай} \quad (1)$$

где N – количество элементов;  $\lambda_i$  – интенсивность отказа всего изделия;  $\lambda_{iR}$  – интенсивность отказа резисторов;  $\lambda_{iCкер}$  – интенсивность отказа керамических конденсаторов;  $\lambda_{iCэл}$  – интенсивность отказа электролитических конденсаторов;  $\lambda_{iVT}$  – интенсивность отказа транзисторов;  $\lambda_{iVD}$  – интенсивность отказа диодов;  $\lambda_{iCB}$  – интенсивность отказа светодиодов;  $\lambda_{iП}$  – интенсивность отказа переключателей;  $\lambda_{iCm}$  – интенсивность отказа стабилитронов;  $\lambda_{iDM}$  – интенсивность отказа диодного моста;  $\lambda_{iTp}$  – интенсивность отказа трансформаторов;  $\lambda_{iПай}$  – интенсивность отказа пайки.

Интенсивность отказов радиоэлементов приведена в табл. 2 [2]:

Таблица 2  
Интенсивность отказа радиоэлементов для АД

Название	Количество шт.	Интенсивность отказа $\lambda_i^{10^{-6}}$ часов
Резисторы	6	0,03
Конденсаторы (керамические)	3	0,1
Конденсаторы (электролитические)	1	0,035
Транзисторы	2	0,5
Диоды	1	0,2
Светодиоды	1	0,8
Переключатели	1	0,7
Стабилитроны	1	0,5
Диодные мосты	1	0,816
Трансформаторы	1	1,04
Пайка	45	0,004

Рассчитаем интенсивность отказа всего изделия:

$$\lambda_i = 6 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,035 + 2 \cdot 0,5 + 0,2 + 0,8 + 0,7 + 0,5 + 0,816 + 1,04 + 45 \cdot 0,004 = 5,751 \cdot 10^{-6}.$$

Время наработки на отказ рассчитывается согласно формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_i} \quad (2)$$

Рассчитаем время наработки на отказ:

$$T_{cp} = \frac{1}{1,3985 \cdot 10^{-6}} = 0,174 \cdot 10^6 = 1,74 \cdot 10^5.$$

Теперь произведём расчёт по методу матричных испытаний, для этого было проведено исследование, а именно: 45 измерений выходных параметров АД. Измерения проводились каждые 5 мин, общее время работы амплитудного детектора за время исследования составило 3,75 часов, из 45 снятых характеристик 8 выходят за допустимые нормы, из полученных данных была составлена матрица испытаний, которая представлена ниже.

0.14	0.13	0.15	0.16	0.17	0.19	0.14	0.15	0.16
0.15	0.17	0.14	0.17	0.16	0.14	0.13	0.17	0.16
0.15	0.13	0.14	0.15	0.16	0.14	0.15	0.17	0.12
0.18	0.18	0.15	0.16	0.14	0.12	0.15	0.16	0.17
0.18	0.18	0.12	0.15	0.14	0.15	0.18	0.14	0.15

Рис. 2. Матрица испытаний

Произведём расчёт вероятности безотказной работы АД [3]:

$$P = \frac{R-Q}{R}, \quad (3)$$

где R – общее число измерений; Q – характеристики, которые выходят за допустимые нормы.

Подставив соответствующие значения, получаем:

$$P = \frac{45-8}{45} = 0,82.$$

Далее произведём расчёт общей интенсивности отказов амплитудного детектора:

$$\lambda = \frac{2Q}{(R+(R-Q))t_{общ}}, \quad (4)$$

где  $t_{общ}$  – общее число измерений.

Соответственно получаем:

$$\lambda = \frac{2 \cdot 8}{(45+(45-8)) \cdot 3,75} = 5,2 \cdot 10^{-6}.$$

Далее рассчитаем время наработки на отказ согласно формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{1}{5,2 \cdot 10^{-6}} = 1,92 \cdot 10^5.$$

Составим таблицу для сравнения полученных данных.

Таблица 3

Сравнение полученных данных расчёта АД

	Экспоненциальное распределение	Метод матричных испытаний
Вероятность безотказной работы P	—	0,82
Интенсивность отказов λ	5,751 · 10 <sup>-6</sup>	5,2 · 10 <sup>-6</sup>
Время наработки на отказ T <sub>cp</sub>	1,74 · 10 <sup>5</sup>	1,92 · 10 <sup>5</sup>

Анализируя результаты, приведенные в табл. 3, можно сделать вывод, что определение надёжности с помощью метода матричных испытаний показывает более точный результат, чем метод расчета надёжности по экспоненциальному распределению, если сравнивать оба метода относительно времени наработки на отказ.

Второй эксперимент по определению надёжности

Проведём повторный эксперимент для конкретизации полученных выше данных, для этого определим надёжность другого устройства. В качестве подопытного образца был выбран преобразователь напряжения (ПН), схема электрическая принципиальная которого представлена на рис. 3.

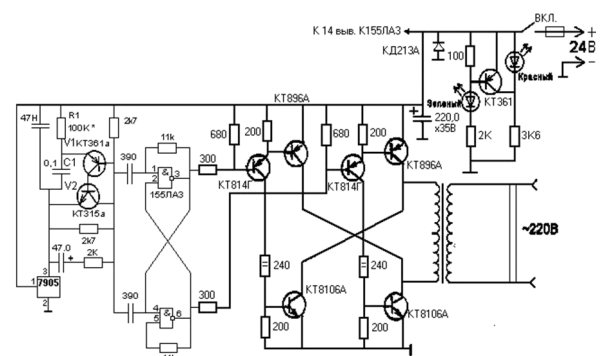


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная преобразователя напряжения

Определим надёжность ПН по экспоненциальному распределению, согласно данной схеме выход из строя одного из элементов приводит к выходу из строя всего устройства, поэтому для расчёта надёжности воспользуемся последовательной схемой

расчета. Для этого сначала рассчитаем интенсивность отказов всего изделия согласно формуле:

$$\lambda_i = N \cdot \lambda_{iR} + N \cdot \lambda_{iC} + N \cdot \lambda_{iVT} + N \cdot \lambda_{iVD} + N \cdot \lambda_{iCB} + N \cdot \lambda_{iCm} + N \cdot \lambda_{iM} + N \cdot \lambda_{iTp} + N \cdot \lambda_{iПай} \quad (5)$$

где N – количество элементов;  $\lambda_i$  – интенсивность отказа всего изделия;  $\lambda_{iR}$  – интенсивность отказа резисторов;  $\lambda_{iC}$  – интенсивность отказа конденсаторов;  $\lambda_{iVT}$  – интенсивность отказа транзисторов;  $\lambda_{iVD}$  – интенсивность отказа диодов;  $\lambda_{iCB}$  – интенсивность отказа светодиодов;  $\lambda_{iCm}$  – интенсивность отказа стабилизаторов напряжения;  $\lambda_{iM}$  – интенсивность отказа микросхемы;  $\lambda_{iTp}$  – интенсивность отказа трансформаторов;  $\lambda_{iПай}$  – интенсивность отказа пайки.

Интенсивность отказов радиоэлементов приведена в табл. 4.

Таблица 4  
Интенсивность отказа радиоэлементов для ПН

Название	Количество шт.	Интенсивность отказа $\lambda_i^{10^{-6}}$ часов
Резисторы	20	0,03
Конденсаторы	6	0,035
Транзисторы	9	0,5
Диоды	1	0,2
Светодиоды	1	0,8
Стабилизаторы напряжения	1	0,5
Микросхемы	1	0,21
Трансформаторы	1	1,04
Пайка	99	0,004

Рассчитаем интенсивность отказов всего изделия:

$$\lambda_i = 20 \cdot 0,03 + 6 \cdot 0,035 + 9 \cdot 0,5 + 0,2 + 2 \cdot 0,8 + 0,5 + 0,21 + 1,04 + 99 \cdot 0,004 = 9,256 \cdot 10^{-6}$$

Время наработки на отказ будет рассчитано согласно формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{1}{9,256 \cdot 10^{-6}} = 0,108 \cdot 10^6 = 1,08 \cdot 10^5$$

Далее, как в предыдущем опыте, рассчитаем надёжность устройства с помощью матричного метода. Для этого был проведён опыт, а именно: произведено 45 измерений выходных параметров ПН, измерения

проводились каждые 5 мин, общее время работы устройства за время исследования составило 3,75 часов, из 45 снятых характеристик 13 выходят за допустимые нормы, из полученных данных была составлена матрица испытаний, которая представлена ниже.

$$\begin{pmatrix} 24 & 24 & 24 & 24 & 25 & 24 & 24 & 24 & 25 \\ 24 & 24 & 24 & 25 & 26 & 24 & 22 & 23 & 24 \\ 24 & 24 & 25 & 26 & 24 & 22 & 23 & 24 & 24 \\ 24 & 25 & 26 & 24 & 23 & 24 & 24 & 24 & 24 \\ 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 & 24 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Матрица испытаний

Произведём расчёт вероятности безотказной работы согласно формуле (3):

$$P = \frac{45-13}{45} = 0,711$$

Теперь рассчитаем общую интенсивность отказов (4):

$$\lambda = \frac{2 \cdot 13}{(45 + (45 - 13)) \cdot 3,75} = 9,004 \cdot 10^{-6}$$

В конце произведём расчёт времени наработки на отказ по формуле (2):

$$T_{cp} = \frac{1}{9,004 \cdot 10^{-6}} = 1,11 \cdot 10^5$$

Из полученных данных составим таблицу для сравнения.

Таблица 5  
Сравнение полученных данных расчёта ПН

	Экспоненциальное распределение	Метод матричных испытаний
Вероятность безотказной работы P	—	0,711
Интенсивность отказов $\lambda$	$9,256 \cdot 10^{-6}$	$9,004 \cdot 10^{-6}$
Время наработки на отказ $T_{cp}$	$1,08 \cdot 10^5$	$1,11 \cdot 10^5$

Анализируя табл. 3 и 5, можно прийти к выводу, что определение надёжности с помощью метода матричных испытаний показывает более точный результат, чем метод расчета надёжности по экспоненциальному

распределению, если сравнивать оба метода относительно времени наработки на отказ  $T_{cp}$ . Данное утверждение подтверждается как при определении надёжности амплитудного детектора, так и при определении надёжности преобразователя напряжения.

Это связано с тем, что расчёт надёжности с помощью матричного метода испытаний основан на статистических данных, снятых с самого исследуемого устройства, что в значительной степени повышает точность проведённых расчётов, но, в свою очередь, это же обстоятельство повышает трудоемкость метода, если сравнивать его с экспоненциальным распределением, в котором можно в кратчайшие сроки произвести все необходимые расчёты по имеющимся методическим данным.

### Заключение

Как видно из анализа расчёта устройств, метод граничных и матричных испытаний является перспективным способом исследования надёжности. Он обладает гибкостью и объёмным охватом исследований характеристики надёжности, а также необходимой точностью полученных данных. Данный способ определения надёжности устройств является особенно актуальным для военной, воздушной и космической отраслей, т.к. благодаря нему можно оценивать

надёжность ЭС еще на стадии проектирования, с учётом даже введения новейшей элементной базы, которая довольно часто специально разрабатывается для узкоспециализированных проектов в данных отраслях, что, в свою очередь, позволяет существенно экономить время и ресурсы на разработку техники специального назначения.

### Литература

1. Матвеевский В.Р. Надёжность технических систем: учеб. пособие. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. 113 с.
2. Кравченко Е.Г. Надёжность технических систем в машиностроении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. 126 с.
3. Никитин Л.Н. Испытания, контроль и диагностика радиоэлектронной аппаратуры. Воронеж: ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2009. 252 с.
4. Костюков А.С., Помигуев Н.Н., Никитин Л.Н. Моделирование граничных испытаний с помощью ЭВМ // Физико-математическое моделирование систем: материалы XVII Междунар. семинара. Воронеж, 2017. Ч. 2. С. 100 – 104.
5. Костюков А.С., Помигуев Н.Н., Никитин Л.Н. Матричные испытания в системе MathCAD // Физико-математическое моделирование систем: материалы XVII Междунар. семинара. Воронеж, 2017. Ч. 2. С. 105 – 109.
6. Хачатрян С.А. Выбор оптимального способа повышения надёжности невосстанавливаемых объектов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 12. Ч. 5. С. 785 – 787.
7. Полотов Ю.А., Хомич Л.В. Новые подходы к анализу надёжности транспортных машин // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 70 – 72.

Поступила 03.04.2018; принята к публикации 11.05.2018

### Информация об авторах

**Костюков Александр Сергеевич** – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [stalkerklon@mail.ru](mailto:stalkerklon@mail.ru)

**Бобылкин Игорь Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [bobytkin@bk.ru](mailto:bobytkin@bk.ru)

**Никитин Леонид Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [leonid-nikit@yandex.ru](mailto:leonid-nikit@yandex.ru)

**Пирогов Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [pirogov.alx@gmail.com](mailto:pirogov.alx@gmail.com)

## ANALYSIS OF STATISTICAL METHODS OF TESTS AND OPTIMIZATION OF CALCULATION OF RELIABILITY AT THE PRODUCTION OF ELECTRONIC DEVICES

A.S. Kostyukov, I.S. Bobylkin, L.N. Nikitin, A.A. Pirogov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** testing products for reliability is one of the most important stages in the production of any equipment. Without this characteristic, it is impossible to have a complete idea about the correctness of the product manufacture. During production, incorrect technical actions are possible which have a negative effect on the device. To identify such actions, tests for reliability are performed. At present, there are several ways to determine the reliability that are used massively in production. The most common are the a priori and a posteriori reliability analysis, as well as the method of boundary and



matrix tests. The last method of analysis should be considered separately and explained in more detail. This is due to the fact that the method of determining reliability by means of boundary and matrix tests is of little use due to their laboriousness. The method itself consists of two tests, namely the boundary and matrix tests, the initial data for both tests are the same, but the characteristics obtained during the calculation for these tests differ. The features of each of the methods for determining reliability are briefly described, the advantages and disadvantages of the methods of analysis are revealed. The following is a comparison of these methods, from which it can be concluded which method of determining reliability is most relevant, accurate and sufficient under certain conditions for determining reliability

**Key words:** boundary tests, matrix tests, test matrix

#### References

1. Matveevskiy V.R. "Reliability of technical systems: manual" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie"), Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 2002, 113 p.
2. Kravchenko E.G. "Reliability of technical systems in mechanical engineering: manual" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem v mashinostroyenii: ucheb. posobie"), Komsomol'sk-na-Amure, KnASTU, 2014, 126 p.
3. Nikitin L.N. "Tests, control and diagnostics of radio-electronic equipment" ("Ispytaniya, kontrol' i diagnostika radioelektronnoy apparatury"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2009, 252 p.
4. Kostyukov A.S., Pomiguyev N.N., Nikitin L.N. "Modeling of boundary tests by means of a computer", *Proc. of the XVII International Workshop "Physics-mathematical modeling of systems. Part 2" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XVII mezhdunar. seminar. Ch. 2)*, Voronezh, 2017, pp. 100-104.
5. Kostyukov A.S. Pomiguyev N.N., Nikitin L.N. "Matrix tests in the MathCAD/AS system", *Proc. of the XVII International Workshop "Physics-mathematical modeling of systems. Part 2" (Fiziko-matematicheskoe modelirovanie sistem: materialy XVII mezhdunar. seminar. Ch. 2)*, Voronezh, 2017, pp. 105-109.
6. Khachatryan S.A. "The choice of the optimal way to increase the reliability of non-renewable objects", *International Journal of Applied and Fundamental Research (Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy)*, 2016, no. 12 (part 5), pp. 785-787.
7. Polyutov Yu.A., Khomich L.V. "New approaches to reliability analysis of transport vehicles", *Fundamental Research (Fundamental'nye issledovaniya)*, 2004, no. 6, pp. 70-72.

Submitted 03.04.2018; revised 11.05.2018

#### Information about the authors

**Aleksander S. Kostyukov**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru

**Igor' S. Bobylkin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bobytkin@bk.ru

**Leonid N. Nikitin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: leonid-nikit@yandex.ru

**Aleksander A. Pirogov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

## ПРОТОТИПЫ, МОДЕЛИРУЮЩИЕ СИСТЕМУ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ПОМЕХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫМ МЕТОДОМ

© 2018 И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко, Т.Д. Ижокина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлено устройство формирования и приёма полезного сигнала системы. Рассматривается прототип передачи дискретной информации с помощью фазоманипулированных сигналов, где демодулятор приемника основан на использовании согласованной фильтрации, наиболее противостоящей воздействию белых шумов. Код в прототипе сложного сигнала используется либо как периодически повторяющиеся M-последовательности с периодом до 1023 бит, либо изначально заданная информационная логическая закономерность, такая как код Баркера или хаотичный ряд двоичных символов количеством до 4096 бит. В качестве наглядного примера были представлены схемы демодулятора сигналов: ФМн-2, ФМн-4, СФМн-4, ММС. Рассматриваются синхронизация приемника и подробное описание его работы. Для решения задачи по определению защитного отношения сигнал/помеха был разработан прототип, моделирующий воздействие помех на линию передачи дискретной информации фазоманипулированными сигналами. Основной функцией прототипа является раздельное рассмотрение прохождения различных полезных и мешающих сигналов по приёмному тракту, а также построение гистограмм. Во время разработки модели был расчёт на дальнейшее внесение новых элементов и процедур зарождения сигналов по мере исследования новых непреднамеренных радиопомех (НРП). На основе значения результирующего сигнала на выходе согласованного фильтра в отрезке времени в модели образуются гистограммы ответа на полезный сигнал и НРП. Разработанная модель позволяет определить влияние параметров НРП на вероятность сбоя

**Ключевые слова:** фазоманипулированный сигнал, дискретная информация, прототип, модулятор сигнала

### Введение

На основе модели формирования фазоманипулированных (ФМ) сигналов в радиотранслирующем устройстве был разработан прототип системы передачи дискретной информации [1], использующей ФМ сигналы, включая сложные, в разных вариациях огибающей элементарной посылки. Прототип определён проверить влияние модуляционных параметров полезного сигнала, характеристик полосовых фильтров на выходе модуляторов и фильтров приемника на энергетические потери при передаче информации из-за ухудшений, вызванных фильтрацией. Мониторинг изменений тех или иных параметров рассчитывается анализом преобразования качества работоспособности радиоэлектронной системы. Показатель изменения качества деятельности системы при передаче конечной информации может рассматриваться как изменение допустимости ошибки (неверного приема дискретного сигнала).

### Прототип передачи дискретной информации

На рис. 1 графически выведена моделируемая система, на схеме которой

находятся передатчик ФМ сигнала и приёмное устройство.

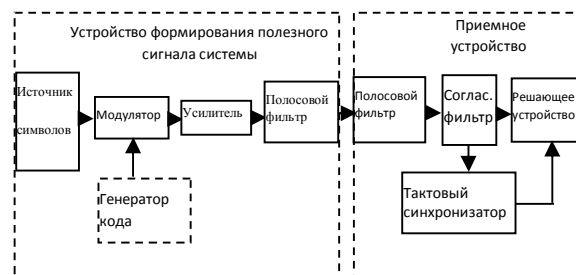


Рис. 1. Схема моделируемой системы

С точки зрения влияния сигнала будут рассматриваться наиболее важные элементы устройств: полосовые фильтры, демодулятор приёмника и усилитель передатчика. Фазовый синхронизатор и преобразователь частоты не учитываются на данной выше схеме, с расчётом на их безупречную работу. Помимо этого, не рассматривается возникновение сигнальных искажений на трассе распространения.

Работа РЭС в неучтённых условиях радиоискажений рассматривается для решения задач ЭМС, где наиболее верно представлены влияния, совокупности которых - это влияние белого шума (помехи, ввергающие к наибольшей потере информационной части

сигнала). Демодулятор приёмника с помощью ФМ сигналов в разработанной модели передачи дискретной информации сформирован на использовании согласованной фильтрации как механизме, оперативно противостоящем влиянию белого шума.

При помощи ФМ сигналов, как простых, так и сложных, передается информация в системе. В прототипе сложного сигнала в качестве кода используются или периодически повторяющиеся М-последовательности с периодом до 1023 бит, или предварительно указанная информационная последовательность (например, коды Баркера), или последовательность случайных двоичных символов длиной до 4096 бит. Количество информационных символов определяется обязательной статистической истинностью результата и лимитировано приемлемым временем расчёта. М-последовательность задается моделированием регистра-генератора и сопутствующим, точно определяющим ее генерирующим кодом.

На рис. 2 схематически изображён демодулятор сигналов ФМн-2, включающий согласованный фильтр, тактовый синхронизатор и решающее устройство.

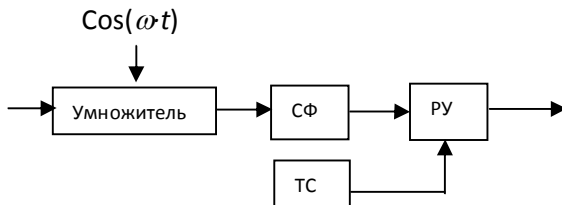


Рис. 2. Схема демодулятора сигналов ФМн-2:  
СФ – согласованный фильтр приема информационной посылки сигнала; РУ – решающее устройство;  
ТС – генератор тактовых импульсов (тактовый синхронизатор)

При обработке сигналов ФМн-4, СФМн-4, ММС заранее выделяется синфазная и квадратурная части сигнала, и уже выделенные составляющие обрабатываются как независимые сигналы ФМн-2. На рис. 3 приведена схема демодулятора для таких приёмников.

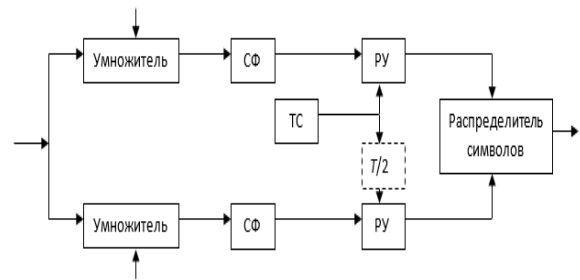


Рис. 3. Схема демодулятора сигналов ФМн-4, СФМн-4, ММС:  $T/2$  – задержка на половину длительности элементарной посылки при приеме сигналов СФМн-4 и ММС

Фильтры с прямоугольной формой амплитудно-частотной характеристики (далее АЧХ), а также фильтры Баттерворта несхожих порядков с компенсацией или без компенсации нелинейности группового времени запаздывания, используются в качестве передатчика и приемника в виде полосовых фильтров. В соответствии с определением согласованного фильтра, АЧХ этих фильтров в демодуляторах приемника формируется как комплексно сопряженная спектральная характеристика одной информационной посылки полезного сигнала.

Решающее устройство в тактовые моменты времени определяет знак и уровень сигнала. Если уровень сигнала превышает опорный уровень, то в зависимости от знака принимается тот или иной символ. В противном случае фиксируется «потеря» символа.

Тактовая синхронизация приемника происходит перед началом передачи информации путём моделирования прохождения плотного импульса в виде полезного сигнала. На выходе определяется момент времени, в который получаемый сигнал имеет максимальную амплитуду. Момент снятия значения первого информационного символа определяется полученной задержкой по времени. Последующие отсчитываются от первого путём прибавления временных интервалов, равных длительности информационной посылки полезного сигнала.

Число сбоев символов определяется сравнением «передаваемой» и «принятой» информационной последовательности с учетом неправильно принятых и «потерянных» символов.

На основе результатов снятия значения результирующего сигнала на выходе

согласованного фильтра в отрезки времени, определяемые процедурой тактовой синхронизации, создаётся гистограмма откликов, позволяющая исследовать влияние изменения параметров элементов передающих и приемных устройств, например, ширины полосы пропускания и коэффициента прямоугольности фильтра основной селекции приемника, на изменение вероятности неправильного приема символа.

Модель предполагает идеальную работу преобразователя частоты, системы разделения квадратурного и синфазного каналов, а также идеальную частотную и фазовую синхронизацию передатчика и приемника канала связи.

### Прототип, моделирующий помехи

Прототип, моделирующий помеховые воздействия на систему передачи дискретной информации ФМ сигналами, был разработан для определения ЗО.

Основные черты прототипа выявляются раздельным рассмотрением прохождения различных сигналов (полезных и мешающих) по приёмному тракту, а также построение гистограмм с указанием соответствующих уровней отклика и последующей сверткой полученных табличных графиков для нахождения вероятности сбоя за счет воздействия помех.

Представленная ранее схема моделируемой системы была дополнена моделью передатчика – источника НРП, построенной на основе модели происхождения ФМ-сигналов в радиопередатчике, увеличенной возможностью создания сигналов разных типов.

Во время разработки модели был расчёт на дальнейшее внесение новых элементов и процедур зарождения сигналов по мере исследования новых НРП.

На данном этапе в модели программно реализованы функции, воспроизводящие следующие виды модуляции помех: бинарную и четырехпозиционную фазовую манипуляцию (ФМн-2, ФМн-4, СФМн-4), ММС, а также двухпозиционную частотную манипуляцию (ЧМн-2), ЛЧМ, модуляцию по частоте гармоническим колебанием и пилообразным напряжением, а также ещё импульсную, и модуляцию, имитирующую генератор «белого шума».

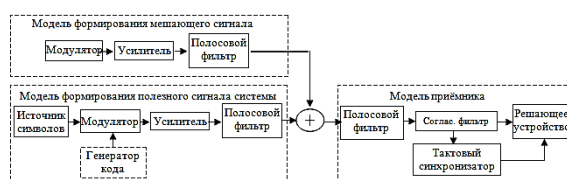


Рис. 4. Схема моделируемой системы передачи дискретной информации ФМ сигналами с учетом воздействия НРП

Сигнальный модулятор ЧМн-2 создаёт частотно-манипулированный сигнал с мгновенным переключением частот между значениями  $\omega_0 - D$  и  $\omega_0 + D$ , где  $\omega_0$  – центральная частота сигнала, а  $D$  – девиация частоты. На рис. 5 изображена амплитуда такого сигнала на временной оси.

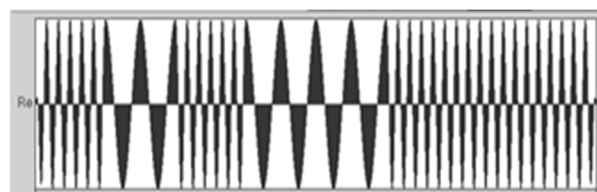


Рис. 5. Сигнал с бинарной частотной манипуляцией

Значение выходного напряжения в линейно частотном модуляторе в пределах длительности  $T$  может изменяться по следующему тождеству:

$$U(t) = U \cos \left( 2\pi t \left( f_0 + \frac{2D(t - T/2)}{T} \right) + \varphi_0 \right) \quad (1)$$

для вещественного представления сигнала и для комплексного.

$$s(t) = Ue^{-i \left( 2\pi t \left( f_0 + \frac{2D(t - T/2)}{T} \right) + \varphi_0 \right)} \quad (2)$$

Здесь же  $f_0$  – это несущая частота сигнала;  $D$  – значение девиации частоты сигнала;  $\varphi_0$  – это начальная фаза сигнала.

Помимо всего прочего, модель модулятора формирует сигналы, модулированные по частоте гармоническим колебанием. Формы представления таких сигналов имеют следующий вид:

Вещественная:

$$U(t) = U \cos(2\pi(f_0 + D \cos(2\pi f_m t + \varphi_{0m})) + \varphi_0)$$

Комплексная:

$$s(t) = Ue^{-i(2\pi(f_0 + D \cos(2\pi f_m t + \varphi_{0m})) + \varphi_0)}$$

где  $f_m$  – частота модулирующего колебания сигнала;

$\varphi_{0m}$  – начальная фаза модулирующего колебания сигнала.

Произведённая модель модулятора непреднамеренных помех предусматривает возможность формирования импульсных сигналов с заданной скважностью и с внутри-импульсной модуляцией любым из доступных видов сигналов.

Следующим образом создаётся генератор «Белого шума»: для непрерывного немодулированного сигнала в каждый определённый момент времени присваивается случайное значение фазы с помощью генератора случайных чисел и этот сигнал пропускается через выходной фильтр передатчика помехи.

В модели формирования помеховых воздействий для систем передачи дискретной информации ФМ сигналами образуются гистограммы ответа на полезный сигнал и НРП [3], на основе которых предполагается исполнение необходимых исследований. Гистограмма ответов на полезный сигнал системы возникает так же, как и в модели, представленной ранее, на основе результатов получения значения результирующего сигнала на выходе согласованного фильтра в отрезки времени, определяемые процедурой тактовой синхронизации. Гистограмма откликов на НРП формируется с учетом несогласованности полезного и мешающего сигналов по времени и фазе. То есть выявление значения отклика на входе решающего устройства осуществляется для каждого дискретного отсчета времени и для 100 равномерно распределенных значений начальной фазы мешающего сигнала. В предположении, что превышение уровня помехи над уровнем сигнала в половине случаев ведет к неверному приему символа, свертка полученных гистограмм даёт возможность определить вероятность появления сбоя из-за воздействия НРП [4].

## Выводы

Таким образом, в данной статье были разработаны две модели. Первый прототип, имитирующий систему передачи дискретной информации ФМ сигналами, позволяет оценить изменение вероятности сбоя, то есть изменение качества функционирования системы за счет искажающих воздействий полосовых фильтров передатчика и приемника. При этом в качестве полезных сигналов системы рассматриваются простые и сложные ФМ сигналы двух и четырехпозиционные с различными формами огибающей элементарной посылки, а также сигналы ММС. Второй прототип, имитирующий помехи, воздействующие на систему передачи дискретной информации фазоманипулированными сигналами, позволяет определить влияние параметров НРП на вероятность сбоя.

## Литература

1. Остроумов И.В. Разработка имитационных моделей систем передачи дискретной информации с использованием простых и сложных фазо- и частотно-манипулированных сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 74-76.
2. Макаров О.Ю., Ромашенко М.А. Основные принципы применения программных средств при решении задач обеспечения ЭМС и помехоустойчивости // Радиотехника. 2013. № 3. С. 98-102.
3. Марков Ю.В. Проектирование устройств приема и обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. С. 39, 47-54.
4. Агеев Р.В., Хоменков Ю.Н. Способ синхронизации М-последовательности. СПб.: Центральный научно-исследовательский институт "Гранит", 1994. С. 3-5.

Поступила 26.03.2018; принята к публикации 11.05.2018

## Информация об авторах

**Остроумов Иван Владимирович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Ромашенко Михаил Александрович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14) e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>



Ижокина Татьяна Дмитриевна - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mrx884@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

## PROTOTYPES MODELING A SYSTEM OF DISCRETE INFORMATION TRANSMISSION AND INTERFERENCE BY PHASE-COMPENSATING METHOD

I.V. Ostroumov, M.A. Romashchenko, T.D. Izhokina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article presents the device of formation and reception of a useful signal of a system. The prototype of transmission of discrete information by means of phase-manipulated signals is considered, where the receiver demodulator is based on the use of consistent filtering, which is most opposed to the effects of white noises. The code in the prototype of a complex signal is used either periodically repeating M-sequences with a period of up to 1023 bits, or initially given an information logical regularity, such as Barker code or a chaotic series of binary characters with a number of up to 4096 bits. In the illustrative example, diagrams of demodulator signals were presented: PM-2, PM-4, SPM-4, MMS. The synchronization of the receiver and a detailed description of its operation are considered. To solve the task of determining the protective ratio of signal/noise, a prototype was developed, simulating the effect of interference on the transmission line of discrete information by phase-manipulated signals. The main function of the prototype is the separate consideration of the passage of various useful and interfering signals along the receiving path, and also the construction of histograms. During the development of the model, a calculation was made for the further introduction of new elements and procedures for the generation of signals as new unintentional radio interference was investigated. Based on the value of the resulting signal at the output of the matched filter in the time interval, histograms of the response to the useful signal and unintentional radio interference were formed in the model. The developed model allows to determine the influence of the parameters of the URI on the probability of a failure

**Key words:** phase-shift keyed signal, discrete information, prototype, signal modulator

### References

1. Ostroumov I.V. "Development of simulation models of systems of discrete information transmission with the use of simple and complex phase - and frequency - manipulated signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 74-76.
2. Makarov O.Yu., Romashchenko M.A. "Basic principles of the use of software in solving problems of ensuring EMC and immunity", *Radiotekhnika*, 2013, no. 3, pp. 98-102.
3. Markov Yu.V. "Designing devices for receiving and processing signals. Manual" ("Proektirovanie ustroystv priyema i obrabotki signalov: ucheb.-metodich. posobie") Ekaterinburg, UFU, 2015, pp. 39, 47-54.
4. Ageev R.V., Khomenkov Yu.N. "Method of synchronization M-sequence" ("Sposob sinkhronizatsii M-posledovatel'nosti"), Saint Petersburg, CSRI "Granit", 1994, pp. 3-5.

Submitted 26.03.2018; revised 11.05.2018

### Information about the authors

**Ivan V. Ostroumov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kibr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Tat'yana D. Izhokina**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mrx884@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-3257>

## СРАВНЕНИЕ СЛОЖНОСТИ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ И ИСПРАВЛЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДЕКОДЕРОВ С ПАМЯТЬЮ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПРОГНОЗОВ (TFM) И ВНЕШНЕЙ ПАМЯТЬЮ (ЕМ)

© 2018 И.В. Свиридова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлена аппаратная архитектура стохастического декодирования LDPC-кодов на факторных графах. Предложенная архитектура делает полностью параллельное декодирование (длинных) современных LDPC-кодов, работающих на ПЛИС. Рассматривается влияние TFM-подхода на общую аппаратную сложность и декодирование в ASIC стохастических декодерах. Идет процесс сравнения декодирования и ASIC-применения в TFM-декодерах и двух EM-декодерах. Предложено TFM заменить EM в стохастических декодерах ASIC. Описаны различные аппаратные архитектуры для внедрения TFM в ASIC и их влияние на сложность стохастических информационных узлов. Приведены примеры стохастических декодеров ASIC, которые декодируют (1056 528) LDPC-код, выбранный из стандарта IEEE 802.16 (WiMAX), вследствие чего показано, что TFM могут обеспечивать аналогичную или лучшую производительность декодирования по сравнению с EM, имея значительно меньшую аппаратную сложность. TFM значительно уменьшает общую поверхность применения ASIC-схем для стохастических LDPC-декодеров. Расход кремниевой поверхности данного ASIC TFM (1056,528) LDPC-декодера составляет на 40% и 65% меньше расхода поверхности ASIC EM LDPC-декодера с 32-битной и 64-битной EM соответственно

**Ключевые слова:** стохастический декодер, TFM-декодер, EM-декодер

### Введение

Коды LDPC представляют собой семейство кодов коррекции ошибок, первоначально предложенных Галлагером в начале 1960-х годов. Декодирование LDPC-кодов демонстрирует высокий уровень параллелизма, который масштабируется с длиной кода. Поэтому коды LDPC особенно интересны для применения с высокой пропускной способностью. Практические коды LDPC обычно имеют длину выше 103 бит, а схемы декодирования, которые полностью используют доступный параллелизм кода, становятся сложными для реализации. Одна из основных трудностей связана с перемежителем, который доставляет сообщения между переменными узлами и узлами проверки. Стохастическое декодирование было введено как альтернатива алгоритму распространения доверия (SPA), которая имела потенциал для достижения аналогичной производительности. Однако только декодирование коротких кодов привело к непревзойденной производительности.

В данной статье представлена память отслеживания прогнозов (TFM) на замену внешней памяти (EM) в интегральных схемах специального назначения стохастических декодеров. TFM могут обеспечить улучшенные

результаты декодирования, имея сложное аппаратное оборудование. Память отслеживания прогнозов (TFM) заменяет внешнюю память (EM) в стохастических информационных узлах и, будучи похожей на EM, TFM используется для облегчения проблемы фиксации и переключательной деятельности посредством рерандомизации / декодирования стохастических потоков.

### Сравнение стохастических декодеров с TFM и EM памятью

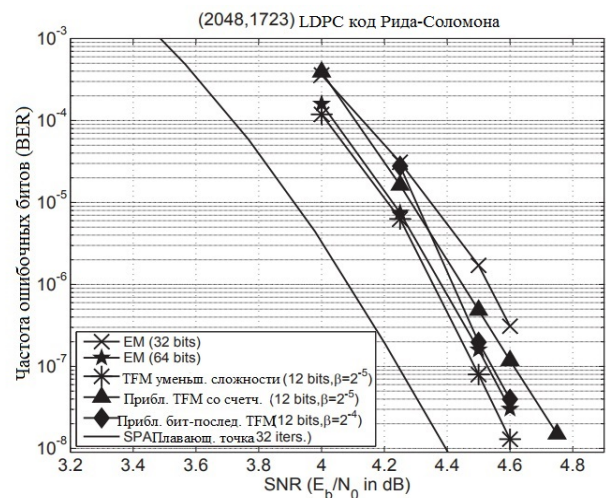


Рис. 1. Сравнение декодирующей результативности EM и TFM

На рис. 1 идет сравнение производительности EM и TFM подходов для декодирования (2048,1723) LDPC-кода с информационным узлом 6 степени и псевдослучайными помехами 32 степени, взятого из стандарта физического уровня сети 10 Гб Ethernet. Рис. 1 показывает декодирование 32-битного EM, 64-битного EM, 12-битного TFM уменьшенной сложности, 12-битного разрядно-последовательного TFM и 12-битного, основанного на счетчике TFM подходов [1].

Для всех этих подходов символы, полученные из канала, квантуются до 6 бит и используется коэффициент масштабирования  $\gamma = 1.33$ . Также используется раннее завершение декодирования (основанное на проверке синдромов) до максимального числа 400 циклов декодирования. Как показано, 12-битная TFM с уменьшенной сложностью превосходит 64-битную и 32-битную EM для декодирования (2048,1723) LDPC кода.

Таблица 1  
Сравнение TFM и EM информационных узлов 6 степени в ПЛИС технологии 90 нм.

Модуль и архитектура	Площадь в $\mu\text{m}^2$ и кол-во логич-х вентилей	Тактовый интервал в ps	Площадь в $\mu\text{m}^2$ и кол-во логич-х вентилей при 500 ГГц
Переменный узел в EM (32 бит)	(13860,2525)	283	(7133,1299)
Переменный узел в EM (64 бит)	(22575,4112)	287	(12255,2232)
Переменный узел в бит-последовательной TFM (12 бит)	(9223,1670)	263	(4352,793)
Переменный узел в TFM, основанной на счетчике (12 бит)	(9111,1660)	312	(5318,969)
Переменный узел TFM уменьшенной сложности (12 бит)	(14989, 2730)	354	(5924, 1079)

Табл. 1 показывает потребление поверхности кремния, счетчик И-НЕ логической матрицы с 2 входами и максимально достижимый тактовый интервал для стохастического информационного узла 6 степени в ПЛИС технологии 90 нм. Таблица

разделена на две части. Результаты, показанные в первой (левой) части, получены для синтезирования максимально возможной скорости. Поэтому, как показано во второй (правой) части, получение меньшего расхода поверхности кремния может быть достигнуто синтезированием модулей для сниженного показателя тактовой частоты. Первая часть таблицы подтверждает, что стохастические узлы могут работать очень быстро, с тактовой частотой выше 2.5 ГГц.

В отношении поверхности расхода, как показывает вторая часть таблицы, информационный узел TFM уменьшенной сложности потребляет около 48% поверхности кремния информационного узла 64-битной EM и около 83% поверхности кремния информационного узла 32-битной EM. Кроме того, можно еще больше снизить поверхность потребления информационного узла TFM примерно на 10% до 26% с помощью использования приближенной TFM архитектуры и приближенной разрядно-последовательной TFM архитектуры [2].

Нерегулярный (1056,528) LDPC-код, выбранный из стандарта IEEE 802.11n (WiMAX), дешифрует все декодеры. Вероятность ошибочных битов (BER) декодирования предложенного метода TFM для дешифрирования LDPC-кода представлена на рис. 2.

(1056,528) LDPC код с перем. узлами в {2,3,6} степ. и узлами контрола по четности в {6,7} степ.

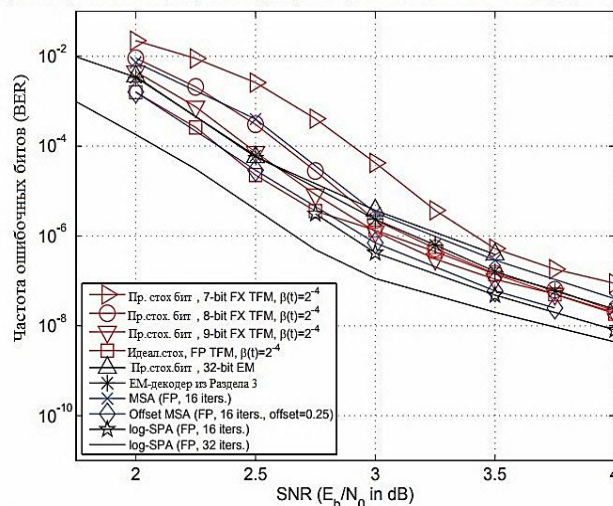


Рис. 2. Результаты декодирования для (1056,528) LDPC-кода (FP: плавающая точка, FX: фиксированная точка)

Для того, чтобы продемонстрировать воздействие квантования вероятности в TFM архитектуре в декодировании, представим

рисунок, показывающий функционирование применения TFM с плавающей точкой, а также функционирование 9-битной, 8-битной и 7-битной TFM с фиксированной точкой.

Кроме того, с целью сопоставления, этот рисунок также демонстрирует процесс декодирования алгоритма распространения доверия с плавающей точкой, min-sum алгоритм с плавающей точкой и min-sum алгоритм со смещением плавающей точки. На рис. 2 видно работу двух EM стохастических декодеров, которые дешифрируют (1056,528) LDPC-код: EM декодер, описанный, который использует 64-битную, 48-битную и 32-битную EM для переменных узлов 6, 3 и 2 степени соответственно, и EM стохастический декодер, использующий 32-битную EM для каждого переменного узла.

Все стохастические декодеры на рис. 2 используют досрочное завершение, максимум 700 циклов декодирования и коэффициент масштабирования  $\gamma = 0.5$ . Стоит отметить, что в случае применения плавающей точки используется «идеальное» стохастическое декодирование, а случайные числа в стохастическом декодере не переходят в общий доступ. Для моделирования стохастических битов прямого кода рассматривается использование фиксированной точки в TFM, а символы, полученные из канала, квантуются до 6 бит. Также случайные числа генерируются распределительным механизмом рандомизации (DRE), подобным тому, который использовался в (1056,528) EM стохастическом декодере. Данный распределительный механизм рандомизации (DRE) содержит в себе 48 независимых генераторов случайных чисел (двигателей рандомизации).

Каждый генератор случайных чисел состоит из двух 10-битных регистров сдвига с линейными обратными связями (LFSR) и производит (псевдо) случайное число, которое поделено между 22 переменными узлами (выполняя операцию исключающего ИЛИ (XOR) над разными битами регистра сдвига с линейными обратными связями). Таким образом, в общей сложности,  $1056/22 = 48$  случайных чисел приобретаются для всего декодера в каждом цикле декодирования.

Как показано на рис. 2, TFM с плавающей точкой превосходит EM-декодер по соотношению сигнал-помеха [3].

Производительность декодирования в стохастических декодерах с 9-битной TFM с

фиксированной точкой и 8-битной TFM с плавающей точкой (с разделенными случайными числами) аналогична производительности функционирования TFM с плавающей точкой с низкой вероятностью битовых ошибок (BER) (высоким соотношением сигнал-шум (SNR)). Декодер с 9-битной TFM с фиксированной точкой показывает такую же производительность, как и EM-декодер и превосходит 32-битный EM стохастический декодер.

Он также превосходит Min-Sum алгоритм с плавающей точкой с 16 итерациями, и при низком соотношении сигнал-шум (SNR) он обладает производительностью, сравнимой с производительностью офсетного Min-Sum алгоритма с 16 итерациями. Потеря производительности декодера с 9-битной TFM составляет около 0,5 дБ и 0,25 дБ, по сравнению с алгоритмом распространения доверия (SPA) с 32 и 16 итерациями соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что 8- или 9-битный TFM с фиксированной точкой является достаточным для обеспечения аналогичной производительности декодирования (1056,528) нерегулярного LDPC-кода. Однако поскольку производительность декодирования 8- и 9-битных TFM похожа в режимах при низкой вероятности битовых ошибок (высоким соотношением сигнал-шум), целесообразно применение LDPC-декодеров [4].

Для изучения влияния TFM на общую поверхность стохастического декодера мы будем использовать два EM и один TFM полностью параллельные стохастические LDPC-декодеры, дешифровавшие (1056,528) нерегулярный LDPC-код. TFM-декодер использует 8-битную TFM систему и EM-декодер использует 64- и 32-битную EM. Все декодеры синтезируются в технологии ST Microelectronics 90 нм 1V ПЛИС-технологии и работают на частоте 500 МГц. Нужно обратить внимание, что с данной тактовой частотой полностью параллельный стохастический LDPC-декодер способен обеспечить пропускную способность со скоростью в несколько Гб/с при низкой вероятности битовых ошибок (высоким соотношением сигнал-шум). В табл. 2 приведены синтезированные результаты для поверхности и счетчик И-НЕ логической матрицы с 2 входами декодера. Как показано, TFM значительно снижает аппаратную сложность



стохастического декодера. Площадь и логический вентиль TFM-декодера составляет около 60% от поверхности и логического вентиля 32-битного EM-декодера и 35% - 64-битного EM-декодера. Также возможно приблизительно сравнить удельную эффективность поверхности (1056,528) TFM-декодера с другими декодерами в специальной литературе. К примеру, 8-битный TFM-декодер имеет 517К/1056 ~ 489 количество транзисторных переключателей на кодированный бит (после синтезирования), что значительно меньше, чем 2230К/2048 ~ 1088 (после синтезирования), соответствующих бит-последовательному (2048,1723) LDPC-декодеру, основанному на Min Sum алгоритме.

Таблица 2

Синтезированные результаты для EM и TFM (1056,528) стохастических LDPC-декодеров на ПЛИС 90nm технологии. Все декодеры синтезированы для тактовой частоты в 500 МГц

Декодер	Площадь (мм <sup>2</sup> )	Логич. вентиль
EM-декодер (64-битная EM)	7.890	1437 К
EM-декодер (32-битная EM)	4.604	838 К
TFM-декодер (8-битная TFM)	2.841	517 К

Поступила 20.03.2018; принята к публикации 11.05.2018

#### Информация об авторах

Свиридова Ирина Владимировна - ассистент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [ri-ss-ka@mail.ru](mailto:ri-ss-ka@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

## COMPARISON OF DIFFICULTY OF HARDWARE IMPLEMENTATION AND CORRECTIVE CAPACITY OF STOCHASTIC DECODERS WITH TFM AND EM MEMORY

I.V. Sviridova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article presents the hardware architecture of stochastic decoding of LDPC codes on factor graphs. The proposed architecture makes completely parallel decoding of (long) modern LDPC codes working on FPGAs. This article also discusses the impact of the TFM approach on the overall hardware complexity and decoding of stochastic decoders in ASIC. The article shows the process of comparing decoding and ASIC applications in TFM decoders and two EM decoders. It is suggested to replace TFM by EM in stochastic ASIC decoders. Various hardware architectures for implementing TFM in ASIC and their impact on the complexity of stochastic information nodes are described. Examples of stochastic ASIC decoders

#### Выводы

В данной статье представлена TFM для эффективной рерандомизации и декорреляции стохастического битового потока в стохастических канальных декодерах. Была описана разнообразная архитектура для ASIC применения TFM, было показано, что TFM может так же или лучше выполнять битовое сканирование ошибок, чем EM в декодировании современных LDPC-кодов, имея меньший расход поверхности кремния.

#### Литература

1. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие; под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. 126 с. - ISBN 5-93517-169-4.
2. Свиридова И.В., Башкиров А.В., Муратов А.В. Эффективное многопороговое декодирование недвоичных кодов с предварительной оценкой ошибочности проверок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 99-101.
3. Свиридова И.В., Коротков Л.Н. Алгоритмы декодирования двоичных кодов с малой плотностью проверок на четность с жестким входом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 108-111.
4. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.



that decode (1056 528) LDPC code selected from the IEEE 802.16 (WiMAX) standard are also given. As a result, it was shown that TFMs can provide similar or better decoding performance compared to EM, with significantly less hardware complexity. TFM significantly reduces the overall application surface of ASIC circuits for stochastic LDPC decoders. The silicon surface of this ASIC TFM (1056,528) LDPC decoder is 40% and 65% smaller than the surface area of the ASIC EM LDPC decoder with 32-bit and 64-bit EM, respectively

**Key words:** stochastic decoder, TFM decoder, EM decoder

#### References

1. Zolotaryev V.V., Ovechkin G.V. "Interference-free coding. Methods and algorithms. Manual" ("Pomekhoustoychivoe kodirovanie. Metody i algoritmy: ucheb. posobie"), Moscow, the reference edition, 2004, 126 p.
2. Sviridova I.V., Bashkirov A.V., Muratov A.V. "Effective multithreshold decoding of non-binary codes with a preliminary estimate of the erroneousness of the checks", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 99-101.
3. Sviridova I.V., Korotkov L.N. "Algorithms for decoding binary codes with a low density of parity checks with a hard input", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 108-111.
4. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 70-73.

Submitted 20.03.2018; revised 11.05.2018

#### Information about the author

**Irina V. Sviridova**, Assistant, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

## МОДЕЛЬ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ К ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

© 2018 В.В. Глогов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** решение вопросов электромагнитной совместимости становится в настоящее время неотъемлемым элементом деятельности предприятий - разработчиков и изготовителей технических средств, основой которых, как правило, являются печатные узлы. Рассматривается модель восприимчивости печатных плат к внешним электромагнитным воздействиям. Предлагается использование критериального подхода при проектировании радиоэлектронных средств с учетом обеспечения помехоустойчивости и помехозащищенности. Предложенная модель в проектировании позволяет решить задачи применения оптимальных схемотехнических и конструкторских решений при проектировании помехозащищенных радиоэлектронных средств. Однако в радиотехнике задачи по оптимизации на практике исследованы очень мало, в основном по двум очень весомым аргументам. Первая причина - это постоянная смена элементной базы и связанное с этим стремление решить все проблемы за этот счет. Второй причиной можно считать бурное развитие теории и расширение областей применения радиоэлектронных средств, что сопровождается многократной сменой принципов действия и конструкций. В статье дана краткая характеристика задач по оптимизации радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости. Показана упрощенная модель линии передачи при анализе восприимчивости

**Ключевые слова:** проектирование радиоэлектронных средств, помехозащищенность, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, методы проектирования, оптимизация

### Введение

Рассмотрение вопросов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) при проектировании печатных плат (ПП) радиоэлектронных средств (РЭС) становится все актуальнее из-за непрерывного увеличения числа сложных радиоэлектронных систем и комплексов [1]. Обеспечение помехозащищенности и помехоустойчивости, как комплексная задача обеспечения качества проектируемых РЭС, в своей постановке предусматривает решение задачи оптимизации [2]. В такой постановке задача чрезвычайно сложна и приходится исследовать методы проектирования в целом, в то время как задача помехоустойчивости решается для отдельных блоков и узлов.

### Модель восприимчивости печатной платы

Восприимчивость изделия к излучению электронных устройств рассматривается путем получения упрощенных моделей, которые дают значения напряжений и токов, наведенных в системе параллельных проводников падающей плоской электромагнитной волной. Рассмотрим структуру из параллельных проводников линии передачи длиной  $l$ , которая возбуждается плоской электромагнитной волной, как показано на рис. 1. Провода разнесены на расстояние  $s$  и имеют сопротивления нагрузки  $R_S$  в точке  $x=0$

(начало линии) и  $R_l$ , в точке  $x=l$  (конец линии). Провода параллельны оси  $x$ .

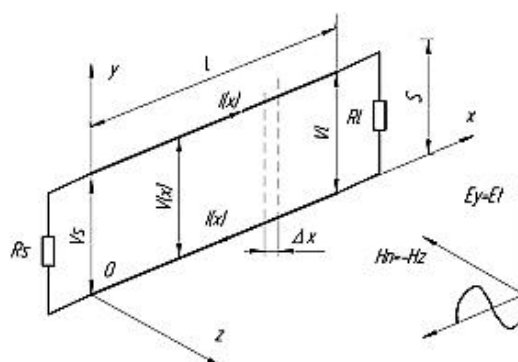


Рис. 1. Модель восприимчивости печатной платы под воздействием продольной электромагнитной волны

Целью прогнозирования восприимчивости является определение напряжений  $V_S$  на входе линии и  $V_l$  на выходе линии, при воздействии синусоидального установившегося электрического поля  $E$  в виде плоской волны, при изменении ее поляризации и направления распространения. Линия передачи характеризуется удельными параметрами: индуктивностью  $L_l$  и емкостью  $C_l$ . Для длинной линии модель формируется набором LC-звеньев, как показано на рис. 2.

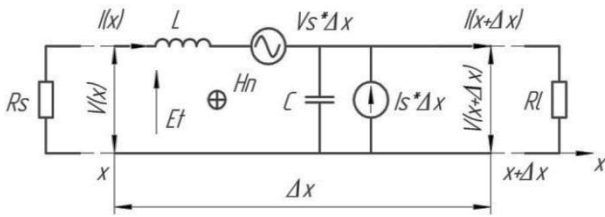


Рис. 2. Наведенные токи и напряжения в элементарном отрезке линии передачи

Определим удельные источники  $\dot{V}_S$  и  $\dot{I}_S$ , индуцированные возбуждающей волной, исходя из следующих соображений. Сначала рассмотрим нормальную компоненту вектора интенсивности возбуждающего магнитного поля  $\dot{H}_n^i$ . Закон Фарадея показывает, что это вызывает ЭДС в контуре, ограниченном проводниками:

$$e = j\omega\mu_0 \int_S \dot{H}_n^i dS = j\omega\mu_0 \Delta x \int_{y=0}^s \dot{H}_n^i dy \quad (1)$$

где  $S$  - площадь контура;  $s$  - размер зазора между проводниками.

Данная индуцированная ЭДС может рассматриваться как источник напряжения, чья полярность, согласно закону Ленца, вызывает ток и соответствующее магнитное поле, которое препятствует любому изменению возбуждающего магнитного поля. Таким образом, для вектора интенсивности возбуждающего магнитного поля отрицательного направления  $z$  (в страницу) положительный конец источника будет слева. Для отрезка  $\Delta x$  удельный источник напряжения можно получить, поделив результат на  $\Delta x$

$$\dot{V}_S(x) = j\omega\mu_0 \int_{y=0}^s \dot{H}_n^i dy \quad (2)$$

Удельный источник тока  $\dot{I}_S$  имеет направление  $+y$ , определяется вектором возбуждающего электрического поля, который является поперечным к линии, имеет направление  $+y$  и равен:

$$\dot{I}_S(x) = -j\omega C_l \int_{y=0}^s \dot{E}_t^i dy = -j\omega C_l \int_{y=0}^s \dot{E}_y^i dy \quad (3)$$

Данный источник является дуальным по

отношению к  $\dot{V}_S$ . Возбуждающее электрическое поле вызывает напряжение между двумя проводниками, которое порождает ток смещения в полном сопротивлении удельной емкости  $1/(j\omega C_l \Delta x)$  между ними.

Модель, изображенная на рис. 4, применима к возбуждающим полям в виде неоднородных плоских волн, таких как магнитные поля от близлежащих трансформаторов, но в этом случае возбуждающие поля вычислить достаточно трудно.

От удельной модели можно перейти к уравнениям линии передачи (телеграфным уравнениям), которые связывают напряжение и ток вдоль линии. Точное решение этих уравнений не является необходимым для инженерной оценки, и поэтому будет получено приближенное решение.

Упрощенное рассмотрение предполагает, что линия передачи является электрически короткой на интересующей частоте, таким образом, можно сосредоточить распределенные параметры, используя при рассмотрении всей линии только одно звено, изображенное на рис. 3. При этом следует заменить  $\Delta x$  на  $l$ , умножив удельные параметры и источники на полную длину линии  $l$ . Хотя наведенные напряжения могут быть рассчитаны из этой модели для электрически коротких линий, можно сделать окончательное упрощение для получения простейшей модели, которая применима для различных практических ситуаций.

### Выводы

В простейшей модели, представленной на рис. 3, нет необходимости рассматривать удельные индуктивные и емкостные параметры. Кроме того, если расстояние между проводниками намного меньше, чем длина проводника, следовательно, электрически короткое, то векторы поля существенно не меняются вдоль поперечного сечения провода (по координате  $y$ ). Поэтому интегралы в источнике относительно  $y$  могут быть заменены значениями расстояния  $s$  между проводниками, что позволяет получить следующие выражения для индуцированных напряжений и токов для всей линии на длине  $l$

$$\dot{V}_S l = j\omega\mu_0 \dot{H}_n^i S, \dot{I}_S l = j\omega C_l \dot{E}_t^i S \quad (4)$$

где  $S$  – площадь контура,  $S = s \cdot l$ .

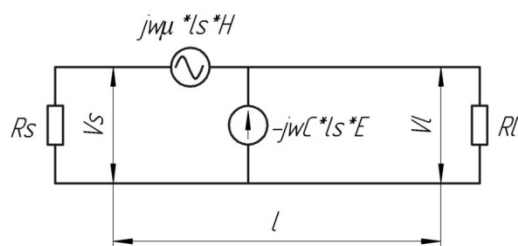


Рис. 3. Упрощенная модель линии передачи при анализе восприимчивости

Из этой модели, используя принцип суперпозиции, легко вычислить индуцированные напряжения на концах линии:

$$\dot{V}_S = \frac{R_S}{R_S + R_L} j\omega\mu_0 \cdot l \cdot s \cdot \dot{H}_n^i - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega C_1 \cdot l \cdot s \cdot \dot{E}_n^i \quad (5)$$

$$\dot{V}_L = \frac{R_L}{R_S + R_L} j\omega\mu_0 \cdot l \cdot s \cdot \dot{H}_n^i - \frac{R_S R_L}{R_S + R_L} j\omega C_1 \cdot l \cdot s \cdot \dot{E}_n^i \quad (6)$$

Поступила 19.02.2018; принята к публикации 11.05.2018

#### Информация об авторах

**Глотов Вадим Валерьевич** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

## MODEL OF PRINTED BOARDS SUSCEPTIBILITY TO EXTERNAL ELECTROMAGNETIC EXPOSURE

V.V. Glotov

Voronezh State Technical University

**Abstract:** solving the issues of electromagnetic compatibility is now becoming an integral part of the activities of enterprises - developers and manufacturers of technical equipment, the basis of which, as a rule, are printed nodes. The article considers a complex approach in the design of radioelectronic facilities taking into account the provision of electromagnetic compatibility parameters. The use of the criterial approach in the design of radio-electronic facilities is proposed taking into account the provision of noise immunity and noise stability. The proposed approach in the design allows to solve the problems of applying optimal circuit and design solutions in the design of noise-free radioelectronic facilities. However, in radio engineering, optimization problems in practice have been studied very little, mainly for the reason two very weighty arguments. The first reason is the constant change of the element base and the related desire to solve all the problems in this regard. The second reason is rapid development of the theory and expansion of the fields of application of radio electronic means, which is accompanied by a multiple change in the principles of action and design. The article gives a brief description of the tasks of optimizing radio-electronic means with regard to electromagnetic compatibility. The same method is described - the optimization of a radio receiver as a multidimensional filter

**Key words:** design of radioelectronic devices, noise immunity, noise stability, electromagnetic compatibility, design methods, optimization

#### Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.
2. Электронный каталог Лаборатория ЭМС. Электрон. дан. Режим доступа: <http://www.emc-problem.net>.
3. Макаров О.Ю. Муратов А.В., Ромащенко М.А. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.
4. Глотов В.В., Ромащенко М.А. Методика оценки электромагнитных характеристик печатных плат в закрытых конструкциях// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 71-74.
5. Глотов В.В. Оптимизация дипольной модели путем генетических алгоритмов// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 87-91.

**References**

1. Kechiev L.N. "Design of printed circuit boards for high-speed digital hardware" ("Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury"), Moscow, OOO "Grupa IMT", 2007, 616 p.
2. OPAC EMC Laboratory, available at: <http://www.emc-problem.net>.
3. Makarov O.U., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods of providing intra-equipment electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic devices: monograph" ("Metody obespecheniya vnutriapparaturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktsiyakh elektronnykh sredstv: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2013, 234 p.
4. Glotov V.V., Romashchenko M.A. "A technique for estimating the electromagnetic characteristics of printed circuit boards in closed constructions", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 2, pp. 71-74.
5. Glotov V.V. "Optimization of a dipole model via genetic algorithms", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 87-91.

Submitted 19.02.2018; revised 11.05.2018

**Information about the author**

**Vadim V. Glotov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia),  
e-mail: [vadik-livny@mail.ru](mailto:vadik-livny@mail.ru)



## РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

© 2018 И.В. Остроумов, М.А. Ромащенко, Д.С. Андреева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается комплексный подход к процессу влияния параметров фазоманипулированных сигналов на ЭМС РЭС, а также предлагаются структура решения задач моделирования и оптимизации соответствующей модели и методика создания модели формирования сигналов в радиопередатчике. Объектом разработки является модель, использующая аппарат БПФ, которая производит представление выборки значений постоянного импульса на оси времени. Имитируется пошаговое следование созданного в модуляторе сигнала через усилитель мощности и полосовой фильтр на выходе передатчика. В качестве полосовых фильтров в модели формирования фазоманипулированных сигналов рассматриваются фильтры Баттерворта различных порядков. Рассмотрен способ повышения коэффициента полезного действия усилительного тракта. Описаны различные механизмы генерирования огибающих различных вариаций и их влияние на спектральные характеристики сигнала, а следовательно, и на характеристики РЭС по ЭМС. Для систематического представления прямоугольных импульсов различной полярности учтена возможность синусоподобного сглаживания межсимвольных переходов. Рассмотрены структурная схема модели представления фазоманипулированного импульса в радиопередатчике, графики комплексного представления фазоманипулированных сигналов, а также схема модулятора сигналов. Принята во внимание имитация процесса формирования кодированных дискретных импульсов, проанализирован эффект амплитудно-фазовой конверсии

**Ключевые слова:** фазоманипулированные импульсы, радиопередатчик, модулятор сигнала

### Введение

В ходе изучения влияния параметров фазоманипулированных импульсов на ЭМС РЭС был создан целостный прототип формирования сигналов в радиопередатчике, позволяющий получать дискретные представления фазовых манипуляций импульсов с различными формами огибающей элементарной посылки импульсных и постоянных во временной области и на оси частот. В модели, использующей аппарат БПФ, осуществляется представление выборки значений постоянного импульса на оси времени с взаимосогласованными заданными параметрами в начальных и конечных точках рассматриваемого временного промежутка, позволяющими исключить искажение и деформацию получаемой спектральной характеристики непрерывных сигналов, далее представление их при выполнении БПФ как бесконечно-периодических, помимо этого, представление изменения фазы выходного импульса в усилительном каскаде передатчика с учетом его амплитуды позволяет предусмотреть эффект амплитудно-фазовой конверсии [1].

Целью работы было создание модели формирования фазоманипулированных сигналов как простых, так и сложных, с помощью которых передается информация в системе.

### Методика

Для представления сигнала в радиопередатчике используется дальнейшая целостная схема:

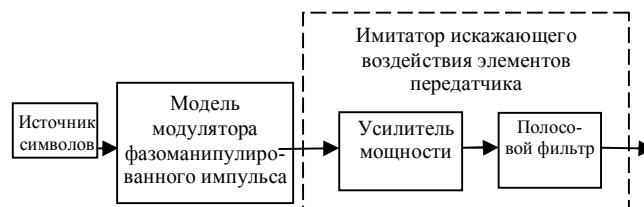


Рис. 1. Схема модели представления фазоманипулированного импульса в радиопередатчике

Данная модель сформирована для имитации процесса прохождения сигналов с бинарной и четырехпозиционной фазоманипуляцией (ФМн-2, ФМн-4) и четырехпозиционной фазоманипуляцией со смещением (СФМн-4), с различными формами огибающей элементарной посылки, а также

сигналов с минимальной манипуляцией сдвигом по частоте (ММС). Прототип бинарных фазовых манипуляций импульсов ФМн-2 для каждого сигнала образует прямоугольный импульс напряжением  $+U$  (если символ «1») либо  $-U$  (если символ «0»).

Для получения прототипа импульсами с четырехпозиционной фазовой манипуляцией ФМн-4, СФМн-4 сигнал образуется в виде независимых синфазных и квадратурных формирований путем умножения синфазной составляющей на  $\cos(\omega_0 t)$ , а квадратурной на  $\sin(\omega_0 t)$ , где  $\omega_0$  – несущая частота импульса. Кроме того, для сигналов СФМн-4 устанавливается задержка одного из каналов на половину длительности однозначной посылки, что позволяет избавиться от скачков фазы на  $180^\circ$ , но в то же время делает фазовые переходы многократными.

Схема модулятора сигналов ФМн-4, СФМн-4 изображена на рис. 2.

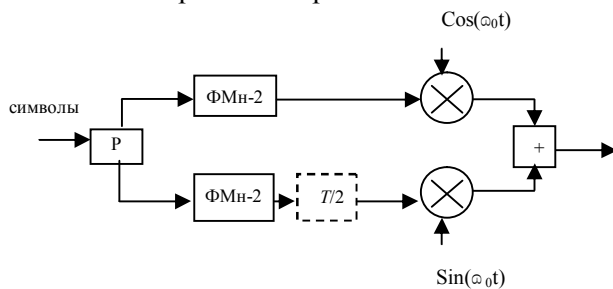


Рис. 2. Схема модулятора сигналов ФМн-4, СФМн-4

На данной схеме используются следующие обозначения:

- $P$  – распределитель символов по каналам;
- ФМн-2 – модулятор сигналов вида ФМн-2;
- $T/2$  – задержка на половину периода элементарной посылки при генерации сигналов СФМн-4;

- $\otimes$  умножитель;
- $\oplus$  сумматор.

В прототипе схемы синфазная и квадратурная компоненты четырехпозиционного фазового манипулированного импульса дотированы как вещественная и мнимая части комплексного представления сигнала.

На рис. 3 изображены графики комплексного выражения на оси времени фазоманипулированных сигналов (ФМн-2, ФМн-4 и СФМн-4) на видеочастоте.

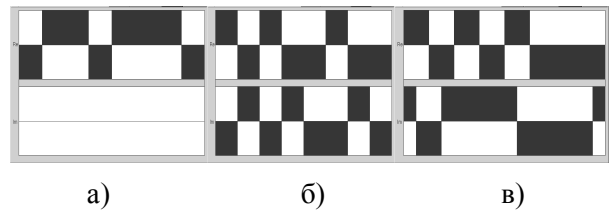


Рис. 3. Графики комплексного представления фазоманипулированных сигналов: а) ФМн-2; б) ФМн-4; в) СФМн-4

Ввиду того, что одним из преимущественно немаловажных факторов, влияющих на спектральные характеристики сигнала, а следовательно, и на характеристики РЭС по ЭМС, является форма огибающей элементарной посылки  $F(t)$ , в образце предусмотрены механизмы генерирования огибающих различных вариаций. Помимо этого, для бинарных фазовых манипуляций импульсов с колоколообразной огибающей элементарной посылки форма представления огибающей задается только синусоидой или же с помощью полиномов Лежандра [2].

Огибающая в виде синусоидальной кривой элементарной посылки задается с помощью уравнения:

$$F(t) = U \sin\left(\pi \frac{t}{T}\right) \quad (1)$$

На рис. 4 изображен график такого сигнала в форме картинка, у которого модель огибающей элементарной посылки задается с помощью уравнения (1).



Рис. 4. Вид бинарного фазоманипулированного импульса синусоидальной огибающей элементарной посылки

С помощью функций Лежандра огибающая элементарной посылки задается следующим уравнением:

$$F(t) = U \sin(a_0 P_0(2tT-1) + a_1 P_1(2tT-1) + \dots + a_L P_L(2tT-1)) \quad (2)$$

где  $a_i$  – коэффициенты, определяющие форму огибающей ( $i=0..L$ );

$P_i(x)$  – функция Лежандра  $i$ -й степени;

$T$  – длительность элементарной посылки.

В таблице представлен пример возможных значений коэффициентов  $a_i$  для огибающей элементарной посылки бинарного

фазоманипулированного импульса, заданной в виде соотношения (2).

Пример возможных значений коэффициентов  $a_i$  в соотношении (2), задающих колоколообразную огибающую элементарной посылки

$i$	$a_i$	$P_i(x)$
0	0,785398	1
1	0,748528	$x$
3	-0,070611	$(5x^3-3x)/2$
5	-0,001126	$(63x^5-70x^3+15x)/8$

На рис. 5 представлен вид на оси времени бинарного фазоманипулированного сигнала элементарной посылки с колоколообразной огибающей, заданной с помощью соотношения (2), при конкретных возможных значениях коэффициентов в соответствии с приведенными данными таблицы.



Рис. 5. Вид сигнала ФМн-2 с колоколообразной огибающей элементарной посылки, заданной с помощью полиномов Лежандра

Для систематического представления прямоугольных импульсов различной полярности учтена возможность синусоподобного сглаживания межсимвольных переходов [3]. В таком случае в пределах заданного фронта элементарной посылки (длительности переходного процесса) применяются дальнейшие уравнения:

для переднего фронта элементарной посылки:

$$F(t) = U \sin\left(\pi \frac{t}{T_{fp}}\right), \quad (3)$$

для заднего фронта элементарной посылки:

$$F(t) = U \sin\left(\pi \frac{T-t}{T_{fp}}\right), \quad (4)$$

причем  $T_{fp}$  – заданная длительность фронта элементарной посылки.

Помимо этого, импульсы ММС могут быть сформированы как сигналы СФМн-4 с синусоподобной огибающей элементарной посылки, то есть с использованием

соотношения (1). На схематичном рис. 6 изображены графики представления комплексного сигнала ММС на оси времени на начальной нулевой частоте.

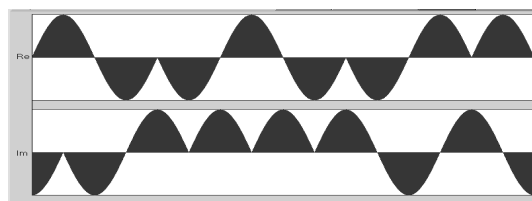


Рис. 6. Графики комплексного представления сигналов с ММС

Для изучения особенностей сложных дискретных сигналов, т.е. дискретных импульсов с широким значением базы, в подготовленной программной реализации модели учтена имитация процесса формирования кодированных дискретных импульсов, в которых всякому информационному знаку ставится кодовая ступенчатость элементарных посылок длиной, равной значению базы сигнала [4]. Схематичный макет модулятора таких импульсов представлен на рис. 7, на котором символом обозначен сумматор по модулю 2.

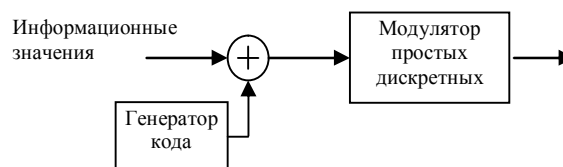


Рис. 7. Схематичный макет модулятора сложных дискретных сигналов

На вход сумматора следует символ от источника информации и кодовая периодичность от генератора кода. Информационный символ суммируется по модулю 2 с каждым последующим элементом кода. В конечном итоге на выходе сумматора для каждого информационного знака получается последовательность символов, равная кодовой последовательности или ее инверсии. Такая удлиненная кодированная последовательность знаков является первичной для модулятора простых фазовых манипуляций импульсов.

В качестве кода в программной реализации модели применяются либо первоначально записанная в файл очередность двоичных знаков, либо последовательность, сформированная генератором случайных чисел,

либо М-очередность, полученная с помощью регистра-генератора М-последовательностей и соответствующего образующего кода.

В роли искажающих воздействий компонентов передатчика на импульс, как представлено на схеме 1, просматриваются искажения сигнала в усилительном тракте, а также видны искажения в процессе фильтрации полосовым фильтром.

Принимая во внимания воздействия усилителя мощности на спектральные характеристики импульса, происходит имитирование изменения фазы выходного сигнала в усилительном каскаде передатчика, исходя из заданных значений его амплитуды, допускающее предусмотреть эффект амплитудно-фазовой конверсии. Применительно к типу усилителя используются различные аппроксимирующие зависимости:

1) для усилителей на клистродах

$$\Delta\varphi = \begin{cases} (0.4A)\varphi_{max}, & \text{при } 0 \leq A < 0.2; \\ (1.15A - 0.15)\varphi_{max}, & \text{при } 0.2 \leq A \leq 1; \end{cases} \quad (5)$$

2) для усилителей на лампах бегущей волны

$$\Delta\varphi = \begin{cases} (2.15A)\varphi_{max}, & \text{при } 0 \leq A < 0.0316; \\ (-0.04 + 3.55A - 3.77A^2)\varphi_{max}, & \text{при } 0.0316 \leq A < 0.5; \\ (0.4A + 0.6)\varphi_{max}, & \text{при } 0.5 \leq A \leq 1; \end{cases} \quad (6)$$

3) для усилителей на лампах бегущей волны с повышенной линейностью

$$\Delta\varphi = \begin{cases} (8.86A)\varphi_{max}, & \text{при } 0 \leq A < 0.0316; \\ (1 - 0.97e^{-9.31A})\varphi_{max}, & \text{при } 0.0316 \leq A < 0.133; \\ (1 - 0.7e^{-7A})\varphi_{max}, & \text{при } 0.133 \leq A \leq 1; \end{cases} \quad (7)$$

4) в остальных случаях

$$\Delta\varphi = A\varphi_{max}, \quad (8)$$

где  $\Delta\varphi$  – фазовая добавка сигнала в результате амплитудно-фазовой конверсии;

$\varphi_{max}$  – максимальное значение фазовой добавки;

$A$  – квадрат нормированной мощности сигнала.

Помимо этого, в данной модели также есть возможность моделирования процесса использования в усилителе передатчика нелинейного режима отсечки, применяемого для повышения коэффициента полезного действия усилительного тракта. При применении такого режима у высокочастотного импульса исключаются все составляющие мгновенного напряжения, меньшие установленного значения, равного  $U \cos(\theta)$ ,

определяемого заданным углом отсечки  $\theta$ . Например, если  $\theta = 90^\circ$ , то исключаются (т.е. обнуляются) все отрицательные значения напряжения высокочастотного сигнала. Восстановление несущей усеченного сигнала осуществляется в результате прохождения через выходной полосовой фильтр приемника.

В качестве полосовых фильтров в модели формирования фазоманипулированных сигналов рассматриваются фильтры Баттерворта различных порядков, амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики коэффициентов передачи которых вычисляются с помощью следующих аппроксимирующих соотношений:

$$K(f_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_i)^{2n}}}, \quad (9)$$

$$\varphi(f_i) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left( \arctg \frac{f_i + \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right)} + \arctg \frac{f_i - \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi(2k-1)}{2n}\right)} \right) \quad (10)$$

где  $K$  – модуль коэффициента передачи;  
 $\omega$  – фаза коэффициента передачи;  
 $n$  – порядок фильтра Баттерворта, определяющий значение коэффициента прямоугольности;

$f_i$  – относительная частота

$$f_i = (i - 1)\Delta F / F, \quad (11)$$

где  $i = 1..N$ ;

$\Delta F$  – шаг дискретизации по частоте;

$F$  – половина ширины полосы пропускания фильтра по уровню минус 3 дБ;

$N$  – половина длины массива для БПФ.

Габаритами фильтра выступают ширина полосы пропускания по уровню - 3 дБ и его порядок, указывающий значение коэффициента прямоугольности [5].

Данные аппроксимации согласуются со справочными данными для фильтров Баттерворта. Фильтры легко реализуемы в практике (приблизительно до 3-го порядка) и имеют быстрозатухающую импульсную характеристику, что немаловажно для БПФ, которое является основой модели. Переменное значение порядка фильтра позволяет учитывать фильтры с различным коэффициентом прямоугольности от 31,6 по уровню - 60 дБ при  $n = 2$  до практически прямоугольного фильтра

при больших значениях  $n$  (например, при  $n = 9$  коэффициент прямоугольности фильтра по уровню - 60 дБ равен 2,15).

### Выводы

В итоге разработанная модель позволяет имитировать процесс образования простых и сложных, двух- и четырехпозиционных фазовых манипуляций импульсов с различными формами огибающей элементарной посылки, а также импульсов ММС, при которой учитываются искажающие воздействия полосовой фильтрации и эффекта амплитудно-фазовой конверсии в усилителе передатчика.

### Литература

1. Муратов А.В. Анализ электромагнитных воздействий РЭС с помощью систем автоматизированного проектирования категории CAD/CAE // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 8. С. 135-137.
2. Макаров О.Ю. Основные принципы применения программных средств при решении задач обеспечения ЭМС и помехоустойчивости // Радиотехника. 2013. № 3. С. 98- 102.
3. Марков Ю.В. Проектирование устройств приема и обработки сигналов: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. С. 39, 48-50.
4. Першин В.Т. Формирование и генерирование сигналов в цифровой радиосвязи: учеб. пособие. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, Новое Знание, 2016. С. 26-27, 48, 62.
5. Свиридова И.В., Остроумов И.В., Муратов А.В. Способы контроля помехозащищенности передачи данных // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. 2013. Т. 2. С. 17.

Поступила 3.04.2018; принята к публикации 11.05.2018

### Информация об авторах

**Остроумов Иван Владимирович** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [vanik07@mail.ru](mailto:vanik07@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Ромашенко Михаил Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), email: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Андреева Дарья Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [dashyli98@mail.ru](mailto:dashyli98@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

## DEVELOPMENT OF THE MODELS OF PHASE-SHIFT KEYED PULSES FORMATION

**I.V. Ostroumov, M.A. Romashchenko, D.S. Andreeva**

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

**Abstract:** a complex approach to the process of the effect of the parameters of phase-shifted signals on the EMC RED is considered, and a structure for solving the modeling and optimization problems of the corresponding model and the methodology for creating a model for generating signals in a radio transmitter are proposed. The object is a model using FFT that produces a representation of a sample of the values of a constant pulse on the time axis. It simulates step-by-step following of the signal created in the modulator through a power amplifier and a bandpass filter at the output of the transmitter. Bandwidth filters of different orders are considered as bandpass filters in the model for the formation of phase-manipulated signals. The method of increasing the efficiency of the amplifying path is considered. Various mechanisms for the generation of envelopes of variations and their effect on the spectral characteristics of the signal, and, consequently, on the characteristics of the RED for EMC are described. For systematic representation of rectangular pulses of different polarity, the possibility of sinusoidal smoothing of intersymbol transitions is taken into account. The structural scheme of the model of the phase-impulse pulse imposition in the radio transmitter is considered, the graphs of the complex representation of phase-shifted signals are presented, as well as the signal modulator circuit. An imitation of the process of formation of coded discrete pulses was taken into account, the effect of amplitude-phase conversion was analyzed

**Key words:** phase-manipulated impulses, radio transmitter, signal modulator



**References**

1. Muratov A.V. “Analysis of electromagnetic effects of RED using CAD/CAE computer design systems”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 135-137.
2. Makarov O.Yu. “Basic principles of the use of software in solving problems of ensuring EMC and immunity”, *Radiotekhnika*, 2013, no. 3, pp. 98-102.
3. Markov Yu.V. “Designing devices for receiving and processing signals. Manual” (“Proektirovanie ustroystv priyema i obrabotki signalov: ucheb.-metodich. posobie”), 2015, pp. 39, 48-50.
4. Pershin V.T. “Formation and generation of signals in digital radio communication. Manual” (“Formirovanie i generirovanie signalov v tsifrovoy radiosvyazi: ucheb. posobie”), Scientific publishing center INFRA-M, Novoe znanie, 2016, pp. 26-27, 48, 62.
5. Sviridova I.V., Ostroumov I.V., Muratov A.V. “Methods of control of interference immunity of data transmission”, *Proc. of the International Symposium “Reliability and Quality” (Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunar. simpoziuma)*, 2013, vol. 2, pp. 17

Submitted 03.04.2018; revised 11.05.2018

**Information about the authors**

**Ivan V. Ostroumov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

**Mikhail A. Romashchenko**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kopr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

**Dar'ya S. Andreeva**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), email: [dashyli98@mail.ru](mailto:dashyli98@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

## Машиностроение и машиноведение

УДК 621.785.3: 669.29

### ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНИЧЕСКОГО ТИТАНА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ СЛОЕВ

© 2018 А.Б. Коломенский<sup>1</sup>, С.В. Шахов<sup>1</sup>, Б.А. Коломенский<sup>1</sup>, И.В. Зубарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», г. Воронеж, Россия

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

**Аннотация:** технология производства листовых полуфабрикатов из титановых сплавов (листов, лент и фольги) толщиной до 3,0 мм включает ряд операций, в том числе горячую прокатку в интервале температур 650-850 °С, а также травление с целью удаления газонасыщенных слоев. Наряду с отрицательным действием газонасыщенных слоев имеются сведения о том, что при неполном их стравливании проявляется эффект заметного повышения циклической долговечности титановых листов. Данный эффект повышения долговечности можно было бы использовать также с целью снижения безвозвратных потерь дорогостоящего материала. Отжиг является обязательной операцией для снятия остаточных напряжений в титановых конструкциях после операций сварки, штамповки, рихтовки. Исследовали совместное влияние газонасыщенных слоёв различной твёрдости и протяжённости и оксидных плёнок, формирующихся в процессе низкотемпературного воздушного отжига, на динамические и кратковременные механические характеристики технического титана марки ВТ1-0, широко используемого при производстве деталей и узлов авиационной техники. Показано, что регламентированные газонасыщенные слои могут повышать служебные механические характеристики листовых конструкций, подвергаемых отжигу для снятия напряжений. Оксидные плёнки, формирующиеся в процессе низкотемпературного воздушного отжига, могут оказывать полезное влияние на долговечность листов при повторно-статическом нагружении, а также повышать их ударную вязкость

**Ключевые слова:** технический титан, газонасыщенный слой, низкотемпературный воздушный отжиг, ресурсные характеристики

#### Введение

Технология производства листовых полуфабрикатов из титановых сплавов (листов, лент и фольги) толщиной до 3,0 мм включает ряд операций: горячая прокатка в интервале температур 650-850 °С, травление, теплая прокатка, промежуточный отжиг, травление (удаление газонасыщенных слоев), резка листов, сдача готовой продукции [1].

Одной из основных проблем производства титановых полуфабрикатов является активное взаимодействие с кислородом при температуре нагрева выше 650 °С, что приводит к окислению поверхности и образованию плотной окалины. Нагрев титана и его сплавов в интервале температур 300-600 °С сопровождается образованием поверхностной окисной пленки глубиной не более 20-85 нм. При повышении температуры нагрева происходит растворение кислорода в матрице основного металла с образованием газонасыщенных (альфированных) слоев повышенной твердости и хрупкости. В альфированном слое содержание кислорода посте-

пенно уменьшается от предела растворимости кислорода в  $\alpha$ -фазе до его содержания в основном металле [2].

Известно, что толщина газонасыщенных слоев зависит от температуры и длительности нагрева. В работе [3] имеются данные о кинетике окисления технического титана марки ВТ1-0 на воздухе при температуре 200-800 °С при длительном нагреве от 25 до 1000 часов. После отжига при температуре 800 °С длительностью 25-500 часов толщина газонасыщенных слоев составила 75-660 мкм.

По мнению большинства авторов, газонасыщенные слои, образовавшиеся при высокотемпературном нагреве, снижают механические свойства титановых сплавов, особенно сильно это влияние происходит при циклических нагрузках [4-6].

В работе [7] приведены данные о повторно-статической выносливости листовых образцов толщиной 2 мм с отверстием-концентратором после воздушного отжига в течение 1 ч. Показано, что при температуре отжига 750 °С повторно-статическая выносли-

вость образцов снижается практически на 50 % по сравнению с образцами без отжига. Наряду с отрицательным действием газонасыщенных слоев в литературных данных [8] было показано, что при неполном их стравливании появляется эффект заметного повышения циклической долговечности. Эффект повышения долговечности можно было бы использовать с целью уменьшения глубины травления при производстве листовых титановых полуфабрикатов. Сохраняя полезную часть газонасыщенных слоев для повышения механических характеристик титановых сплавов, можно также одновременно достигать снижения безвозвратных потерь дорогостоящего материала.

В настоящее время технология производства листовых титановых конструкций, в частности для авиационной промышленности, включает в себя операции сварки, гибки, штамповки, рихтовки, которые, в свою очередь, сопровождаются последующим отжигом для снятия остаточных напряжений [9].

В данной работе исследовали совместное влияние газонасыщенных слоёв различной твёрдости и протяжённости и оксидных плёнок, формирующихся в процессе низкотемпературного воздушного отжига, на динамические и кратковременные механические характеристики технического титана марки ВТ1-0, широко используемого при производстве деталей и узлов авиационной техники.

### Методика проведения эксперимента

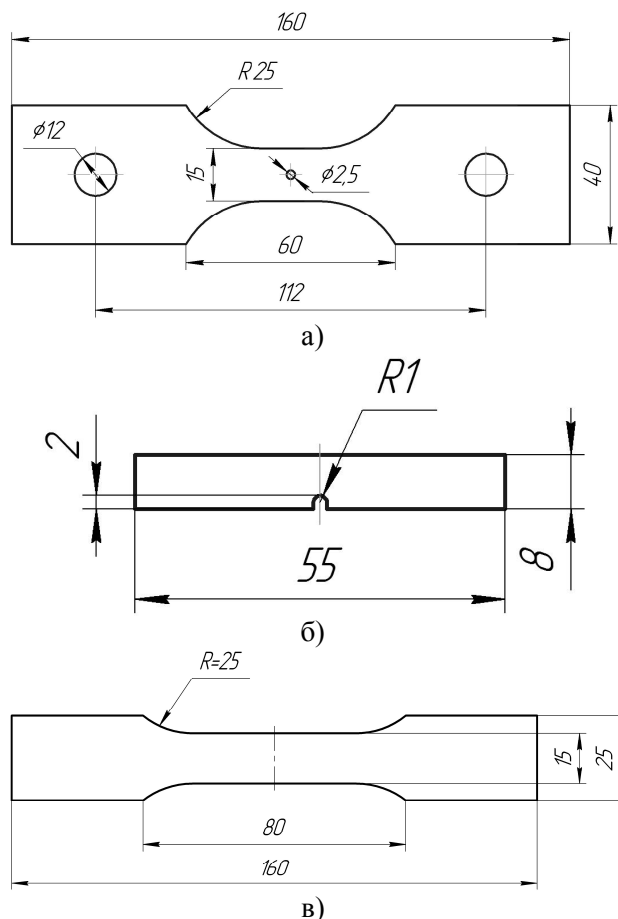
Образцы изготавливали из листов технического титана ВТ1-0 толщиной 0,8-1,2 мм (рисунок). После вырезки образцы подвергали высокотемпературному воздушному отжигу в течение 2 ч. при температуре 800 °С в лабораторной печи с целью формирования регламентированного газонасыщенного слоя глубиной 100 мкм [10, рисунок, а]. Удаление поверхностной окалины выполняли пескоструйной обработкой при избыточном давлении 0,1 МПа с целью избегания поверхностного наклепа, послойное облагораживающее травление выполняли в смеси кислот HF и HNO<sub>3</sub> с целью исключения наводороживания. Микротвердость поверхности образцов после мерного травления определяли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 0,51 Н по методике, описанной в работе [10]. Одночасовой низкотемпературный воз-

душный отжиг - в интервале температур 350-650 °С.

Испытания на повторно-статическую долговечность выполняли на модернизированной установке УММ-10 при коэффициенте асимметрии цикла  $R=+0,1$  и частоте циклов  $f=0,6-0,8$  Гц при максимальном напряжении цикла  $\sigma_{max} = 290$  МПа.

Испытания образцов на ударную вязкость (ККУ) производили согласно требованиям ГОСТ 9454-78 на маятниковом копре со шкалой 5 кг·м. Для исключения потери устойчивости и изгиба листовых образцов в процессе испытания применяли специальное приспособление.

Кратковременные механические характеристики определяли на разрывной машине ИНСПЕКТ-50.



Образцы для испытаний на: а - повторно-статическую долговечность; б - ударную вязкость; в - кратковременный разрыв

Результаты испытаний, представленные табл. 1-3, определяли как среднее значение по пяти параллельным образцам.

## Результаты испытаний и их обсуждение

### 1. Влияние газонасыщенных слоев и режимов отжига на повторно-статическую долговечность

В работе [10, рисунок, а] приведена зависимость микротвёрдости поверхности сплава ВТ1-0 после отжига при 800 °С, 2 ч. от глубины травления, глубина газонасыщенного слоя после предварительного отжига составляет 100 мкм.

В табл. 1 приведены результаты испытаний образцов на повторно-статическую долговечность при наличии газонасыщенных слоев различной твердости без низкотемпературного отжига, а также с отжигом в интервале температур 350-650 °С.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на повторно-статическую долговечность

L <sub>тр.</sub> , мкм (ΔHV %)	N <sub>цикл.сп.</sub>				
	T <sub>отж.</sub> =0 °С	T <sub>отж.</sub> =3 50 °С	T <sub>отж.</sub> =4 50 °С	T <sub>отж.</sub> =5 50 °С	T <sub>отж.</sub> = 650 °С
35 мкм (39,4 %)	6902	7285	<b>7600</b>	6280	4822
39 мкм (28,5 %)	6086	6618	<b>8172</b>	7007	6044
48 мкм (19%)	4899	7869	<b>8319</b>	6738	5362
100 мкм (0%)	5765	6265	<b>6337</b>	5186	4785

Из представленных результатов в табл. 1 видно, что максимум долговечности образцов без отжига достигается при стравливании газонасыщенного слоя на глубину L<sub>тр.</sub>≈35 мкм при перепаде микротвердости ΔHV=39,4%. При этом повторно-статическая долговечность возрастает на ~20% по сравнению с образцами с полностью удалённым газонасыщенным слоем L<sub>тр.</sub>=100 мкм. При испытании образцов после низкотемпературного отжига максимум долговечности достигается при температуре T<sub>отж.</sub>=450 °С в течение 1 ч. при глубине травления L<sub>тр.</sub>=48 мкм. Важно отметить, что максимум

наблюдается для всех перепадов микротвердости 39,4-19%, а также для образцов с полностью удалённым слоем. Повышение долговечности в сравнении с металлом без подслоя при этом составляет ~1,4...1,5 раза.

### 2. Влияние газонасыщенных слоев и режимов отжига на ударную вязкость

Ударная вязкость является одной из важных механических характеристик, отвечающей за работоспособность материала в условиях кратковременного динамического нагружения. Ударная вязкость особенно чувствительна к повышению твердости материала, также в литературных данных практически отсутствуют данные о влиянии газонасыщенных слоев на данную характеристику.

В табл. 2 представлены результаты испытаний образцов на ударную вязкость технического титана ВТ1-0 при наличии газонасыщенных слоев без низкотемпературного отжига, а также влияние одночасового воздушного отжига в интервале температур 350-650 °С.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов на ударную вязкость

L <sub>тр.</sub> , мкм (ΔHV %)	KCU, кг·м/см <sup>2</sup>				
	T <sub>отж.</sub> =0 °С	T <sub>отж.</sub> =3 50 °С	T <sub>отж.</sub> =4 50 °С	T <sub>отж.</sub> =5 50 °С	T <sub>отж.</sub> = 650 °С
27 мкм (78%)	<b>20,5</b>	24,8	<b>22,5</b>	17,1	15,5
33 мкм (48%)	19,4	22,5	<b>22,2</b>	17,1	17,5
48 мкм (19%)	17,7	19,1	<b>22,2</b>	18,3	17,9
100 мкм (0%)	19,4	22,0	<b>23,9</b>	16,2	17,2

Из полученных результатов видно, что максимум ударной вязкости достигается при более высокой микротвердости 78 % по сравнению с повторно-статической долговечностью для образцов без отжига. Последующий низкотемпературный отжиг повышает ударную вязкость в интервале температур 350-450 °С, при увеличении температур отжига в диапазоне 550-650 °С приводит к снижению ударной вяз-

кости, как для металла с газонасыщенным слоем так и без него, что связано с началом растворения кислорода в титане. Также важно отметить, что максимальное значение ударной вязкости достигается при температуре отжига 450 °С для образцов без газонасыщенного слоя.

### 3. Влияние газонасыщенных слоев и режимов отжига на временное сопротивление разрыву

Практический интерес представляют испытания на временное сопротивление разрыву. Испытания проводили на образцах (см. рисунок, в) с регламентированными газонасыщенными слоями, а также без слоя. Результаты испытаний на временное сопротивление разрыву представлены в табл. 3.

Таблица 3  
Результаты испытаний образцов на временное сопротивление разрыву

L <sub>тр.</sub> , мкм (ΔHV %)	σ <sub>в</sub> , МПа				
	T <sub>отж.</sub> = 0 °С	T <sub>отж.</sub> = 350 °С	T <sub>отж.</sub> = 450 °С	T <sub>отж.</sub> = 550 °С	T <sub>отж.</sub> = 650 °С
27 мкм (78%)	334,4	334,5	341,0	335,7	334,1
33 мкм (48%)	333,9	335,9	332,8	333,3	327,4
48 мкм (19%)	324,0	330,2	332,6	326,4	329,0
100 мкм (0%)	325,0	326,2	326,1	327,6	326,4

Из представленных данных видно, что максимум значений σ<sub>в</sub> технического титана ВТ1-0 достигается при глубине травления l<sub>тр.</sub> ≈ 27 мкм, восстановление значений временного сопротивления до уровня основного металла происходит при глубине травления l<sub>тр.</sub> ≈ 48 мкм. Поверхностное окисление при отжиге в интервале температур 350-650 °С не оказывает значительного влияния на значения σ<sub>в</sub>.

### Выводы по работе

1. Показано, что максимальные значения повторно-статической долговечности, ударной вязкости технического титана ВТ1-0 достигаются при травлении газонасыщенных слоев на глубину 33-48 мкм.

2. Низкотемпературный воздушный отжиг в интервале температур 350-550 °С даёт дополнительный прирост долговечности в 1,1...1,4 раза при перепадах микротвердости ΔHV=20-28,5% в сравнении с металлом без газонасыщенного подслоя. Оптимальная температура отжига T<sub>отж.</sub>=450 °С.

3. Временное сопротивление разрыву технического титана восстанавливается при оптимальных перепадах микротвердости, выявленных при испытаниях на повторно-статическую долговечность и ударную вязкость. Оксидные пленки, формирующиеся в процессе низкотемпературного отжига, не оказывают значительного влияния на данный показатель.

4. Получены критерии для выбора режимов отжига деталей из технического титана при наличии поверхностных газонасыщенных слоев и оксидных пленок.

### Литература

1. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В.К. Александров, Н.Ф. Аношкин, Г.А. Бочвар и др. М.: Металлургия, 1979. 512 с.
2. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов, М.: Металлургия, 1981. 416 с.
3. Корнилов И.И., Забродская М.Н., Борискина Н.Г. Кинетика длительного окисления титана // МиТОМ. 1977. №3. С. 49-51.
4. Матюшкин Б.А., Горшков А.И. О влиянии газонасыщенного слоя на образование трещин при замедленном разрушении сплавов титана после сварки // Сварочное производство. 1976. № 4. С.11-12
5. Титановые сплавы в машиностроении/ Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн. М.: Машиностроение, 1977. 248 с.
6. Влияние состояния поверхности на характеристики работоспособности листов из титановых сплавов ОТ4 и ВТ14/ В.Н. Моисеев, А.П. Пономарев, Л.В. Шохолова, Ю.А. Грибков //Легирование и термическая обработка титановых сплавов: сб. ст. ОНТИ ВИАМ, 1977. С. 307-310.
7. Горшков А.И., Вакс И.А. Влияние температуры отжига на величину остаточных напряжений и свойства сварных соединений из сплава ОТ4 // Сварочное производство. 1967. №8. С.37-39.
8. Матюшкин Б.А., Горшков А.И. О влиянии газонасыщенного слоя на образование трещин при замедленном разрушении сплавов титана после сварки // Сварочное производство. 1976. № 4. С.11-12.



9. Сварные соединения титановых сплавов/ В.Н. Моисеев, Ф.Р. Куликов, Ю.Г. Кириллов, Ю.В. Васкин. М.: Metallurgiya, 1979. 248 с.

10. Коломенский А.Б., Шахов С.В., Коломенский А.Б. Влияние газонасыщенных слоёв и оксидных плёнок

на ударную вязкость титановых сплавов различных групп прочности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 132-140.

Поступила 10.04.2018; принята к публикации 05.05.2018

#### Информация об авторах

**Коломенский Александр Борисович** – д-р техн. наук, главный металлург, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: metallurg@air.vrn.ru

**Шахов Сергей Викторович** – ведущий инженер-конструктор, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: shahovsv@gmail.com

**Коломенский Борис Александрович** – канд. техн. наук, помощник директора по качеству, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

**Зубарев Игорь Валентинович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: zubarev71@gmail.com

### INCREASING THE RESOURCE CHARACTERISTICS OF THE TECHNICAL TITAN BY OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE GAS-SATURATED LAYERS

A.B. Kolomenskiy<sup>1</sup>, S.V. Shakhov<sup>1</sup>, B.A. Kolomenskiy<sup>1</sup>, I.V. Zubarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh Aircraft Production Association, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the technology for the production of sheet semi-finished products from titanium alloys (sheets, tapes and foils) with the thickness up to 3.0 mm includes a number of operations, including hot rolling in the temperature range 650-850 °C, as well as etching to remove gas-saturated layers. Along with the negative effect of gas-saturated layers, there are indications that when they are incompletely removed, the effect of a significant increase in the cyclic durability of titanium sheets appears. This effect can also be used to reduce the irreversible loss of such an expensive material. Annealing is a mandatory operation to remove residual stresses in titanium structures after welding, stamping, straightening operations. The article studies the combined influence of gas-saturated layers of various hardness and length and oxide films formed in the process of low-temperature air annealing on the dynamic and short-term mechanical characteristics of technical titanium VT1-0, widely used in the manufacture of parts and components of aviation equipment. It is shown that regulated gas-saturated layers can enhance the service mechanical characteristics of sheet structures subjected to annealing to relieve stresses. Oxide films formed in the process of low-temperature air annealing can have a useful effect on the durability of sheets under repeated static loading, and also increase their impact toughness

**Key words:** technical titanium, gas-saturated layer, low-temperature air annealing, resource characteristics

#### References

1. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Bochvar G.A. "Semi-finished products of titanium alloys" ("Polufabrikaty iz titanovykh splavov"), Moscow, Metallurgiya, 1979, 512 p.
2. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. "Metallography and heat treatment of nonferrous metals and alloys" ("Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov"), Moscow, Metallurgiya, 1981, 416 p.
3. Kornilov I.I., Zabrodskaya M.N., Boriskina N.G. "Kinetics of long-term oxidation of titanium", *Metal Science and Heat Treatment (MiTOM)*, 1977, no. 3, pp. 49-51.
4. Matyushkin B.A., Gorshkov A.I. "On the effect of the gas-saturated layer on the formation of cracks in the delayed fracture of titanium alloys after welding", *Welding Engineering (Svarochnoe proizvodstvo)*, 1976, no. 4, pp. 11-12
5. Chechulin B.B., Ushkov S.S., Razuvaeva I.N., Goldfain V.N. "Titanium alloys in mechanical engineering" ("Titanovye splavy v mashinostroyeni"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1977, 248 p.
6. Moiseev V.N., Ponomarev A.P., Sholohova L.V., Gribkov U.A. "The influence of surface conditions on characteristics of health sheets from titanium alloys OT4 and VT14", *Into the proc. "Doping and heat treatment of titanium alloys" (V sb. statey "Legirovanie i termicheskaya obrabotka titanovykh splavov")*, ONTI VIAM, 1977, pp. 307-310.
7. Gorshkov A.I., Vaks I.A. "Influence of annealing temperature on residual stresses and properties of welded joints of alloy OT4", *Welding Engineering (Svarochnoe proizvodstvo)*, 1967, no. 8, pp. 37-39.
8. Matyushkin B. A., Gorshkov A. I. "On the effect of the gas-saturated layer on the formation of cracks in the delayed fracture of titanium alloys after welding", *Welding Engineering (Svarochnoe proizvodstvo)*, 1976, no. 4, pp. 11-12.

9. Moiseev V.N., Kulikov F.R., Kirillov U.G., Vas'kin U.V. "Welded joints of titanium alloys" ("Svarnye soedineniya titanovykh splavov"), Moscow, Metallurgia, 1979, 248 p.

10. Kolomenskiy, A.B., Shakhov S.V., Kolomenskiy B.A. "Effect of gas-saturated layers and oxide films on the toughness of titanium alloys of different grades", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, no. 2, pp. 132-140.

Submitted 10.04.2018; revised 05.05.2018

#### Information about the authors

**Aleksandr B. Kolomenskiy**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Chief Metallurgist, Voronezh Aircraft Production Association (27 Tsiolkovskogo st., Voronezh 394029, Russia), e-mail: metallurg@air.vrn.ru

**Sergey V. Shakhov**, Leading Engineer, Voronezh Aircraft Production Association (27 Tsiolkovskogo st, Voronezh 394029, Russia), e-mail: shahovsv@gmail.com

**Boris A. Kolomenskiy**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Quality Director, Voronezh Aircraft Production Association (27 Tsiolkovskogo st., Voronezh 394029, Russia), e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

**Igor' V. Zubarev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: zubarev71@gmail.com

*Физика*

УДК 544.6

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ НА ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

© 2018 Ю.Н. Шалимов<sup>1</sup>, А.В. Звягинцева<sup>1</sup>, Д.Л. Шалимов<sup>2</sup>, А.В. Руссу<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО НКТЬ «Феррит», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены особенности методологии изучения электрохимических процессов. Показаны ограничения при детальном исследовании систем на основе усредненного параметра (температуры) и выдвинута гипотеза об истинном значении температуры в двойном электрическом слое. Представлены результаты определения температуры приэлектродного слоя в электролитах хромирования и показано, что основными параметрами, определяющими повышение температуры относительно среднего ее значения в объеме электролита, являются плотность тока (анодного или катодного), а также химический состав электролита и продолжительность электролиза. Представлена возможность определения тока в приэлектродной зоне методом аналитического расчета с использованием зависимостей линеаризации отдельных параметров (плотность тока и продолжительность электролиза). Анализ характера изменения прикатодной температуры показал максимальный рост этого параметра в начальный момент. Методом внутреннего трения установлена взаимосвязь между содержанием водорода в электролитических покрытиях в условиях импульсного и непрерывного электролиза для серноокислых электролитов хромирования. Установлено, что вероятность образования гидридов металлов наиболее высока в структурах, образованных электролитическим методом из водных растворов электролитов. Температурная зависимость внутреннего трения позволяет одновременно оценить количество адсорбированного водорода, а также энергию связи водород-металл

**Ключевые слова:** температура приэлектродного слоя, тонкая структура электролитических металлов, внутреннее трение, электролиз водных растворов, гидриды металлов

**Введение**

В представленной статье рассмотрены вопросы методологии экспериментальных работ, позволяющие определить некоторые параметры процессов, нахождение которых прямым экспериментом в настоящее время не представляется возможным. В частности, на основании исследования температуры приэлектродного слоя предложена методика определения истинной температуры в зоне электродной реакции. Измерение этого важного параметра методом прямого наблюдения пока не представляется возможным из-за отсутствия датчиков температуры, размеры которых будут лежать в диапазоне нескольких нанометров.

Вопросы кинетики химических процессов рассматриваются, как правило, с позиций действия температурного параметра, фиксируемого в эксперименте - средней температуры в объеме, поскольку этих параметров вполне достаточно для решения технологических задач. При этом не придается особого значения тому обстоятельству, что одни и те же вещества (например, хром, никель

и так далее), обладающие идентичными свойствами, могут быть получены в разных температурных условиях: металлургическим путем ( $T \sim 1000$  °С и более) или гальваническим способом из водных растворов электролитов ( $T \sim 40$  °С и менее). Почему? Потому что на уровне методологии не учитывалось, что существующие датчики температуры технически не могут определить истинную температуру в зоне реакции, и для определения этой температуры необходимы другие подходы. Гипотеза авторов статьи состоит в том, что истинная температура в двойном слое, где происходит формирование металлической структуры и непосредственное встраивание атома в кристаллическую решетку, достигает или может превосходить величину температуры плавления вещества. Вопрос этот стоит перед электрохимиками, поскольку проблема получения атомной структуры методом электрохимического восстановления катионов  $Me^{n+}$  из водного раствора не может быть объяснена именно по стадиям непосредственного разряда иона с образованием нейтрального атома и его

встраиванием в структуру кристаллической решетки.

### Электротермографические исследования

Рассматривая в общем виде электрохимическую систему, можно записать уравнение для массы вещества [1], восстанавливаемого на катоде или окисляемого на аноде:

$$\Delta m = f(i, C, pH, T, \tau) \quad (1)$$

где  $i$  – плотность тока (катодного или анодного);  $pH$  – кислотность электролита;  $C$  – концентрация разряжающихся ионов;  $T$  – температура электролита в электрохимической системе;  $\tau$  – время эксперимента.

Профессор Бекетов Н.Н., работая в Харьковском университете, уделял особое внимание роли температуры при изучении эффектов тепловыделения при осуществлении электрохимических реакций на электродах. Он связывал эти тепловые эффекты с изменением природы веществ, восстанавливающихся или окисляющихся на электродах. Позднее эти работы были продолжены в том же Харьковском университете на кафедре физической химии проф. Д.Н. Грицаном с сотрудниками [2-5]. Аналогичные исследования проводились на кафедре общей химии ВПИ проф. А.И. Фаличевой с сотрудниками [6-10]. В [6-8] исследования были проведены для электролитических покрытий на основе хрома, а в [9, 10] – на основе никеля.

Температурная зависимость величины  $\Delta t_s = f(i_k, C, pH)$  получила название электротермограммы. На рис. 1 представлена электротермограмма прикатодного слоя, полученная для различных электролитов хромирования [8]. Более подробно составы, свойства и условия получения хромовых покрытий из данных электролитов освещены в [6-8, 11].

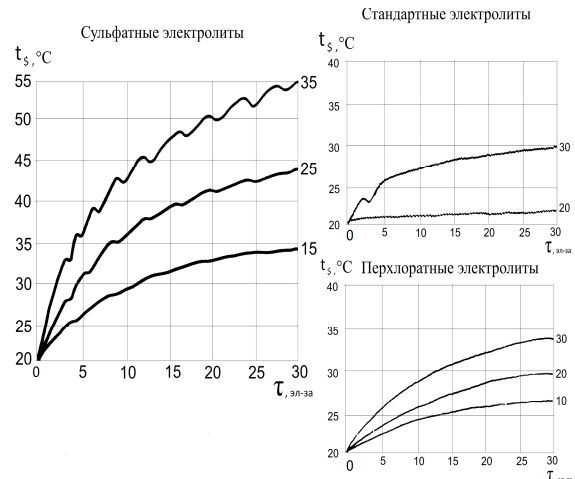


Рис. 1. Электротермограммы прикатодного слоя для электролитов хромирования [8]. Цифры на кривых означают плотность тока на электродах в А/дм<sup>2</sup>

Анализируя характер изменения температуры в прикатодном слое, можно сделать следующие выводы:

1. Определяющим параметром величины  $\Delta t_s$  является плотность катодного тока.
2. Наибольший рост температуры в зоне реакции наблюдается в первоначальный момент.
3. Осцилляции колебаний температуры обусловлены спецификой выделения водорода на катоде. Водород, выделяющийся в процессе электролиза при совместном восстановлении катионов  $Me^{n+}$  и  $H_3O^+$  при больших значениях выхода по току, обладая самым высоким значением теплоемкости для газов, транспортирует из околочатодного пространства основную часть тепловой энергии. Это вызывает наличие осцилляций, число которых определяется особенностями теплофизических свойств изучаемых электролитов (вязкость, плотность, удельная теплопроводность, теплоемкость). Наибольшее число осцилляций наблюдается при получении хромовых покрытий из стандартного электролита хромирования, но при меньшей амплитуде колебаний в отличие от сульфатных электролитов хромирования. В перхлоратных электролитах хромирования их практически не наблюдается.

4. Характер электротермограммы подобен процессам насыщения. Поясним понятие кривые насыщения.

Кривая насыщения – это математическая модель процесса асимптотического приближения к предельному значению температуры, при котором наступает

равновесие между процессом нагрева электролита и его охлаждением. Действительно, в электролитах хромирования не достигается даже точка кипения при любом известном режиме электролиза, так как тепловые потери рассеиваются в электролите за счет выноса тепловой энергии водородом, контактом зеркала электролита с атмосферой воздуха и отводом тепла охлаждающим устройством. Измерение температуры в проведенных экспериментах осуществлялось в зоне, удаленной от катода на 50 мкм.

Изучая процессы анодного окисления алюминия в растворе NaCl, мы обнаружили подобную закономерность и для этих процессов [12]. Общий вид электротермограмм процесса представлен на рис. 2.

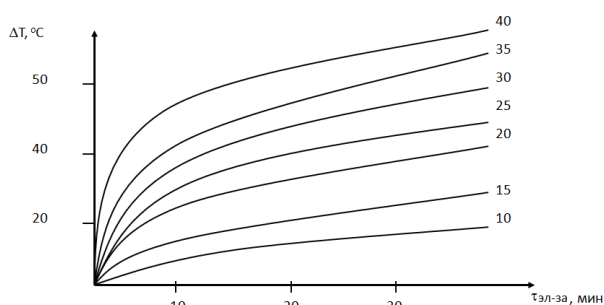


Рис. 2. Зависимость температуры электрода от плотности анодного тока и продолжительности электролиза при различных значениях  $i_a$ . Цифры на кривых означают плотность тока на электродах в  $A/dm^2$  [12]

Для интерпретации результатов, приведенных на рис. 2, целесообразно использовать операцию линейаризации коэффициентов. Кривые такого типа могут быть описаны уравнением вида:

$$\Delta T_a = \frac{\tau_{\text{эксп}}}{a + b \cdot \tau_{\text{эксп}}}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты лианеризации;  $\tau_{\text{эксп}}$  – время экспозиции электрода, мин.;  $\Delta T_a$  – температуры в прикатодном слое,  $^{\circ}C$ .

В этом уравнении можно положить, что плотность тока будет определяться коэффициентом  $b$ . Поскольку  $\Delta T_a$  связана с величиной плотности катодного тока прямой зависимостью, то можно принять  $b = \frac{1}{i_a}$ , тогда

взаимосвязь  $\Delta T_a$  с технологическими параметрами процесса определится выражением:

$$\Delta T_a = \frac{\tau_{\text{эксп}}}{a + \frac{1}{i_a} \cdot \tau_{\text{эксп}}}, \quad (3)$$

где  $i_a$  – анодная плотность тока,  $A/dm^2$ .

Используя уравнение (3), можно через заданные параметры процесса анодной обработки  $i_a$  и  $\tau_{\text{эксп}}$  вычислить любое значение температуры в прианодном слое.

Таким образом, все технологические параметры процесса оказываются взаимосвязаны через коэффициент  $a$ , который и определяется для различных значений указанных параметров:

$$a = \frac{\tau_{\text{эксп}} - \left(\frac{\tau_{\text{эксп}}}{i_a}\right) \cdot \Delta T_a}{\Delta T_a} \quad (4)$$

Графические зависимости  $a = f(\tau)$  при различных значениях  $i_a$  представлены на рис. 3.

Отклонения значений  $a$  на графиках от прямой линейаризации функции  $a = f(\tau)$  проверяются методом обратных вычислений аналитических значений функции. Нами была предложена модель определения экспериментальных точек кривых с использованием для расчета основных технологических параметров плотности анодного тока и времени экспозиции образца. Вводимые в расчетные уравнения коэффициенты линейаризации находятся из графиков, представленных на рис. 3.

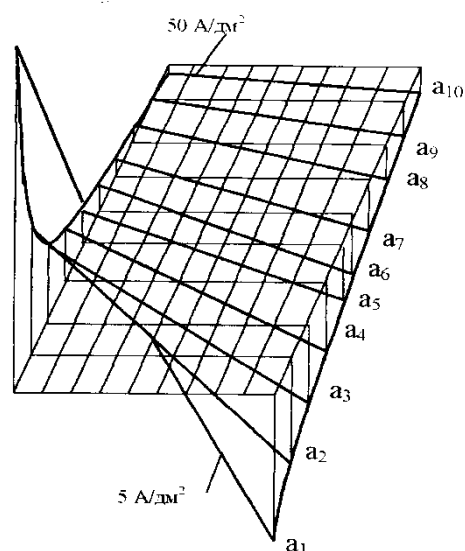


Рис. 3. Изменение коэффициентов линейаризации в зависимости от значения плотности анодного тока

Однако главная проблема этого эксперимента заключается в том, что такое



определение свидетельствует лишь о характере изменения температуры в зоне реакции, не позволяя прямым наблюдением определить истинную температуру в зоне реакции. Суть в том, что водный раствор электролита интегрирует температуру за счет своей высокой удельной теплоемкости. Помимо этого геометрические размеры датчика температуры не позволяют даже в первом приближении определиться с наиболее вероятной точкой реализации элементарного акта разряда иона [1].

Действительно, трудно представить образование анодных структур со сходными свойствами (температура плавления, удельный вес, прочность, электропроводность, магнитные свойства и другие характеристики), осуществляемое при температурах электролита, различающихся практически на два порядка. Металлы, полученные металлургическим методом и методом гальваностегии, практически имеют сходные значения основных параметров структуры и свойств. Так где же локализован этот высокотемпературный переход? Одним из свидетельств нашего предположения, что температура прикатодного слоя выше, чем измеряемая датчиком, может служить тот факт, что на покрывном стекле электролизера электролита хромирования (его внутренней стороне) в объеме электролита ( $T_{\text{наб}} = 20^\circ\text{C}$ ) в процессе электролиза конденсируются пары  $\text{H}_2\text{O}$ , что означает: температура воды  $\sim 100^\circ\text{C}$ . При этом на катоде была зафиксирована температура всего лишь  $45^\circ\text{C}$ . Реальная температура выше измеряемой.

Вероятнее всего предположить, что механизм образования конденсата воды связан с поверхностным нагревом пузырьками водорода параллельно протекающим на катоде процессам восстановления катионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$  в сернокислом электролите хромирования [1, 12]:



Однако в реальности проблема определения тепловых эффектов на электродах до настоящего времени не может считаться решенной. И главная причина заключается в отсутствии прямого экспериментального

метода измерения температуры в зоне протекания электрохимической реакции.

Учесть специфику массы, подвижности, наличие координационной оболочки и эффективного значения величины заряда иона, например катионов  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{H}_3\text{O}^+$ , достаточно трудно, чтобы вычислить реальную траекторию перемещения частицы в объеме электролизера под влиянием полей различной природы (тепловых, магнитных, конвекционных потоков, гравитационных, механического перемещения). Наверное, с полным основанием можно утверждать, что основное взаимодействие, включающее фазовые переходы, осуществляется именно в двойном электрическом слое. Исследование уже сформированной электролитической структуры: анодной или катодной - позволяет получить вполне определенные результаты. Но суть динамики электрохимического процесса в значительной мере остается в рамках предположений экспериментатора. Ведь по сути своей даже сама трактовка механизма анодного окисления алюминия до сих пор имеет неоднозначный смысл. Например, по мнению исследователей [13], основное влияние на кинетику и механизм анодного растворения алюминия оказывает концентрация анионов  $\text{Cl}^-$  в водном растворе  $\text{NaCl}$ . Каким образом может взаимодействовать анион хлора с алюминиевым анодом, потенциал которого отрицателен? А ведь эта технология анодной обработки алюминиевой фольги почти в течение 100 лет используется в радиоэлектронике для производства электролитических конденсаторов [12, 13].

#### Внутреннее трение для определения диффузионных процессов при тепловом воздействии

Гельмгольцем введено понятие свободной энергии системы, которая имеет наименьшее значение при установленных величинах температуры и объема. В электрохимии это состояние системы при равновесном потенциале (емкость двойного электрического слоя заряжена и токи обмена - эквивалентны). Известно выражение для потока энтропии [14]:

$$dS = \frac{dU + pdV}{T} - \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j dN_j}{T}, \quad (9)$$

где  $dS$  – изменение энтропии;  $dU$  – изменение внутренней энергии;  $p$  – давление в системе;  $dV$  – изменение объема;  $T$  – температура;  $\mu_j$  – химический потенциал (определяет сродство реакции);  $dN_j$  – изменение числа моль газа;  $n$  – число частей термодинамической системы.

Из этого уравнения следует, что влияние температуры на условия протекания химических реакций является определяющим, но вопрос об ее истинном мгновенном значении в зоне элементарного акта пока остается открытым, ввиду отсутствия соответствующих методов измерения. Например, в работе [15] в качестве постулата приводится утверждение о том, что любое физико-химическое изменение состояния вещества в тепловой машине может быть использовано для получения энергии. Соответственно поскольку энергетические резервы элементарного акта до конца не изучены, они представляют собой ценный ресурс для последующего практического применения. На состояние твердого вещества большое воздействие оказывают структурные дефекты (их тип и количество). Неразрушающим методом контроля степени дефектности покрытий, получаемых любыми методами, является внутреннее трение. Данный метод был использован для контроля свойств покрытий непосредственно в процессе их электрохимического осаждения.

С помощью метода внутреннего трения исследуются температурные зависимости  $Q^{-1} = f(T)$  и на кривой зависимости будет фиксироваться изменение состояния вещества по наличию пиков или изменению фона. Метод наиболее четко определяет влияние температуры на изменение структуры, а следовательно, и энергии вещества в образце (хром, никель или другой металл).

Мы полагаем, что устойчивость кристаллической структуры металла определяется скоростью образования или разрушения ионной среды (оболочки). Для определения скорости образования или разрушения ионной оболочки в математическое выражение вводят величину, ей пропорциональную –  $1/\tau_r$ , где  $\tau_r$  – время релаксации:

$$\tau_r = \frac{T k}{k \cdot T \cdot \chi^2}, \quad (10)$$

где  $T k$  – коэффициент внутреннего трения раствора;  $k$  – константа Больцмана;  $T$  – абсолютная температура;  $\chi$  – характеристическая длина по теории Дебая и Гюккеля.

Величина  $\tau_r$  для электролита зависит от температуры. Поскольку  $\tau_r$  можно также экспериментально определить по количеству ионов металлов, восстанавливаемых до атомов, то, соответственно, расчетным путем можно получить и величину температуры.

В более ранних работах [16] было установлено, что при взаимодействии водорода с электролитическим хромом образуются соединения гидридного типа общего вида Me-H.

В условиях взаимодействия электролитических металлов и сплавов с водородом вероятность образования гидридных соединений на 2-3 порядка выше, чем при взаимодействии водорода с хромом, полученным металлургическим способом [17]. Это объясняется, прежде всего, тем, что при кристаллизации металлической фазы атом металла находится в наиболее активном состоянии при реализации катодного восстановления. С другой стороны, вероятность наличия атомарного водорода достаточно велика, так как образование из двух атомов водорода молекулы водорода с разным направлением спинов электронов менее вероятно (реакция образования молекулы) [18]. Время дезинтеграции двух атомов в зависимости от температуры составляет  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  с. Если предположить, что в зоне реакции образования гидрида металла, например хрома, температура может достигать сотен градусов, поскольку в этой зоне существуют поля высокой напряженности, то и реакция образования гидрида более вероятна, чем образование молекулы водорода.

Хромовые покрытия, полученные в сернокислых электролитах хромирования, несмотря на то, что выход по току водорода в них значительно меньше, чем в стандартных растворах хромирования, содержат в объеме структуры большее число дефектов, чем покрытия, сформированные в электролитах на основе хромовой кислоты [6, 9].

На рис. 4 представлена зависимость  $Q^{-1} = f(T)$  для электролитического хрома, полученного из сернокислого электролита хромирования и подвергнутого наводорожи-

ванию в растворе  $H_2SO_4$  при  $i_k = 1 \text{ A/дм}^2$  в течение различного времени.

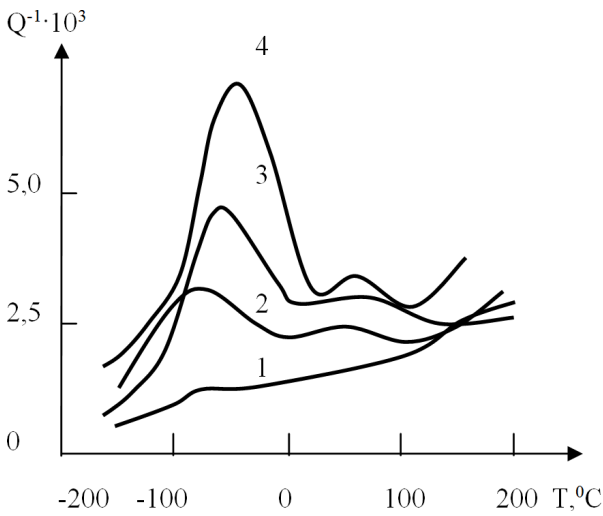


Рис. 4. Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, подвергнутого наводороживанию в  $H_2SO_4$  при  $i_k = 1 \text{ A/дм}^2$  в течение различного времени ( $\tau$ ): 1 – ненаводороженный образец; 2 –  $\tau = 8$  минут; 3 –  $\tau = 14$  минут; 4 –  $\tau = 20$  минут

Анализ данных рис. 4 показывает, что, во-первых, появляется «водородный» пик, практически отсутствующий в исходном образце, во-вторых, с увеличением времени наводороживания хромовых образцов амплитуда этого «водородного» пика внутреннего трения возрастает, что свидетельствует об образовании гидридов хрома. Также пик на зависимости внутреннего трения от температуры смещается в сторону более низких температур, что свидетельствует об уменьшении энергии связи водород-металл (рис. 4).

Далее исследована зависимость  $Q^{-1} = f(T)$  для электролитического хрома, полученного из сернокислого электролита хромирования, для разных режимов электролиза, результаты представлены на рис. 5. Постоянноточковый режим (кр. 3) по отношению к импульсному режиму (кр. 1, 2) уменьшает амплитуду пика почти вдвое, что свидетельствует об увеличении числа дефектов в структуре электролитического хрома, полученного в импульсных режимах электролиза, соответственно возрастает вероятность взаимодействия атомарного водорода с металлическим хромом.

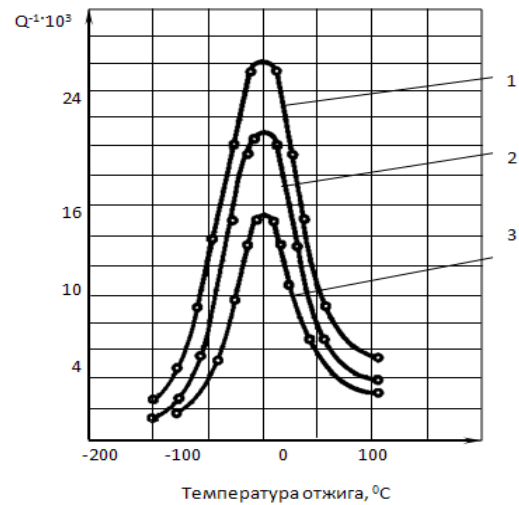


Рис. 5. Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, полученного из сернокислого электролита при непрерывном режиме (3) и импульсном (1, 2): 1 –  $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$ , время импульса 15 сек, время паузы 10 сек; 2 –  $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$ , время импульса 15 сек, время паузы 5 сек; 3 –  $i_k = 35 \text{ A/дм}^2$

В качестве второй причины можно считать повышение степени дисперсности кристаллитов формируемой структуры, связанное с возрастанием числа центров нуклеации водорода в двойном электрическом слое [17], а в монографии [19] проведено математическое моделирование водородной проницаемости металлов при наличии структурных и примесных ловушек для атомов водорода в структуре металла. В импульсных режимах электролиза в сернокислых электролитах хромирования формируется мелкокристаллическая структура, а поскольку граница зерен является местом локализации дефектов структуры, то по ним образуются гидриды. При возрастании  $\tau_{\text{паузы}}$  пик увеличивается, так как в это время возможна пассивация отдельных участков хромового электрода и образование зародышей происходит на новых участках.

### Выводы

В работе показано, что значение температуры в зоне реакции может быть определено лишь с некоторым приближением, так как в настоящее время пока не существует методов прямого наблюдения температуры в зонах, ограниченных наноразмерным диапазоном. Предложен аналитический способ определения температуры с использованием уравнения линеаризации. Показано, что

основной причиной повышения концентрации гидридов в структуре электролитических металлов является повышенная степень дефектности последних в сравнении с металлами, полученными металлургическим путем или методом вакуумной конденсации.

#### Литература

1. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. 856 с.
2. Температурные эффекты на поляризованных окислительно-восстановительных электродах / Д.Н. Грицан, Г.Л. Шатровский, В.И. Ларин, И.И. Фалько // Сообщение XI. Вестник Харьковского университета. Серия химия. 1974. Вып. 5. С. 60 - 65.
3. Определение тепловых эффектов электродных реакций по данным электротермографии/ Д.Н. Грицан, Г.Л. Шатровский, И.И. Фалько, В.И. Ларин // Докл. АН УССР. Сер. 5. 1975. № 2. С. 124 -127.
4. Исследования в области электродных процессов и электроосаждения металлов. Кадмий / Д.Н. Грицан, В.И. Ларин, Г.В. Пенцова, Г.Л. Шатровский. Харьков: Вища шк., 1974. 114 с.
5. Исследование локальной температуры в зоне электродной реакции методом электротермографии / Д.Н. Грицан, Г.Л. Шатровский, В.И. Ларин, Э.М. Златопольская, В.В. Джелали //Новая технология гальванических покрытий: тез. докл. Всесоюз. конф. Киров, 1971. С. 130 -131.
6. Фаличева А.И. Исследование процесса хромирования из электролитов, содержащих соединения хрома (III) и хрома (VI): дис. ...д-ра хим. наук. Воронеж: ВПИ, 1970. 392 с.
7. Гранкин Э.А. Влияние условий электролиза и термической обработки на внутреннее трение и коррозионную стойкость электролитического хрома: дис. ...канд. техн. наук. Воронеж: ВПИ, 1973. 116 с.
8. Шалимов Ю.Н. Исследование процесса хромирования и коррозионной стойкости покрытий, полученных в импульсном режиме из электролитов, содержащих соединения Cr(III): дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВПИ, 1972. 160 с.
9. Звягинцева А.В., Бурдыкина Р.И. Проблемы хромирования и альтернативные покрытия Ni-B //Гальванотехника и обработка поверхности. 2003. Т. XI. № 2. С. 2 - 8.
10. Звягинцева А.В., Фаличева А.И. Физико-механические свойства никелевых покрытий, легированных бором //Гальванотехника и обработка поверхности. 1997. Т.V. № 2. С. 24-29.
11. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х тт. М.: Машиностроение, 1985. Т.1. 240 с.
12. Шалимов Ю.Н. Влияние тепловых и электрических полей на электрохимические процессы при импульсном электролизе: дис. ... д-ра техн. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. 354 с.
13. Невский О.И., Гришина Е.П. Барьерные оксидные пленки на алюминии: монография. Иваново: Изд-во ИГХТУ, 2003. 84 с.
14. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002. 461 с.
15. Эверет Д. Введение в химическую термодинамику; пер. с англ. В.В. Михайлова. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 299 с.
16. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. Energetics of metal hydrides formation in electrochemical systems /NATO Science for Peace and Security Series – C: Environmental Security «Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems». Springer, 2008. P. 175- 182.
17. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014. Vol. 50. No. 6. PP. 466–477.
18. Кинетика электродных процессов/ А.Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа, Б.Н. Кабанов. М.: Изд-во Московского университета, 1952. 319 с.
19. Власов Н.М., Звягинцева А.В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2012. 248 с.

Поступила 16.03.2018; принята к публикации 17.05.2018

#### Информация об авторах

**Шалимов Юрий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79050534573, e-mail: shalimov\_yn@mail.ru  
**Звягинцева Алла Витальевна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79507501062, e-mail: zvygincevaav@mail.ru  
**Шалимов Денис Леонидович** – инженер-конструктор метрологического отдела ОАО НКТЬ "Феррит" (394066, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 179/4), тел. +7(473) 2437702  
**Руссу Александр Викторович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79518723560, e-mail: arussu@mail.ru

#### ON THE FEATURES OF THE IMPACT OF THE NEAR-ELECTRODE LAYER TEMPERATURE ON THE PROCESSES OF OBTAINING ELECTROLYTIC METALS AND ALLOYS



Yu.N. Shalimov<sup>1</sup>, A.V. Zvyagintseva<sup>1</sup>, D.L. Shalimov<sup>2</sup>, A.V. Russu<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>JSC SETB «Ferrit», Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers peculiarities of the methodology of studying electrochemical processes. The constraints are shown for a detailed study of systems based on the averaged parameter - temperature and a hypothesis is made about the true value of the temperature in a double electric layer. The results of determining the temperature of the near-electrode layer in chromium electrolytes are presented and it is shown that the main parameter determining the temperature rise relative to its average value in the electrolyte volume is the current density (anodic or cathodic), as well as the chemical composition of the electrolyte and the duration of the electrolysis. The possibility of determining the current in the near-electrode zone by the method of analytical calculation using the linearization dependences of individual parameters (current density and duration of electrolysis) is presented. The analysis of the nature of the change in the near-cathode temperature showed the maximum growth of this parameter at the initial moment. The method of internal friction establishes the relationship between the hydrogen content in electrolytic coatings under conditions of pulsed and continuous electrolysis for sulfuric acid electrolytes of chrome plating. It is established that the probability of formation of metal hydrides is the highest in structures formed by the electrolytic method from aqueous solutions of electrolytes. The temperature dependence of the internal friction makes it possible simultaneously to estimate the amount of adsorbed hydrogen, as well as the hydrogen-metal bond energy

**Key words:** near-electrode layer temperature, fine structure of electrolytic metals, internal friction, electrolysis of aqueous solutions, metal hydrides

#### References

1. Fetter K. "Electrochemical kinetics" ("Elektrokhimicheskaya kinetika"), Moscow, Khimiya, 1967, 856 p.
2. Gritsan D.N., Shatrovskiy G.L., Larin V.I., Fal'ko I.I. "Temperature effects on polarized oxidation-reduction electrodes", *Communication XI. The Bulletin of Khar'kov University. Chemistry Series (Soobshchenie XI. Vestnik Khar'kovskogo universiteta. Seriya khimiya)*, 1974, vol. 5, pp. 60-65.
3. Gritsan D.N., Shatrovskiy G.L., Fal'ko I.I., Larin V.I. "Determination of the thermal effects of electrode reactions according to electrothermography data", *Proc. of Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Ser. 5 (Dokl. AN USSR. Ser. 5)*, 1975, no. 2, pp. 124-127.
4. Gritsan D.N., Larin V.I., Pentsova G.V., Shatrovskiy G.L. "Research in the field of electrode processes and electrodeposition of metals. Cadmium" ("Issledovaniya v oblasti elektroodnykh protsessov i elektroosazhdeniya metallov. Kadmiy"), Khar'kov, Vishcha shk., 1974, 114 p.
5. Gritsan D.N., Shatrovskiy G.L., Larin V.I., Zlatopol'skaya E.M., Dzhelali V.V. "Investigation of the local temperature in the electrode reaction zone by the electrothermography method", *Proc. All-Union. Conf. "New technology of galvanic coatings" (Novaya tekhnologiya gal'vanicheskikh pokrytiy: tez. dokl. Vsesoyuz. konf.)*, Kirov, 1971, pp. 130-131.
6. Falicheva A.I. "Investigation of the chromium process from electrolytes containing compounds of chromium (III) and chromium (VI). Dr. Chemical Sciences diss." ("Issledovanie protsessa khromirovaniya iz elektrolitov, sodержashchikh soedineniya khroma (III) i khroma (VI): dis. d-ra khim. nauk"), Voronezh, VPI, 1970, 392 p.
7. Grankin E.A. "Influence of electrolysis conditions and heat treatment on internal friction and corrosion resistance of electrolytic chromium. Cand. Technical Sciences diss." ("Vliyaniye usloviy elektroliza i termicheskoy obrabotki na vnutrennee trenie i korrozionnyuyu stoykost' elektroliticheskogo khroma: dis. kand. tekhn. nauk."), Voronezh, VPI, 1973, 116 p.
8. Shalimov Yu.N. "Investigation of the chromium plating process and corrosion resistance of coatings obtained in pulsed mode from electrolytes containing Cr (III) compounds. Cand. Technical Sciences Diss." ("Issledovanie protsessa khromirovaniya i korrozionnoy stoykosti pokrytiy, poluchennykh v impul'snom rezhime iz elektrolitov, sodержashchikh soedineniya Cr(III): dis. kand. tekhn. nauk"), Voronezh, VPI, 1972, 160 p.
9. Zvyagintseva A.V., Burdykina R.I. "Chromium plating problems and alternative coatings Ni-B", *Electroplating and surface treatment (Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti)*, 2003, vol. 11, no. 2, pp. 2-8.
10. Zvyagintseva A.V., Falicheva A.I. "Physicochemical properties of nickel coatings doped with boron", *Electroplating and surface treatment (Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti)*, 1997, vol. 5, no. 2, pp. 24-29.
11. Shluger M.A. "Galvanic coatings in mechanical engineering. Reference book" ("Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroyeni. Spravochnik"), Moscow, Mashinostroyeniye, 1985, vol. 1, 240 p.
12. Shalimov Yu.N. "Influence of thermal and electric fields on electrochemical processes in pulsed electrolysis. Dr. Technical Science Diss." ("Vliyaniye teplovykh i elektricheskikh poley na elektrokhimicheskie protsessy pri impul'snom elektrolize: dis. d-ra tekhn. nauk"), Ivanovo, ISCTU, 2006, 354 p.
13. Nevskiy O.I., Grishina E.P. "Barrier oxide films on aluminium: monograph" ("Bar'ernye oksidnye plenki na alyuminii: monografiya"), Ivanovo, ISCTU, 2003, 84 p.
14. Prigozhin I., Kondepudi D. "Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures" ("Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur"), Moscow, Mir, 2002, 461 p.
15. Everett D. "Introduction to chemical thermodynamics" ("Vvedeniye v khimicheskuyu termodinamiku; per. s angl. V.V. Mikhaylov"), Moscow, Izd-vo inostr. lit., 1963, 299 p.



16. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. "Energetics of metal hydrides formation in electrochemical systems", *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security "Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems"*, Springer, 2008, pp. 175-182.
17. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. "On the stability of defects in the structure of electrochemical coatings", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 466-477.
18. Frumkin A. N., Bagotskiy V. S., Iofa Z.A., Kabanov B. N. "Kinetics of electrode processes" ("Kinetika elektrodnykh protsessov"), Moscow, Publishing house of Moscow University, 1952, 319 p.
19. Vlasov N.M., Zvyagintseva A.V. "Mathematical modelling of hydrogen permeability of metals: monograph" ("Matematicheskoe modelirovanie vodorodnoy pronitsayemosti metallov: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2012, 248 p.

Submitted 16.03.2018; revised 17.05.2018

#### Information about the authors

**Yuriy N. Shalimov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: shalimov\_yn@mail.ru

**Alla V. Zvyagintseva**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: zvygincevaav@mail.ru

**Denis L. Shalimov**, Engineer of Metrologic Department, JSC SETB «Ferrit» (179/4 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394066, Russia), tel. +7(473)2437702

**Aleksandr V. Russu**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: arussu@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ ДОБАВОК Ar, N<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>O НА КИНЕТИКУ ТРАВЛЕНИЯ ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ**© 2018 И.В. Коняев<sup>1</sup>, Л.Н. Владимирова<sup>1</sup>, Е.Н. Бормонтов<sup>1</sup>, В.А. Буслов<sup>2</sup>, И.И. Бородкин<sup>2</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>АО Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** проанализировано влияние контролируемых газовых добавок Ar, N<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>O в смеси с рабочим газом SF<sub>6</sub> на кинетические особенности процесса травления полированных монокристаллических образцов LiTaO<sub>3</sub> в низкотемпературной газоразрядной плазме. Эксперименты проводились на установке Corial D250 с реакционно-разрядной камерой диодного типа. В отличие от типичного плазмохимического процесса травления LiTaO<sub>3</sub> в плазме SF<sub>6</sub>, добавки к рабочему газу инертного аргона, а также азота и закиси азота приводят к образованию существенной ионной составляющей, тем самым изменяя механизм травления. Данные о скоростях травления позволяют дать количественную оценку активационным процессам, протекающим при фактическом реактивном ионно-плазменном травлении исследуемого материала. Сравнение экспериментальных данных позволило с уверенностью судить о наиболее существенном влиянии аргона. Выявлено наличие максимума при объемной доле аргона 40-50% с соответствующим увеличением скорости травления ~ на 30%. Добавка азота также приводит к появлению максимума при объемной доле около 30%, что соответствует росту скорости травления ~ на 15-20%. При этом механизм процесса травления аналогичен аргоновой примеси. Добавление закиси азота характеризовалось снижением скорости травления танталата лития. Увеличение объемной доли добавок более 50% приводило к падению скоростей травления в смесях с Ar и N<sub>2</sub> из-за существенного снижения концентрации рабочего газа SF<sub>6</sub> и, как следствие, уменьшения концентрации радикалов фтора – основной компоненты химического травления

**Ключевые слова:** плазмохимия, танталат лития, активационный процесс, газовая добавка, фторсодержащая плазма

**Введение**

Состав рабочего газа - доминирующий фактор, определяющий скорость травления и селективность при плазмохимическом и реактивном ионно-плазменном травлении. Одним из методов изменения состава и концентрации рабочего газа является контролируемое введение газовых добавок. Добавки химически активных или инертных газов в основной рабочий газ вызывают, прежде всего, изменение в плазме распределения электронов по энергиям, что влияет на процессы диссоциации молекул рабочего газа, поскольку скорость диссоциации является функцией энергии электронов. Кроме того, примесный химически активный газ может взаимодействовать в плазме с продуктами диссоциации основного газа, изменяя качественный состав и количество реактивных частиц [1].

Многочисленные исследования, проведенные в рамках изучения возможностей повышения эффективности плазмохимического травления путем введения газовых добавок к рабочему газу, показывают как их положительное, так и отрицательное влияние. Широкое распространение получило

использование в качестве плазмообразующих сред бинарных газовых смесей [2]. Наряду с традиционными параметрами, определяющими характеристики плазменной системы (такими как мощность подводимого разряда, давление в рабочей камере и температура), регулирование состава газовой смеси выступает в качестве гибкого инструмента контролируемого изменения кинетических параметров. Из литературы известно положительное влияние инертных газов (наиболее часто используемыми из которых являются аргон (Ar), гелий (He)), а также азота (N<sub>2</sub>), кислорода (O<sub>2</sub>) и водорода (H<sub>2</sub>).

При ионно-стимулированном плазмохимическом травлении в плазме работают оба механизма травления: ионное распыление/активация и химическое травление. Такой метод травления называют реактивным ионно-плазменным травлением (РИПТ). Особенно велика роль химического механизма травления, осуществляемого в плазме на основе галогенсодержащих газов из-за их высокой химической активности. Образующееся при этом большое количество различных продуктов реакции существенно влияет на протекание процесса травления. При высокой летучести они могут легко десорбироваться с

поверхности подложки, а при низкой - оставаться на поверхности и препятствовать травлению. В последнем случае для их удаления обязательна ионная бомбардировка поверхности [3].

### Методика эксперимента и оборудование

Исследовалось влияние введения контролируемых газовых добавок на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме на основе гексафторида серы. В качестве объектов травления использовались полированные монокристаллические образцы Y-среза размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ .

Перед травлением образцы подвергались циклу отмывки в смеси КАРО ( $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4=3:7$ ) в течение 7 минут при  $T=130^\circ\text{C}$  для удаления органических загрязнений, затем промывались в деионизованной воде. После - в RCA1 ( $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:1:5$ ) в течение 5 минут при  $T=75^\circ\text{C}$  с последующей отмывкой в деионизованной воде.

Эксперименты по плазменной обработке проводились на установке Corial D 250 (Corial Company, Франция), оборудованной изотермическим плазменным реактором диодного типа с контролем температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$ , которая обеспечивает возможность создания высокоплотной плазмы газового разряда при пониженном давлении. Схематическое устройство и характеристики плазменной системы более подробно изложены в [4]. В качестве плазмообразующего газа использовался гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ). В качестве контролируемых добавок в объемных долях вводились Ar,  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Суммарный поток газов составлял  $60 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Эксперименты проводились при поддержании температуры подложки  $T=280^\circ\text{C}$ , постоянном давлении  $P=210 \text{ Па}$  и мощности  $W=250 \text{ Вт}$ .

Методика определения скорости травления основана на изменении веса образцов до и после травления, при этом фторид лития ( $\text{LiF}$ ) - твердый продукт реакции предварительно удалялся выдерживанием в смеси RCA1 в течение 5 мин. при  $T=75^\circ\text{C}$  с последующей отмывкой в деионизованной воде.

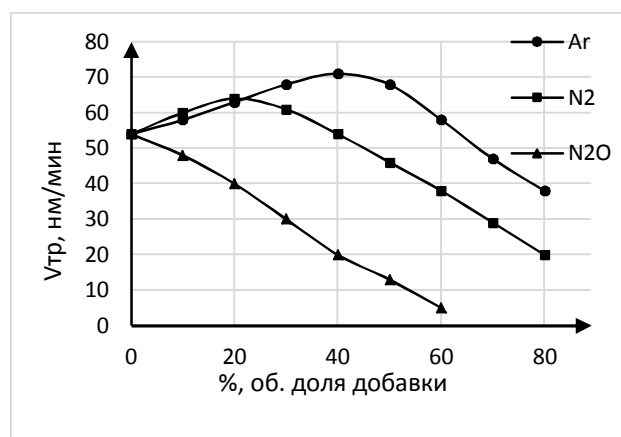
Для расчета скорости реакции использовалась формула:

$$V_{\text{тр}} = \frac{m_0 - m}{\rho S t},$$

где  $S$  - площадь, подвергаемая травлению,  $m_0$  - начальная масса образца,  $m$  - конечная масса образца,  $\rho$  - плотность танталата лития -  $7.46 \text{ г/см}^3$ ,  $t$  - время травления.

### Экспериментальные результаты и обсуждение

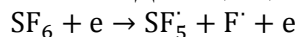
На рисунке приведено сопоставление скоростей травления танталата лития в зависимости от объемных долей аргона, азота и закиси азота в смеси с рабочим газом  $\text{SF}_6$ .



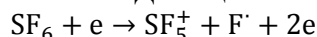
Зависимость скорости травления  $\text{LiTaO}_3$  в плазме  $\text{SF}_6$  от объемной доли газовых добавок Ar,  $\text{N}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$   
 $T=280^\circ\text{C}$ ,  $P=210 \text{ Па}$ ,  $W=250 \text{ Вт}$

Процесс травления в плазме гексафторида серы является преимущественно химическим. Реакции для  $\text{SF}_6$  в условиях низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазмы (ННГП) также достаточно хорошо изучены. Основным механизмом генерации химически активных частиц можно представить исходя из следующих схем:

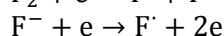
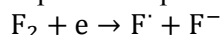
1. Диссоциация электронным ударом:



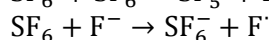
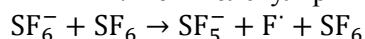
2. Диссоциативная ионизация:



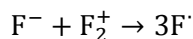
3. Диссоциативное присоединение и отрыв электрона:



4. Ион-молекулярные реакции:



5. Ион-ионная рекомбинация:



Приведенные выше несколько реакций, естественно, далеко не исчерпывают всего многообразия физико-химических взаимо-

действий в плазме SF<sub>6</sub>. Химически активными частицами являются также молекулы F<sub>2</sub>, радикалы SF<sub>m</sub> (m≥1), положительные и отрицательные ионы.

Анализируя данные, можно сказать о наиболее существенном влиянии аргона. Наблюдается наличие максимума при его объемной доле 40-50% с соответствующим увеличением скорости травления ~ на 30%.

Наиболее вероятными процессами, характерными для атомов аргона в низкотемпературной плазме, являются реакции под действием электронного удара, представленные в таблице [5].

Реакционные схемы процессов с участием атомов аргона

Схема реакции	Энергия активации
Ar+e→Ar <sup>+</sup> +2e	15,76 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> , <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )+e	11,6 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>1</sup> P <sub>2</sub> , <sup>3</sup> P <sub>0</sub> )+e (каскад)	13,1 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )+e	11,6 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>3</sup> P <sub>0</sub> , <sup>1</sup> P <sub>1</sub> )+e (каскад)	13,1 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>1</sup> P <sub>1</sub> )+e	11,8 эВ
Ar+e→Ar <sup>*</sup> ( <sup>1</sup> P <sub>1</sub> )+e (каскад)	12,9 эВ

Смесь Ar с SF<sub>6</sub> существенно увеличивает число возможных реакций, происходящих в плазме. При этом наиболее вероятным механизмом, приводящим к увеличению скорости травления на начальном этапе, по-видимому, является активация поверхностных атомов за счет бомбардировки ионами Ar<sup>+</sup>, что, в свою очередь, приводит к передаче кинетической энергии ионов атомам поверхности, тем самым переводя их в возбужденное состояние и стимулируя химические реакции. При используемом рабочем давлении в вакуумной системе P=210 Па (P>>10 Па) энергия образованных ионов мала вследствие малой длины свободного пробега. Таким образом, вклад ионной составляющей в процесс травления возможен лишь через активацию поверхности, так как физическое распыление реализовать при данных условиях невозможно. Положительным эффектом в данном случае является более мягкий режим травления и, как

следствие, меньший эффект радиационных повреждений поверхности.

Появление твердого продукта реакции (LiF) в процессе травления исключает активное влияние ионов на обрабатываемую поверхность. Основным механизмом, активирующим процесс травления, является повышение скорости генерации химически активных частиц за счет увеличения скорости диссоциации основного газа SF<sub>6</sub> электронным ударом.

Увеличение объемной доли аргона более 50 об.% приводит к снижению скорости травления ввиду того, что она лимитируется концентрацией радикалов фтора, доля которых существенно снижается.

Помимо этого, механизмом, повышающим скорость травления даже при малых добавках аргона, является механизм передачи энергии метастабильными атомами аргона, выступающий в качестве дополнительного канала генерации электронов и проходящий по схеме:



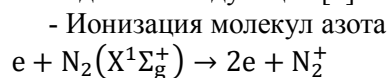
где Ar<sup>\*</sup> - возбужденный атом аргона, B – атом или молекула с потенциалом ионизации ниже, чем энергия возбужденного состояния атома аргона.

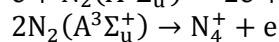
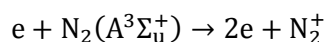
Целесообразность добавления азота в качестве контролируемой добавки также подтверждена экспериментально. При этом суммарный вклад активационных процессов, вносимый компонентами, образующимися в результате разложения N<sub>2</sub> в плазме, несколько ниже, чем вклад аргона, но механизм, по-видимому, аналогичный. Диссоциация молекул азота является сложным эндотермическим процессом из-за большой энергии связи.



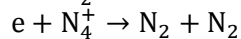
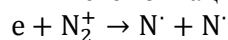
Так как основным механизмом диссоциации является электронное возбуждение, данный процесс более интенсивно протекает при низких давлениях.

Наблюдается максимум при объемной добавке азота ~ 30%, соответствующий росту скорости травления на 15-20%. Дальнейшее увеличение приводит к снижению положительного эффекта. При введении N<sub>2</sub> активационные процессы могут протекать по нескольким направлениям. В качестве наиболее вероятных реакций, проходящих в плазме, можно выделить следующие [6]:

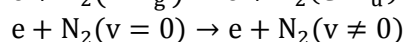
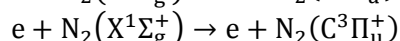
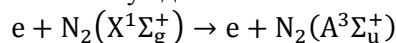




- Рекомбинационные процессы



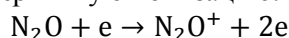
- Возбуждение



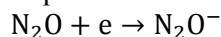
Для исследования способов повышения скорости травления  $LiTaO_3$  во фторсодержащей плазме также применялась добавка закиси азота, доля которой в смеси менялась от 0 до 60 об.%. Дальнейшее увеличение объемной доли добавки приводило к неустойчивости плазменной системы при данных параметрах мощности и рабочего давления. При этом предполагалось увеличение скорости травления за счет суммарного вклада азотной и кислородной составляющих.

Механизм разложения закиси может идти по целому ряду направлений, что, в конечном счете, приводит к оказанию многофакторного влияния данной добавки.

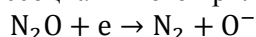
Выделяют первичную ионизацию:



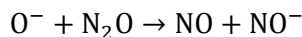
Прилипание электрона:



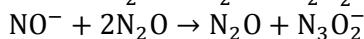
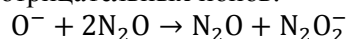
Нагрев  $N_2O$  в плазмохимических системах приводит к диссоциации закиси азота и восстановлению молекулярного азота по механизму диссоциативного прилипания:



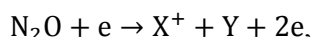
Селективное окисление  $N_2O$  является возможным в неравновесных условиях плазмы посредством диссоциации кислорода и последующей экзотермической реакции с образованием  $NO$ :



Помимо этой выделяют и другие реакции с участием отрицательных ионов:



Но основной вклад вносят реакции диссоциативной ионизации  $N_2O$ , проходящие по схеме:



где  $X^+$ - фрагмент исходной молекулы, а  $Y$ - соответствующий нейтральный фрагмент.

В зависимости от энергии ионизирующего электрона и сечения ионизации возможно формирование  $N_2O^+$ ,  $N_2^+$ ,  $NO^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$ [7].

Анализируя вклад закиси азота, следует обратить внимание на сложный суммарный механизм активации, так как помимо положительных и отрицательных ионов среди продуктов реакций образуются добавки, разбавляющие и снижающие эффективность газовой смеси, такие как  $NO$ . Наблюдается лишь устойчивое снижение скорости травления  $LiTaO_3$  при увеличении объемной доли добавки  $N_2O$ .

## Заключение

В статье проанализировано влияние контролируемых газовых добавок  $Ag$ ,  $N_2$  и  $N_2O$  на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме на основе гексафторида серы.

Воздействие инертных добавок  $Ag$  и  $N_2$  состоит в том, что при их ионизации в плазме образуются высокоэнергетичные электроны, которые способны повысить степень диссоциации и ионизации рабочего газа. Таким образом, можно изменить концентрацию и состав реактивных частиц в плазме. Также путем ионной бомбардировки поверхности можно достичь активации поверхностных центров и дефектов, стимулируя химические реакции на поверхности и ускоряя десорбцию продуктов реакции.

Добавление инертной добавки  $Ag$  в газовую смесь позволяет ускорить процесс травления. Наибольшая скорость травления достигается при соотношении потоков  $SF_6/Ar=1:1$ . Дальнейшее увеличение доли аргона приводит к снижению скорости травления, что, вероятно, связано со сменой лимитирующей стадии процесса и его переходом из кинетической в диффузионную область протекания. Вследствие того, что давление в камере поддерживалось постоянным, увеличение потока аргона приводило к уменьшению концентрации  $SF_6$  в газовой смеси и, как следствие, к снижению концентрации химически активных фторсодержащих частиц, скорость диффузии которых лимитировала процесс травления в данных условиях.

Добавка  $N_2$  в объемной доле  $\sim 30\%$  приводит к увеличению скорости травления на 15-20% по механизму, аналогичному  $Ag$ .

Закись азота в качестве контролируемой примеси в гексафториде серы не увеличивает реактивность плазмы из-за образования



продуктов диссоциации, снижающих концентрацию химически активных фтор-содержащих частиц.

#### Литература

1. Григорьев Ф.И. Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники: учеб. пособие. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2003. 48 с.

2. Ефремов А.М., Светцов В.И., Рыбкин В.В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии: учеб. пособие. Иваново: ГОУ ВПО "Иван. гос. хим.-технол. ун-т", 2006. 260 с.

3. Сейдман Л.А. Формирование трехмерных структур в подложках карбида кремния плазмохимическим травлением // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18. Вып. 3. С. 157-171.

4. Особенности кинетики травления ниобата и танталата лития во фторсодержащей плазме/ И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, Е.А. Сизаск// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 123-127.

5. Ефремов А.М., Светцов В.И. Неравновесная плазма хлора: свойства и применение. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 216 с

6. Плазменные технологии в микроэлектронике: учеб.-метод. пособие для вузов. Ч. 3: Кинетика процессов реактивного ионно-плазменного травления полупроводников в галогенсодержащей плазме/ сост. Л.Н. Владимирова и др. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014. 20 с.

7. Raju G.G. Gaseous Electronics: Tables, Atoms, and Molecules/ CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL 2012, 790 pages.

Поступила 04.04.2018; принята к публикации 17.05.2018

#### Информация об авторах

**Коняев Иван Васильевич** – аспирант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: www.450\_asd@mail.ru, тел. 89102417276

**Владимирова Людмила Николаевна** – канд. хим. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: Invlad@mail.ru, тел. 89514525410

**Бормонтов Евгений Николаевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: me144@phys.vsu.ru, тел. 89155817522

**Буслов Вадим Александрович** – канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, АО Научно-исследовательский институт электронной техники (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: vadbus@mail.ru, тел. 89205215412

**Бородкин Игорь Иванович** – канд. техн. наук, начальник лаборатории, АО Научно-исследовательский институт электронной техники (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: dif@niiet.ru, тел. 89513445221

### INFLUENCE OF GAS ADDITIVES Ar, N<sub>2</sub> AND N<sub>2</sub>O ON THE KINETICS OF ETCHING OF LITHIUM TANTALATE IN FLUORINATED PLASMA

I.V. Konyaev<sup>1</sup>, L.N. Vladimirova<sup>1</sup>, E.N. Bormontov<sup>1</sup>, V.A. Buslov<sup>2</sup>, I.I. Borodkin<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Research Institute of Electronic Engineering, Voronezh, Russia

**Abstract:** the influence of controlled gas additives Ar, N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in the mixture with working gas (SF<sub>6</sub>) on kinetic features of the etching process of polished single-crystal LiTaO<sub>3</sub> samples in low-temperature fluorinated plasma is analyzed in the article. Experiments were performed on a Corial D250 with a diode-type reaction chamber. In contrast to the typical plasma-chemical etching of LiTaO<sub>3</sub> in SF<sub>6</sub> plasma, the addition of inert argon, as well as nitrogen and nitrous oxide, lead to the formation of a significant ionic component, thereby making the etch mechanism different. Data on the etching rate make it possible to quantify the activation processes reactive ion plasma etching of the investigated material. Comparing the data, we can make the conclusion about the most significant contribution of argon. The presence of a maximum at a volume fraction of argon about 40-50% is observed. This addition led to an increase of etching rate by 30%. The addition of nitrogen also has a maximum with a volume fraction 30% leading to an increase of etching rate by 15-20%. The etching mechanism is analogous to the argon addition. The addition of nitrous oxide led to a decrease in the etching rate. Increase in addition by more than 50% vol. led to a decrease in etching rate in mixtures with argon and nitrogen caused by a change limiting process due to a decrease in the concentration of the working gas (SF<sub>6</sub>) and, as a consequence, a decrease in the concentration of fluorine radicals, the main component of chemical etching

**Key words:** plasma chemistry, lithium tantalite, activation process, gas addition, fluorinated plasma

#### References

1. Grigor'ev F.I. "Plasma-chemical and ion-chemical etching in microelectronics technology: Manual" ("Plazmokhimicheskoe i ionno-khimicheskoe travlenie v tekhnologii mikroelektroniki: Uchebnoe posobie"), Moscow, MSUEM, 2003, 48 p.
2. Efremov A.M., Svetstov V.I., Rybkin V.V. "Vacuum-plasma processes and technologies: Manual" ("Vakuumno-plazmenne protsessy i tekhnologii: Ucheb. posobie"), Ivanovo, ISCTU, 2006, 260 p.
3. Seidman L.A. "Formation of three-dimensional structures in substrates of silicon carbide by plasma-chemical etching", *Proc. of Higher Schools. Materials of electronic engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Materialy elektronnoi tekhniki)*, 2015, vol. 18, iss. 3, pp. 157-171.
4. Konyaev I.V., Vladimirova L.N., Bormontov E.N., Buslov V.A, Sizask E.A. "Peculiarities of the etching kinetics of lithium niobate and tantalate in a fluorine-containing plasma", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 123-127.
5. Efremov A. M., Svetstov V. I. "Nonequilibrium plasma of chlorine: properties and applications" ("Neravnovesnaya plazma khloro: svoistva i primeneniye"), Moscow, FIZMATLIT, 2012, 216 p.
6. Vladimirova L.N. "Plasma technologies in microelectronics: a teaching-methodological manual for high schools. Part 3. Kinetics of reactive ion-plasma etching of semiconductors in a halogen-containing plasma" ("Plazmennyye tekhnologii v mikroelektronike: uchebno-metodicheskoe posobie dlya vuzov Ch. 3. Kinetika protsessov reaktivnogo ionno-plazmennogo travleniya poluprovodnikov v galogensoderzhashchei plazme"), Voronezh, VSU, 2014, 20 p.
7. Raju G.G. "Gaseous electronics: tables, atoms, and molecules", CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL 2012, 790 p.

Submitted 04.04.2018; revised 17.05.2018

#### Information about the authors

**Ivan V. Konyaev**, Graduate Student, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [450\\_asd@mail.ru](mailto:450_asd@mail.ru), tel. 89102417276

**Lyudmila N. Vladimirova**, Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [lnvlad@mail.ru](mailto:lnvlad@mail.ru), tel. 89514525410

**Evgeniy N. Bormontov**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [me144@phys.vsu.ru](mailto:me144@phys.vsu.ru), tel. 89155817522

**Vadim A. Buslov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Research Institute of Electronic Engineering (5 Sarykh Bol'shevnikov st., Voronezh 394033, Russia), e-mail: [vadbuss@mail.ru](mailto:vadbuss@mail.ru), tel. 89205215412

**Igor' I. Borodkin**, Cand. Sc. (Technical), Laboratory Head, Research Institute of Electronic Engineering (5 Sarykh Bol'shevnikov st., Voronezh, 394033, Russia), e-mail: [dif@niiet.ru](mailto:dif@niiet.ru), tel. 89513445221

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ

© 2018 Е.А. Никитина<sup>1</sup>, И.М. Голев<sup>1</sup>, А.В. Сергеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

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

**Аннотация:** обсуждаются перспективы применения градиентных схем измерения в системах навигации и обнаружения с использованием характеристик аномального магнитного поля Земли и магнитного поля искусственных объектов. Приводится анализ измеряемых характеристик магнитного поля. Показано, что измерение градиента модуля вектора магнитной индукции повышает точность геопозиционирования. Измерение вторых производных по направлению максимального изменения поля позволяет разделить аномальное магнитное поле Земли и магнитное поле близкорасположенного объекта, что может быть использовано для уменьшения неопределенности показаний магнитометра, вносимой магнитным полем самого объекта, что и позволяет повысить точность определения положения подвижного объекта. Рассмотрены особенности пространственной селективности различных компонент измеряемого магнитного поля. Обсуждаются особенности измерения магнитного поля на подвижном объекте, приводятся способы описания собственного магнитного поля подвижного объекта, вносящего отклонения в показания магнитометра, измеряющего характеристики аномального поля. Обусловливается связь режимов эксплуатации подвижного объекта с изменением характеристик собственного магнитного поля. Рассматриваются способы уменьшения девиации магнитометра. Обсуждается эффективность использования градиентных схем измерения магнитного поля в задачах обнаружения объектов, имеющих собственное магнитное поле

**Ключевые слова:** магнитометрия, градиентометр, аномальное поле, навигация по геофизическим полям

### Введение

Задача измерений градиентов магнитного поля актуальна для самого широкого круга исследований: от медицинской диагностики до геологоразведки и военного дела. Для разработки и развития военной и специальной техники особенно востребованными являются задачи навигации и обнаружения с использованием характеристик магнитного поля Земли [1-3].

В настоящее время активно исследуются перспективы развития систем навигации по геофизическим полям, в том числе, по аномальному магнитному полю Земли. Эти системы могут обеспечить как автономность и глобальность измерений, так и их помехозащищенность, однако при использовании магнитометрических систем предыдущего поколения с помощью систем навигации по магнитному полю не удавалось получить точность геопозиционирования и локализации объекта, сопоставимую с точностью альтернативных систем навигации [4].

### Постановка задачи

Одной из первостепенных задач при обработке показаний магнитометрической системы является задача разделения различных

источников, определяющих магнитную индукцию поля в данной точке. Известно, что полный вектор индукции измеряемого магнитного поля может быть представлен суперпозицией следующих компонент:

$$\vec{B} = \vec{B}_n + \vec{B}_a + \vec{B}_v + \vec{B}_d, \quad (1)$$

где  $\vec{B}_n$  - нормальное поле Земли,  $\vec{B}_a$  - аномальное поле Земли,  $\vec{B}_v$  - вариационная составляющая магнитного поля, включающая возмущенную и невозмущенную составляющие,  $\vec{B}_d$  - девиации, привносимые самим движущимся объектом, на котором расположено магнитоизмерительное оборудование.

Нормальное магнитное поле, включающее в себя дипольное поле, создаваемого токами в ядре, а также поле материковых аномалий, может быть задано своим потенциалом в аналитическом виде [5, 6]:

$$U_n(\rho, \theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^N \left( \frac{R}{\rho} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta), \quad (2)$$

где  $\rho$  – расстояние от центра Земли;  $\theta$  – дополнение географической широты (полярный угол);  $\lambda$  – долгота;  $R$  – стандартный радиус Земли (6371,2 км);  $g_n^m(t)$  и  $h_n^m(t)$  – коэффициенты Гаусса, зависящие от времени  $t$ , задаются на эпоху 5 лет (в настоящее время – на один год);  $P_n^m$  – нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени  $n$ , порядка  $m$ .

Соответственно, вектор магнитной индукции нормального поля при известных коэффициентах Гаусса определяется также аналитически выражением

$$\vec{B}_n = -\nabla U_n. \quad (3)$$

Нормальное поле вносит основной вклад в полное измеряемое поле, его модуль составляет 20000 – 70000 нТл, возрастая от экватора к полюсам.

Аномальное поле  $\vec{B}_a$ , измерения которого имеют первостепенное значения для задач магнито- и геологоразведки, а также при конструировании систем магнитной навигации, отражает результирующее поле региональных и локальных аномалий, создаваемых геологическими особенностями верхних слоев земной коры. Средние значения модуля этого слагаемого  $\sim 200$  нТл, однако в отдельных случаях аномальное поле может достигать тысяч и даже десятков тысяч нанотесла. Аномальное поле может характеризоваться как положительными значениями в случае, если проекция его вектора на ось  $z$  совпадает по знаку с соответствующей проекцией нормального поля, так и отрицательными в противоположном случае. Необходимость выделения именно этой составляющей магнитного поля из общего сигнала, регистрируемого магнитометром, обусловлена высокой временной стабильностью данной компоненты, а следовательно, и возможностью нахождения соответствия между значением аномального поля в точке и географическими координатами.

Необходимо учесть тот факт, что только аномальное магнитное поле обладает высокой временной стабильностью, тогда как нормальное поле претерпевает вариации, что обуславливает необходимость регулярных измерений и переопределений коэффициентов уравнения (2). Кроме того, дополнительным

источником неопределенностей при измерениях магнитного поля Земли выступает поле магнитных бурь  $\vec{B}_v$ , создаваемых, в основном, токами в магнитосфере и ионосфере. Эти вариации поля носят аperiодический характер и могут достигать нескольких тысяч нанотесла.

Важнейшей задачей при конструировании систем навигации по магнитному полю Земли является компенсация или корректный учет помех, привносимых как вариационной составляющей магнитного поля и магнитными бурями  $\vec{B}_v$ , так и самим аппаратом, на котором установлена магнитометрическая система  $\vec{B}_d$ . Девиация показаний магнитометра вследствие влияния самого аппарата достаточно существенна. Для задач воздушной навигации поле, создаваемое летательным аппаратом, описывалось моделью Пуассона, а также ее развитием и уточнением – моделью Лелиака [7, 8]:

$$\vec{B}_d = \vec{K} + L\vec{B}_0 + P \frac{d\vec{B}_0}{dt}, \quad (4)$$

где внешнее поле определяется выражением:

$$\vec{B}_0 = \vec{B}_n + \vec{B}_a + \vec{B}_v. \quad (5)$$

В данной модели девиация показаний магнитометра, индуцированная полем подвижного объекта, складывается из следующих компонент. Вектор  $\vec{K}$  полагается постоянным для данной точки, в которой установлен магнитометр, и отражает вклад совокупного поля источников на подвижном объекте с собственным постоянным магнитным полем. Компонента поля помехи  $L\vec{B}_0$  создается конструкциями и материалами, намагничивающимися во внешнем поле Земли, магнитный момент которых пропорционален проекции внешнего поля на ось наилегчайшего намагничивания. Последнее слагаемое формулы (4) характеризует поле вихревых токов, появляющихся при изменении внешнего магнитного поля.

В модели Лелиака величины  $L$  и  $P$  представляются матрицами размера  $3 \times 3$ , элементы которых определяются для конкретных точек установки магнитных и градиентометрических датчиков. Однако

данная модель не учитывает магнитную индукцию полей, создаваемых контурами с токами. Для корректного описания вклада этой составляющей необходимо учесть зависимость тока и пространственной ориентации контура от времени, поэтому такое слагаемое уже не может быть задано вектором, постоянным во времени в данной точке. Поэтому целесообразно ввести новое слагаемое, поправочное к постоянному в данной точке вектору:

$$\vec{B}_d = \vec{K}_1 + \vec{K}_2 + L\vec{B}_0 + P \frac{d\vec{B}_0}{dt}. \quad (6)$$

Здесь  $\vec{K}_1$  - поле постоянных магнитов и элементов с большими значениями коэрцитивных сил,  $\vec{K}_2$  - суммарный вклад поля контуров с токами.

Для наглядности модели вектор  $\vec{K}_2$  может быть рассмотрен как суммарный вектор магнитной индукции магнитных диполей:

$$\vec{K}_2 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^N \left( \frac{3(\vec{M}_i, \vec{r}_i)\vec{r}_i}{r_i^5} - \frac{\vec{M}_i}{r_i^3} \right), \quad (7)$$

где  $\vec{r}_i$  и  $\vec{M}_i$  - радиус вектор i-го контура с током и его магнитный момент соответственно, N – количество контуров.

Рассмотрим теперь компоненту помехи, создаваемую конструкциями, намагниченными во внешнем магнитном поле. Матрица  $L$  определяется как магнитными свойствами материала, так и его геометрическими свойствами, ее элементы могут быть заданы постоянными в данной точке пространства.

Последнее слагаемое формулы (4) определяется индукцией поля вихревых токов. Эти вихревые токи появляются как в результате изменения модуля внешнего поля, так и за счет изменения его направления, возникающего при движении летательного аппарата в магнитном поле Земли. Заметные по величине магнитные поля будут возникать лишь в конструкциях большой площади. Для самолета такими конструкциями являются фюзеляж, хвостовое оперение, крылья. Значение суммарной индукции магнитных полей для самолетов обычно на порядок меньше модуля индукции, создаваемой намагниченными массами.

Отметим, что при установке магнитометра на подвижный объект, имеющий 6 степеней свободы, необходимо согласовать показания магнитометра в связанной системе координат

со значением индукции внешнего поля в путевой системе координат. Для учета этой зависимости слагаемые, связанные с внешним полем  $\vec{B}_0$ , необходимо дополнить множителем  $C_n$ , который позволяет учесть повороты подвижного объекта:

$$\vec{B}_m = \vec{B}_0 + C_n L \vec{B}_0 + C_n P \frac{d\vec{B}_0}{dt} + \vec{K}_1 + \vec{K}_2, \quad (8)$$

где матрица направляющих косинусов может быть представлена углами азимута (рысканья)  $\psi$ , крена  $\vartheta$  и тангажа (дифферента)  $\gamma$ :

$$C_n = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\vartheta & \sin\vartheta & -\sin\psi \cos\vartheta \\ \sin\psi \sin\gamma - \cos\psi \sin\vartheta \cos\gamma & \cos\vartheta \cos\gamma & \cos\psi \sin\gamma + \sin\psi \cos\gamma \sin\vartheta \\ \sin\psi \cos\gamma + \cos\psi \sin\vartheta \sin\gamma & -\cos\vartheta \sin\gamma & \cos\psi \cos\gamma - \sin\psi \sin\gamma \sin\vartheta \end{pmatrix} \quad (9)$$

Отметим, что навигационные магнитометрические системы, основанные на магнитометрических датчиках предыдущего поколения, не позволяли получить достаточно высокую точность определения координат подвижного объекта, тогда как применение сверхчувствительных датчиков магнитного поля, которые получили распространение и начали активно применяться за последние 10 лет (квантовые магнитометры с оптической накачкой, сверхпроводящие квантовые интерферометрические датчики – СКВИДы [9, 10]), могут существенно повысить точность навигации по магнитному полю (таблица).

### Повышение точности

Вместе с применением магнитометрической аппаратуры с наилучшими характеристиками одним из способов, позволяющих повысить точность магнитометрических систем навигации, является применение градиентометрических схем первого и высших порядков.

Известно, что для навигации по магнитному полю основной задачей является разделение вкладов от различных источников поля и дальнейшее установление соответствия между модулем индукции аномального поля на определенной высоте (или его z-компоненты) и географическими координатами объекта.

В ряде работ [12, 13] было показано, что измерение градиента суммарного магнитного поля, а также его компонент, позволяет повысить селективность источников. Так, градиент поля магнитных вариаций пренебрежимо мал в сравнении с соответствующими градиентами аномального



поля и поля помех летательного аппарата. Соответственно, измерение градиента в дополнение к измерению модуля поля и его компонент позволяет исключить влияние

магнитных бурь, магнитную индукцию которых сложно задать аналитически.

Параметры магнитных систем навигации (МСН) различных типов [4].

Чувствительность магнитометрических датчиков	Используемое навигационное поле/ навигационная система	Диапазон высот измерений	Точность определения местоположения
10 нТл	Главное магнитное поле Земли (IGRF)	Средние и большие высоты	1-10 км
	Аномальное поле особенностей рельефа с малыми градиентами	Малые и средние высоты	100 м - 1 км
	Высокоградиентное аномальное поле естественных источников и искусственных объектов	Малые высоты	Первые десятки метров
3 нТл	Аномальное магнитное поле Земли / СНМП+БИНС	Малые и средние высоты	Над сушей – 30-50 м, над океаном –200-250 м
1 нТл	Высокоградиентное аномальное поле естественных источников и искусственных объектов	Малые высоты и наземные измерения	Метры – десятки метров

Рассмотрим градиентометрическую систему, образованную векторными магнитометрическими датчиками, т.е. магнитометрами, регистрирующими проекцию компоненты поля на измерительную ось прибора. Так, при измерении первой производной компоненты z индукции будут учтены вклады следующих слагаемых:

$$\frac{d\vec{B}}{dr} = \frac{d\vec{B}_n}{dr} + \frac{d\vec{B}_a}{dr} + \frac{d\vec{B}_d}{dr}, \quad (10)$$

где  $\vec{B}_d$  - поле девиации, привносимое подвижным объектом, переопределенное с учетом углов рысканья, крена и тангажа (12, 13).

Вторая производная по направлению максимального изменения фактически будет содержать только вклад суммарного поля близко расположенных источников, то есть поля помех аппарата и малый вклад градиента поля аномалий, значение которого будет варьироваться в зависимости от величины магнитного момента аномалии и глубины ее залегания, причем на высотах аэромагнитных съемок, как правило, выполняется следующее условие [14]:

$$\frac{d^2 B}{dr^2} \approx \frac{d^2 \vec{B}_d}{dr^2}. \quad (11)$$

Поэтому, используя информацию о компонентах второй производной модуля вектора магнитной индукции поля по направлению максимального изменения, возможно в реальном времени вносить уточняющие коэффициенты, варьирующиеся в зависимости от режима эксплуатации.

Так, в выражении (6) для поля помех подвижного объекта с учетом измерений компонент вторых производных индукции магнитного поля по направлению возможно задать слагаемое  $\vec{K}_2$ , создаваемое контурами с токами, величина которых зависит от режима нагрузки. Остальные составляющие помех подвижного объекта или однозначно связаны с вектором магнитной индукции внешнего поля, а также геометрическими и магнитными свойствами исследуемых объектов (магнитное поле конструкций переменной намагниченности и магнитное поле вихревых токов), или же остаются постоянными (поле намагниченных объектов, характеризующихся большим значением коэрцитивной силы).

Таким образом, задавая  $\vec{K}_2$  суммой магнитных диполей (или же любым другим ранее известным распределением) с переменными магнитными моментами, определяемыми силой тока и геометрией контуров (8), считая расстояние до источников помех, а также направление магнитных моментов известными (или контролируемо изменяющимися), возможно определить индуцируемое токами в контурах магнитное поле. В случае если проведение калибровочного эксперимента невозможно или нецелесообразно, по значениям производных компонент магнитного поля по направлению (15) могут быть также определены компоненты постоянного вектора  $\vec{K}_1$ .

Информация о первой и высших производных модуля и компонент индукции магнитного поля может быть эффективно использована и для задач обнаружения объектов. В отличие от задачи компенсации собственных помех, расположение которых наперед задано, в задаче обнаружения неизвестны как модуль магнитного момента определяемого объекта, так и его направление, а также расстояние до него. Поэтому для локализации неизвестного объекта, задаваемого, например, моделью магнитного диполя, необходимо решение системы из 6 уравнений, в которых неизвестными являются компоненты  $M_x, M_y, M_z$ , а также компоненты  $x, y, z$  радиус-вектора [12]. При построении магнитометрической системы на векторных магнитометрах измерение производных по координатам от компонент индукции магнитного поля при условии разделения внешнего поля Земли, собственного поля подвижного объекта и магнитного поля обнаруживаемого объекта

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

независимыми оказываются 5 компонент, что не позволяет однозначно определить поле внешнего магнитного диполя. Однако в совокупности с измерением высших

производных от компонент вектора магнитной индукции возможно не только определить направление на объект, но и уточнить его протяженность [12].

### Заключение

Таким образом, применение магнито-градиентных установок для навигации и обнаружения может обеспечить следующие преимущества:

1. Измерение градиента модуля вектора магнитной индукции поля Земли позволяет исключить вариационную составляющую магнитного поля Земли и компенсировать влияние магнитных бурь, а также повысить пространственную чувствительность системы.

2. Измерение вторых производных компонент индукции магнитного поля по направлению позволяет селективировать поля источников, расположенных в ближней и дальней зонах от измерительной установки, а значит, делает возможным более корректный учет помех, вносимых подвижным объектом.

3. Измерение первой и высших производных по направлению может быть эффективно использовано для решения задач обнаружения, причем как стационарных, так и движущихся источников. Конструкция градиентометрической системы, количество измеряемых компонент, а также требования к магнитометрическому оборудованию могут быть сформулированы под конкретную практическую задачу.

### Литература

1. Militarily Critical Technologies List – MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA. 2014. 87 p.
2. Работы в интересах создания пассивных систем навигации на основе магнитного и гравитационного полей земли по материалам зарубежных источников / К.В. Епшин, Д.В. Зернюков, И.М. Комаров, Е.Л. Хицунтов // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 2. С. 195-206.
3. Grewal M.S., Andrews A.P., Bartone C.G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 2013. 602 p.
4. Киселев С.К. Корреляционно-экстремальная навигация по полю магнитных аномалий протяженных ориентиров // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. №6. С.56-61.
5. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
6. Яновский Б.М. Земной магнетизм Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.

7. Харичкин М.В. Задача компенсации девиации аэромагнитометра: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.01. МГУ, 2009. 106 с.

8. Малеев П.И. Перспективы развития магнитометрических систем для морских подвижных объектов // Навигация и гидрография. 2010. № 29. С. 18-26.

9. Seidel P. Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications. John Wiley & Sons, 2015. 1260 p.

10. Александров Е.Б., Вершовский А.К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // УФН. 2009. Т. 179. №6. С. 605-638.

11. Применение градиентометрических схем для выделения вклада различных источников магнитных

полей / И.М. Голев, Е.А. Никитина, А.М. Агеев, А.В. Сергеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 13. № 6. С. 133-137.

12. Магнитоградиентные измерения в задачах обнаружения // Изв. ТулГУ. Техн. науки. 2016. Вып. 11. Ч. 3. С. 134-144.

13. Каршаков Е.В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата // Управление подвижными объектами и навигация. 2011. Вып. 35. С. 265-281.

14. Canciani A., Raquet J. Airborne magnetic anomaly navigation // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2017. V. 53. P. 67-80.

Поступила 5.04.2018; принята к публикации 17.05.2018

#### Информация об авторах

**Никитина Елизавета Андреевна** – канд. физ.-мат. наук, преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: lis211290@mail.ru

**Голев Игорь Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: imgolev@gmail.com

**Сергеев Александр Викторович** – канд. физ.-мат. наук, инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [sergeev-av@bk.ru](mailto:sergeev-av@bk.ru), ORCID: <https://0000-0002-4417-1480>

### THE USE OF THE MAGNETIC FIELD GRADIENT MEASUREMENTS FOR NAVIGATION AND DETECTION PROBLEMS

E.A. Nikitina<sup>1</sup>, I.M. Golev<sup>1</sup>, A.V. Sergeev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the perspectives of using gradient measurement schemes in navigation and detection systems using the characteristics of the anomalous magnetic field of the Earth and the magnetic field of artificial objects are discussed. An analysis of the measured characteristics of the magnetic field is given. It is shown that the measurement of the gradient of the modulus of the magnetic induction vector increases the accuracy of the region. The measurement of the second derivatives in the direction of maximum field variation allows to separate the anomalous magnetic field of the Earth and the magnetic field of a nearby object, which can be used to reduce the indeterminacy of the magnetometer readings introduced by the magnetic field of the object itself, which makes it possible to improve the accuracy of determining the position of the mobile object. The features of spatial selectivity of various components of the measured magnetic field are considered. Specific features of measuring the magnetic field on a moving object are discussed, methods are given for describing the intrinsic magnetic field of a mobile object that introduces deviations in the readings of a magnetometer measuring the characteristics of the anomalous field. The relationship of operating modes of a mobile object with a change in the characteristics of an intrinsic magnetic field is determined. Methods for reducing the deviation of a magnetometer are considered. The effectiveness of the use of gradient magnetic field measurement schemes in problems of detecting objects having an intrinsic magnetic field

**Key words:** magnetometry, gradiometer, anomalous field, navigation by geophysical fields

#### References

1. Militarily Critical Technologies List – MCTL Under Secretary of Defense, Acquisition, Technology and Logistics Pentagon, VA, 2014, 87 p.

2. Epshtin K.V., Zernyukov D.V., Komarov I.M., Khitsuntov E.L. "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 (Innovatika i ekspertiza)*, 2016, iss. 2, pp. 195-206.

3. Grewal M.S., Andrews A.P., Bartone C.G. "Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration". Wiley, 2013, 602 p.

4. Kiselev S.K. "Correlation-extreme navigation in the field of magnetic anomalies of extended landmarks", *Proc. of the Russian Academy of Sciences. Journal of Computer and Systems Sciences International (Izv. RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 1997, no. 6, pp.56-61.
5. Beloglazov I.N., Dzhandzhgava I., Chigin G.P. "Fundamentals of navigation in geophysical fields" ("Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam"), Moscow, Nauka, 1985, 328 p.
6. Yanovskiy B.M. "Earth magnetism" ("Zemnoy magnetizm"), Leningrad, LSU, 1978, 592 p.
7. Kharichkin M.V. "The problem of indemnification of the deviation of an aeromagnetometer. Cand. Phis. Math. Sci. diss." ("Zadacha kompensatsii devyatsii aeromagnetometra. Diss. Cand. fiz.-mat."), Moscow State University, 2009, 106 p.
8. Maleev P.I. "Prospects for the development of magnetometric systems for marine mobile objects", *Navigation and hydrography (Navigatsiya i gidrografiya)*, 2010, no. 29, pp. 18-26.
9. Seidel P. "Applied superconductivity: handbook on devices and applications", John Wiley & Sons, 2015, 1260 p.
10. Aleksandrov E.B., Vershovskiy A.K. "Modern radio-optical methods of quantum magnetometry", *Physics-USpekhi*, 2009, vol. 179, no. 6, pp. 605-638.
11. Golev I.M., Nikitina E.A., Ageev A.M., Sergeev A.V. "Application of gradientometric schemes for separating the contribution of various sources of magnetic fields", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 13, no. 6, pp. 133-137.
12. Volkovitskiy A.K., Karshakov E.V., Pavlov B.V., Tkhorenko M.Yu. "Magnitograde measures in detection problems", *Proc. of the TSU. Technical Science (Izv. TulGu. Techn. Science)*, 2016, Iss. 11, part 3, pp. 134-144.
13. Karshakov E.V. "Application of measurements of the parameters of the Earth's magnetic field gradient in the problem of navigation of aircrafts", *Control of mobile objects and navigation (Upravlenie podvizhnymi ob"ektami i navigatsiya)*, 2011, iss. 35, pp. 265-281.
14. Canciani A., Raquet J. "Airborne magnetic anomaly navigation", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, vol. 53, pp. 67-80.

Submitted 05.04.2018; revised 17.05.2018

#### Information about the authors

**Elizaveta A. Nikitina**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Sarykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: [lis211290@mail.ru](mailto:lis211290@mail.ru)

**Igor' M. Golev**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Sarykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: [imgolev@gmail.com](mailto:imgolev@gmail.com)

**Aleksandr V. Sergeev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [sergeev-av@bk.ru](mailto:sergeev-av@bk.ru), ORCID: <https://0000-0002-4417-1480>

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

© 2018 Ю.Н. Шалимов<sup>1</sup>, А.В. Звягинцева<sup>1</sup>, А.В. Помигуев<sup>2</sup>, А.В. Руссу<sup>1</sup>

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

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

**Аннотация:** изучены и созданы мобильные установки, основанные на электрохимических принципах преобразования и аккумуляции энергии, для обслуживания летательных аппаратов. Наиболее доступным материалом для производства накопителей энергии является алюминий. Указано преимущество металлгидридного способа накопления водорода. Рассмотрены вопросы, связанные с методами развития поверхности накопителя для увеличения емкости накопления. Представлен анализ планарного и объемного хранения водорода. Показаны возможности применения объемных накопителей, в том числе в системах энергоснабжения летательных аппаратов; основные проблемы, возникающие при создании систем безопасного хранения водорода в виде алюмогидридов; особенность взаимодействия оксида алюминия с водородом в водном растворе с учетом эффекта Сорэ; механизм формирования металлических структур (электродов) для электрохимического получения гидридов алюминия. Процесс формирования гидридов алюминия наиболее вероятен по дефектам структуры металлов. Закачка водорода в накопитель осуществляется путем электрохимического разряда протона водорода на катоде с образованием атомарного водорода, который в дальнейшем образует с атомом металла гидридные соединения

**Ключевые слова:** новые технологии в авиации, электрохимические технологии, водородная энергетика, аккумуляция энергии, водородный накопитель, алюмогидрид, дефект структуры металла, деструкция кристаллической решетки металла

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части государственного задания № 9.11295.2018/10.11 «Разработка технологий высокоизносостойких покрытий подшипников скольжения со сверхмалым коэффициентом трения на основе соединений Ni-B»

### Введение

Наземное обслуживание летательных аппаратов (ЛА) входит в состав основных служб обеспечения полетов. Критерии надежности и энергетической эффективности силовых установок, входящих в состав систем наземного обслуживания ЛА, определяют вектор перспективных исследований в данной области. В материалах работы рассматриваются вопросы эффективного использования теплофизических и электрохимических технологий в мобильных энергоустановках.

Среди всех видов энергоресурсов неоспоримым преимуществом обладают возобновляемые источники энергии. Например, показана эффективность использования возобновляемых источников энергообеспечения различного типа на основе гидридов алюминия [1] и на основе никеля и его соединений [2]. Основным недостатком практически всех возобновляемых источников энергии является циклическая нестабильность их работы, то есть невозможность производства энергии в непрерывном режиме. Единственным исключением являются источники энергии, использующие в виде топлива животную и растительную биомассу. Поэтому

для обеспечения постоянства работы силовых агрегатов на возобновляемых источниках энергии необходимы накопители энергии большой емкости.

Основными требованиями к выбору материала для аккумуляции энергии являются: доступность и высокая удельная энергетическая емкость. При этом в качестве энергоносителя предлагаем использовать водород, как наиболее энергоемкое и экологически чистое топливо. С позиции безопасности и эффективности хранения топлива наиболее перспективно аккумуляция водорода твердотельным состоянием в форме гидридов металлов [3-5]. В этом принципиальное отличие данного подхода от других решений: водород хранится в твердой фазе, что позволяет исключить проблемы, присущие баллонному и криогенному хранению водорода.

Из известных материалов (Pd, Pt, лантаноиды, актиноиды и ряд других металлов рассмотренных в работах [5, 6]) для аккумуляции энергии всем вышеуказанным требованиям наиболее соответствует алюминий. На рис. 1 приведена диаграмма относительного содержания наиболее распространенных металлов в



земной коре (литосфере), полученная методом математической обработки по данным Кларка [7].

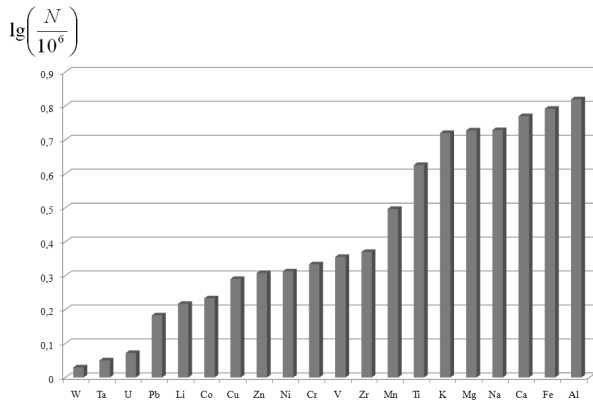


Рис. 1. Содержание основных металлов в литосфере (N – индекс Кларка)

Анализ содержания металлов в земной коре показывает, что алюминий имеет преимущество в сравнении с другими металлами по критерию доступности. Он, согласно индексу Кларка, является самым распространенным материалом в составе земной коры нашей планеты, его содержание составляет ~8,3 % от общего веса.

Другим критерием является возможность взаимодействия алюминия с водородом с образованием гидридов.

Алюминий при соответствующей технологии подготовки и обработки материала (анодная обработка) способен аккумулировать до 7-8 % от веса металла свободного водорода [7]. Анодная обработка с образованием пористой структуры [8-10] обеспечивает: 1. Равнодоступность электролита к различным участкам электрода; 2. Редукционный эффект при экстракции водорода при образовании гидридов алюминия, температура экстракции которых относительно мала  $t_{экстр.} \sim 140 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Соответственно, извлечение водорода из структуры алюминия осуществляется при незначительных энергетических затратах.

Помимо сравнительной оценки распространенности Al в земной коре индекс Кларка позволяет оценить перспективность использования Al в качестве аккумулятора водорода, а также целесообразность его использования как вида гидридного топлива в прямоточных турбинах в качестве рабочего тела с применением ядерно-

### Технология 3D хранения водорода в объеме металла

Главное преимущество предлагаемой 3D-технологии хранения водорода – это его аккумулирование в объеме атомной структуры, в отличие от планарной технологии (2D) суперконденсатора, в котором накопление энергии сосредоточено только по поверхности структуры. По предварительным оценкам энергетическая емкость таких систем на несколько порядков превосходит емкость ионисторов (суперконденсаторов).

Для обеспечения технологической возможности аккумулирования и экстракции водорода предполагается использовать известные технологии электрохимического образования пор, которые уже апробированы в производстве электролитических конденсаторов [8-10]. В основе процесса лежит технология анодной обработки алюминиевой фольги в производстве электролитических конденсаторов. Анодная обработка – это получение пор методом анодного растворения, которое осуществляется в водных растворах NaCl с концентрацией 15-18 %,  $i_a = 15-20 \text{ А/дм}^2$  (ток анодной обработки);  $\tau_{эксп} = 2 \text{ мин}$  (время экспозиции);  $t_{эл-та} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Общий вид идеализированной электродной системы для гидридного хранения водорода представлен на рис. 2. Отметим, что электрод – накопитель водорода - состоит из трех частей: материк, основание и пора. Наличие в структуре Al фольги - материковой части - обеспечивает прочность ленты при намотке картриджа, а также для обеспечения нагрева при экстракции водорода из материала картриджа. Основание электрода – это пористая часть Al фольги.

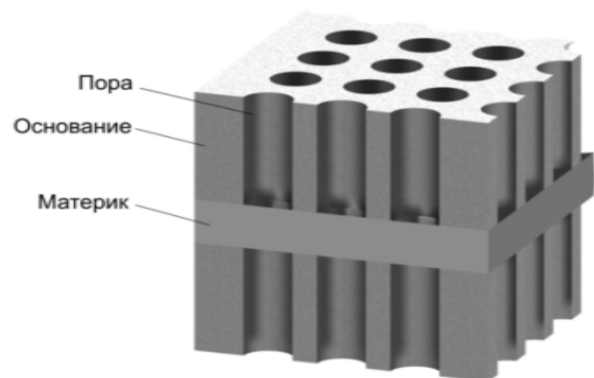
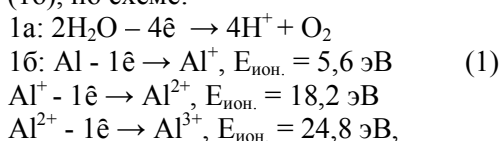


Рис. 2. Элемент конструкции электрода – накопителя водорода

Возможность формирования такой объемной структуры из алюминия определяется спецификой его поведения в водных растворах

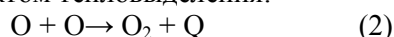
электролитов. Высокая склонность этого металла к пассивации в водных растворах приводит к образованию на поверхности алюминия защитной пленки из его оксида –  $Al_2O_3$ , которая исключает прямой контакт свободного алюминия с раствором. Технология образования пор может быть представлена следующим образом. В процессе анодной обработки в растворе NaCl на аноде протекают одновременно два сопряженных процесса: разложение воды (1а) и окисление алюминия, которые протекают в 3 стадии (1б), по схеме:



где  $E_{ион.}$  – энергия ионизации алюминия, эВ [11].

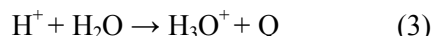
Последние два перехода при окислении алюминия осуществляются в течение короткого времени 0,1 – 0,05 миллисекунды.

Образование молекулы кислорода сопровождается эффектом тепловыделения:



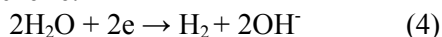
При этом тепловой эффект данной реакции составляет  $Q = 27,92$  кДж/моль.

Образующиеся ионы водорода также взаимодействуют с молекулами воды с образованием гидратированного катиона гидроксония по схеме:



Этот процесс также сопровождается эффектом тепловыделения. Величина  $Q$  составляет 24,58 кДж/моль.

На катоде протекает процесс восстановления воды по схеме:



Процесс также сопровождается экзотермическим эффектом,  $Q = 25,06$  кДж/моль.

Увеличение концентрации  $OH^-$  анионов на катоде вызывает смещение рН раствора в щелочную область, и в результате этого гидроксид алюминия  $Al(OH)_3$  выпадает в осадок. По мере накопления  $Al(OH)_3$  в нижней части электролизера периодически осуществляется выгрузка шнеком амфотерного гидроксида алюминия [9]. Механизм взаимодействия катионов водорода с оксидом алюминия рассмотрим ниже.

Электрохимические процессы на аноде осложнены действием эффектов тепловыделения на гидродинамику процесса. Влияние тепловых эффектов настолько существенно, что в конечном итоге именно они определяют кинетику и механизм анодного образования пор для

получения развитой поверхности. В процессе анодной обработки Al фольги формируются поры, диаметр которых колеблется от 3 до 15 мкм [8, 10]. Существует предположение, что температура на электроде в зоне реакции может на порядки превышать среднюю температуру электролита. Экспериментальные исследования в зоне, удаленной от поверхности электрода на 50 мкм, показали увеличение температуры от ее среднего значения в объеме электролита на 40 °С [8], в то время как толщина оксидного слоя составляет порядка 0,04 нм. Анализ химического состава электролита дает все основания предполагать, что именно катионы  $H^+$  на аноде растворяют оксидную пленку  $Al_2O_3$ . За счет проявления термогравитационного эффекта Сорэ [12] концентрация катионов водорода на поверхности электрода будет максимальной.

Рассмотрим металлгидридный способ аккумуляирования как один из наиболее перспективных методов хранения водорода. На рис. 3 представлена структурная формула гидрида алюминия [13].

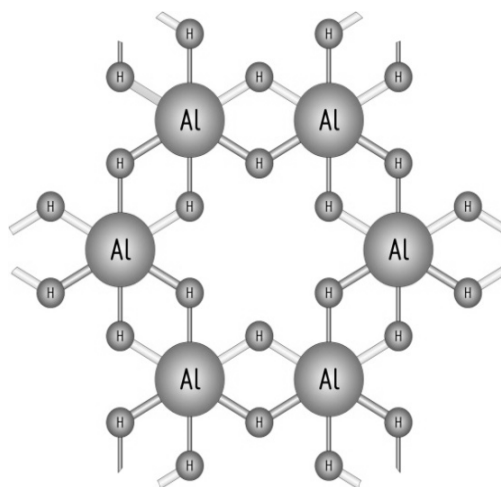


Рис. 3. Структурная формула гидрида алюминия [13]

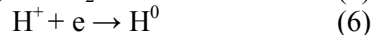
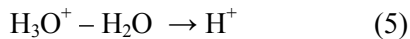
Характер геометрии молекулы  $AlH_3$  определяется особенностями водородной связи, формирующей аналог бензольного кольца, поэтому его иногда называют неорганическим бензолом. Структура гидрида алюминия, построенная по аналогу бензольного кольца, позволит использовать алюмогидриды в качестве основного компонента для получения водородного топлива. В гидриде алюминия  $AlH_3$  относительно малая энергия связи  $E_{Al-H} \sim 0,5$  эВ [14], поэтому извлечение - экстракция водорода осуществляется в интервале температур 142-145 °С. Даже сжиженный водород не может

иметь такой эффективности, как гидрид алюминия  $AlH_3$ , удельный вес  $\rho_{H_2(ж)} \sim 90 \text{ г/см}^3$ , поэтому топливная гондола на экспериментальном лайнере ТУ-155 практически занимала весь объем, включая пассажирский салон. Гидрид алюминия по своей энергетической возможности превосходит известные и применяемые в авиации виды топлива – керосины всех марок, несмотря на то, что  $\rho(AlH_3)$  почти вдвое превосходит удельный вес керосина, но при этом теплотворная способность водорода в 2,3 раза выше соответствующего значения для керосина. Поэтому энергетический выигрыш останется за алюмогидридом. Кроме того, водород в алюмогидриде находится без давления в твердом состоянии, поэтому для него не существует опасности потери топлива в случае течи бака.

В ряде работ было установлено, что вероятность образования связи Me-H увеличивается при изменении энергии связи между отдельными атомами или группами атомов (возникновение дефектов структуры) [6, 15-17]. В этом случае создаются предпосылки для формирования структур металлов, способных аккумулировать значительные объемы водорода. Данная закономерность характерна для всех металлов и сплавов, склонных к образованию гидридов, на которых в процессе реакции выделяется атомарный водород [2, 5, 6, 16, 17], а в данной работе, подчеркнем еще раз, рассматривается образование пор в процессе анодной обработки [8, 10, 15].

Рассмотрим механизм взаимодействия катионов водорода с оксидом алюминия.

На катоде в двойном электрическом слое протекает процесс дегидратации катиона гидроксония по схеме:



Далее осуществляется взаимодействие атомарного водорода со свободным атомом металла:

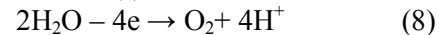


с образованием гидрида металла. Свободный протон  $H^+$  имеет весьма ограниченные размеры ( $10^{-5} \text{ \AA}$ ) [18], поэтому его проникновение через оксидный слой осуществляется беспрепятственно. Катодные реакции (5), (6), (7) осуществляются в электролитах разбавленной серной кислоты с добавкой КАФ (катионноактивных веществ), время образования гидрида алюминия определяется по началу выделения газо-

образного  $H_2$  на катоде, температура раствора  $H_2SO_4$ ,  $t = 20-35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Одним из необходимых условий высокой эффективности систем аккумуляирования является формирование электродной системы с высокой степенью развития поверхности, обеспечивающей высокую доступность электролита к электроду.

Основным способом формирования развитой поверхности является электрохимическая технология формирования пор [15-17]. Главная особенность этой технологии – отсутствие непосредственного контакта металлического алюминия с водным раствором электролита. За основу возьмем уже предложенную модель формирования поры на алюминиевой фольге [10]. Согласно этой модели разрушение оксидного слоя осуществляется за счет протекания процесса окисления воды:



Именно катионы  $H^+$  под действием эффекта Сорэ [12] взаимодействуют с поверхностью анода, разрушая оксидную пленку из  $Al_2O_3$ . На рис. 4 показан механизм такого взаимодействия (удаление кислорода из оксида).

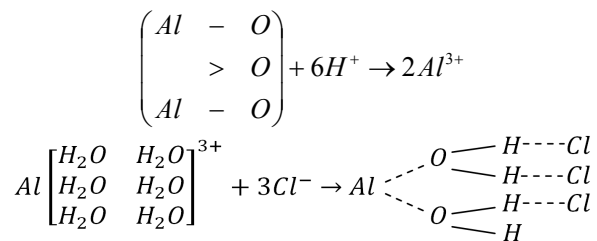


Рис. 4. Механизм взаимодействия ионов водорода с оксидом алюминия

В итоге катион  $Al^{3+}$  гидратируется молекулами воды и переходит в раствор электролита по вышеприведенной схеме. Специфика такого взаимодействия определяется высокой склонностью к пассивации металлического алюминия. Далее гидратированный катион алюминия  $[Al(H_2O)_6]^{3+}$  взаимодействует с тремя анионами  $Cl^-$  и образует комплексный ион алюминия, в котором катион  $Al^{3+}$  образует мультиплетную связь. В то же время предполагается, что атомы алюминия пограничных с электролитом слоев переходят в окисленное состояние. Активным окислителем атомов алюминия может быть кислород, образующийся на аноде при разложении воды. Кислород, образующийся на аноде, находится в атомарном состоянии до момента образования молекулы  $O_2$ , обладает высокой окислительной способностью. Время дезинтеграции молекулы кислорода составляет

несколько миллисекунд. Такой же порядок изменения имеют и потенциалы изменения от  $E_1$  до  $E_3$  для алюминия ( $E_1, E_2, E_3$ ), представленные в формуле (1). Значительная разница между отдельными стадиями свидетельствует о значительном поглощении энергии от внешнего источника энергии.

Многочисленные попытки экспериментального определения механизма реакции анодного окисления алюминия пока не дали неопровержимых однозначных результатов. Однако решение этой проблемы является необходимым условием создания технологии аккумулирования водорода на основе алюмогидридов. Специфика взаимодействия алюминия с раствором электролита при его анодной обработке на первый взгляд не укладывается в рамки традиционных представлений процессов анодной обработки металлов. При определенной плотности анодного тока возникают условия формирования на аноде пористой структуры. При этом профиль образующейся поры главным образом зависит от плотности анодного тока. На рис. 5 представлено влияние анодной плотности тока на возможные геометрические профили пор, получаемые при различных значениях плотности анодного тока. Более модельное представление образования пор при анодной обработке рассмотрено в работе [10].

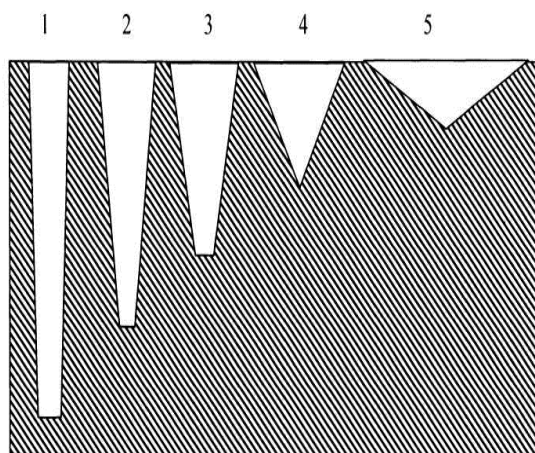


Рис. 5. Влияние плотности анодного тока на морфологию формируемой поры. Плотность анодного тока: 1 - 1 А/дм<sup>2</sup>; 2 - 2 А/дм<sup>2</sup>; 3 - 3 А/дм<sup>2</sup>; 4 - 4 А/дм<sup>2</sup>; 5 - 5 А/дм<sup>2</sup>

Данный принцип развития поверхности используется в технологиях конденсаторостроения [9]. В реальных технологических процессах увеличение степени развитости поверхности может составлять до 600 раз. Численно эта степень может быть оценена по формуле [8, 10]:

$$K_{тр} = S_{общ}/S_{геом} \sim 600 \text{ раз,}$$

где  $S_{общ}$  – площадь аноднообработанной фольги;  $S_{геом}$  – видимая (геометрическая) поверхность. Следует добавить, что развитие поверхности является одним из необходимых условий создания эффективных систем хранения водорода.

## Выводы

1. Рассмотрены физико-химические основы реализации систем безопасного хранения водорода в виде гидридов алюминия. С целью увеличения энергетической емкости металлических систем для хранения водорода в твердофазном состоянии рассмотрен механизм формирования металлических структур гидридов алюминия.

Главное преимущество предлагаемой 3D-технологии хранения водорода – это его аккумулирование в объеме по трем направлениям ( $x, y, z$ ) атомной структуры, в отличие от планарной технологии (2D) суперконденсатора, в котором накопление энергии сосредоточено только по поверхности структуры.

2. Проведено обоснование преимущества алюминия по сравнению с другими металлами по критерию доступности. Сделан вывод, что алюминий, согласно индексу Кларка, является самым распространенным материалом в составе земной коры нашей планеты, его содержание составляет ~8,3 % от общего веса.

3. Для обеспечения технологической возможности аккумулирования и экстракции водорода из алюминия предлагается использовать электрохимические технологии образования пор, которые уже апробированы в производстве электролитических конденсаторов. В основе разрабатываемого процесса лежит технология анодной обработки алюминиевой фольги в растворах NaCl с концентрацией 15-18 %. Подобраны режимы анодной обработки:  $i_a = 15-20 \text{ А/дм}^2$  (ток анодной обработки);  $\tau_{экс} = 2 \text{ мин}$  (время экспозиции);  $t_{эл-та} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. В работе показаны преимущества анодной обработки алюминиевой фольги для образования развитой пористой структуры поверхности, которая обеспечивает:

а - равнодоступность электролита к различным участкам электрода;

б - редуцирующий эффект при экстракции водорода при образовании гидридов алюминия,



температура экстракции которых составляет  $t_{\text{экстр.}} \sim 140^\circ\text{C}$ .

5. Рассмотрен механизм формирования металлических структур (электродов) для электрохимического получения алюмогидридов. Обоснованы физико-химические стадии протекания процесса формирования пор в процессе анодной обработки в растворе NaCl, диаметр которых колеблется от 3 до 15 мкм.

6. Предложен механизм образования гидридов алюминия, основанный на взаимодействии катионов водорода на аноде с оксидной пленкой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на анодноподготовленной алюминиевой фольге, с учетом проявления термогравитационного эффекта Сорэ.

7. Процессы технологии образования алюмогидридов осуществляются в электролитах разбавленной серной кислоты с добавкой КАФ (катионноактивных веществ), время образования гидроксида алюминия определяется по началу выделения газообразного  $\text{H}_2$  на катоде, температура раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $t = 20\text{--}35^\circ\text{C}$ .

8. Предлагаемые технологии основаны на использовании доступных материалов, обладающих ресурсом массового производства, промышленностью.

#### Литература

1. Ковалев В.Е., Шалимов Ю.Н., Гусев А.Л. Перспективы построения поселений с независимой системой энергоснабжения // *Альтернативная энергетика и экология: Междунар. науч. журнал*. 2011. № 10. С. 171-178.
2. Звягинцева А.В. Гибридные функциональные материалы, формирующие металлические структуры с оптимальной дефектностью для хранения водорода в гидридной форме // *Альтернативная энергетика и экология: Междунар. науч. журнал*. 2017. № 16-18. С. 89-103.
3. Bockris J.O.M., Khan S.U.M. *Quantum electrochemistry*. N.Y.: Plenum Press, 1979. 518 p.
4. Бокрис Дж. О'М., Везироглу Т.Н., Смит Д.Л. Солнечно-водородная энергия. Сила, способная спасти мир. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 164 с.
5. Основы водородной энергетики /под ред. В.А. Мошникова и Е.И. Терукова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 288 с.
6. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. Vol. 50. № 6. PP. 466-477.
7. Чертко Н.К., Чертко Э.Н. Геохимия и экология химических элементов: Справочное пособие. Мн.: Издательский центр БГУ, 2008. 140 с.
8. Шалимов Ю.Н. Влияние тепловых и электрических полей на электрохимические процессы при импульсном электролизе: дис. ... д-ра техн. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2007. 354 с.
9. Закейтис Л.Н. Электролитические конденсаторы. 2-е изд., перераб. и доп. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 284 с.
10. Литвинов Ю.В. Применение нестационарного электролиза в технологии анодной обработки алюминиевой фольги: дис. ... канд. техн. наук. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2006. 150 с.
11. Тихонов В.Н. Аналитическая химия алюминия. М.: Наука, 1971. 266 с.
12. Де Гроот С. Р. Термодинамика необратимых процессов. М.: ГИТТЛ, 1956. 277 с.
13. Уэллс А. Структурная неорганическая химия: В 3-х тт.; пер с англ. М.: Мир, 1987. Т. 2. 696 с.
14. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений. Справочник. М.: Химия, 1984. 256 с.
15. Особенности процессов газовой выделения электрохимических реакций в условиях импульсного электролиза / Ю.Н. Шалимов, И.Л. Батаронов, К.Г. Хрипунов, Е.Н. Островская, Ю.В. Литвинов // *Альтернативная энергетика и экология: Междунар. науч. журнал*. 2005. №8. С. 16-18
16. Власов Н.М., Звягинцева А.В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2012. 248 с.
17. Звягинцева А.В. Структурные и примесные ловушки для точечных дефектов: монография. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 216 с.
18. Маккей К. Водородные соединения металлов. М.: Мир, 1968. 244 с.

Поступила 16.03.2018; принята к публикации 16.05.2018

#### Информация об авторах

**Шалимов Юрий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79050534573, e-mail: shalimov\_yn@mail.ru

**Звягинцева Алла Витальевна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79507501062, e-mail: zvygincevaav@mail.ru

**Помигуев Александр Владимирович** – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. +79102480250, e-mail: Pomiguev.IAS@yandex.ru

**Руссу Александр Викторович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79518723560, e-mail: arussu@mail.ru



## ELECTROCHEMICAL TECHNOLOGIES OF IMPLEMENTATION OF SYSTEMS FOR SAFE STORAGE OF HYDROGEN

Yu.N. Shalimov<sup>1</sup>, A.V. Zvyagintseva<sup>1</sup>, A.V. Pomiguyev<sup>2</sup>, A.V. Russu<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia

**Abstract:** the article is devoted to the study and creation of mobile units based on the electrochemical principles of energy conversion and storage for aircraft maintenance. It is shown that the most affordable material for the production of energy storage is aluminum. The advantage of metalhydride method of hydrogen accumulation is shown. The questions connected with methods of development of a surface of the storage device for increasing the capacity of accumulation are considered. The analysis of planar and volumetric storage of hydrogen is presented. It is shown that aluminum is the main and most affordable material for the production of highly effective energy storage devices. The article also considers the main problems that arise when creating systems for the safe storage of hydrogen in the form of aluminum hydrides. The peculiarity of the interaction of aluminum oxide with hydrogen in an aqueous solution, taking into account the effect of Sore, is shown. The mechanism of formation of metal structures (electrodes) for electrochemical production of aluminum hydrides is considered. It is shown that the formation of aluminum hydrides is most likely due to defects in the structure of metals. The hydrogen is pumped into the accumulator by electrochemical discharge of the hydrogen proton on the cathode with the formation of atomic hydrogen, which subsequently forms hydride compounds with the metal atom

**Key words:** new aviation technologies, maintenance of flying machines, electrochemical technologies, hydrogen power engineering, energy accumulation, hydrogen storage, aluminum hydride, defect of the metal structure, destruction of the metal crystal lattice

**Acknowledgments:** the work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the project part of the state task No. 9.11295.2018 / 10.11 "Development of high-wear-resistant coating technologies for low-friction bearings based on Ni-B compounds"

### References

1. Kovalev V.E., Shalimov Yu.N., Gusev A.L. "Prospects for constructing settlements with an independent energy supply system", *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology (Al'ternativnaya energetika i ekologiya: Mezhdunar. nauch. zhurnal)*, 2011, no. 10, pp. 171-178.
2. Zvyagintseva A.V. "Hybrid functional materials that form metal structures with optimal deficiency for the storage of hydrogen in hydride form", *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology (Al'ternativnaya energetika i ekologiya: Mezhdunar. nauch. zhurnal)*, 2017, no. 16-18, pp. 89-103.
3. Bockris J.O.M., Khan S.U.M. "Quantum electrochemistry", N.Y., Plenum Press, 1979, 518 p.
4. Bokris J. O.M., Veziroglu T.N., Smith D.L. "Solar-hydrogen energy. A power that can save the world" ("Solnechno-vodorodnaya energiya. Sila, sposobnaya spasti mir"), Moscow, MEI, 2002, 164 p.
5. Moshnikov V.A., Terukov E.I. "Fundamentals of hydrogen energy" ("Osnovy vodorodnoy energetiki"), Saint Petersburg, Publishing house of SPbSETU "LETI", 2011, 288 p.
6. Zvyagintseva A.V., Shalimov Yu.N. "On the stability of defects in the structure of electrochemical coatings", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, vol. 50, no. 6, pp. 466-477.
7. Chertko N.K., Chertko E.N. "Geochemistry and ecology of chemical elements: Reference Book" ("Geokhimiya i ekologiya khimicheskikh elementov: Spravochnoe posobie"), Publishing Center of the Belarusian State University, 2008, 140 pp.
8. Shalimov Yu.N. "Influence of thermal and electric fields on electrochemical processes in pulsed electrolysis. Dr. Technical Science Diss." ("Vliyanie teplovykh i elektricheskikh poley na elektrokhimicheskie protsessy pri impul'snom elektrolize: dis. d-ra tekhn. nauk"), Ivanovo, ISCTU, 2006, 354 p.
9. Zakheim L.N. "Electrolytic capacitors" ("Elektroliticheskie kondensatory"), Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1963, 284 p.
10. Litvinov Yu.V. "Application of non-stationary electrolysis in the technology of anodic treatment of aluminum foil", cand. tech. sciences diss. ("Primenenie nestatsionarnogo elektroliza v tekhnologii anodnoy obrabotki alyuminievoy fol'gi", dis. kand. tekhn. nauk), Ivanovo, ISCTU, 2006, 150 p.
11. Tikhonov V.N. "Analytical chemistry of aluminum" ("Analiticheskaya khimiya alyuminiya"), Moscow, Nauka, 1971, 266 p.
12. De Groot S.R. "Thermodynamics of irreversible processes" ("Termodinamika neobratimyykh protsessov"), Moscow, GITTL, 1956, 277 p.
13. Wells A. "Structural inorganic chemistry" ("Struktornaya neorganicheskaya khimiya"), Moscow, Mir, 1987, 696 p.
14. Nefedov V.I. "X-ray electron spectroscopy of chemical compounds. Reference book" ("Rentgenoelektronnaya spektroskopiya khimicheskikh soyedineniy. Spravochnik"), Moscow, Khimiya, 1984, 256 p.

15. Shalimov Yu.N., Bataronov I.L., Khripunov K.G., Ostrovskaya E.N., Litvinov Yu.V. "Features of the processes of gas evolution of electrochemical reactions in conditions of pulsed electrolysis", *International Scientific Journal Alternative Energy and Ecology (Al'ternativnaya energetika i ekologiya: Mezhdunar. nauch. zhurnal)*, 2005, no. 8, pp. 16-18.
16. Vlasov N.M., Zvyagintseva A.V. "Mathematical modelling of hydrogen permeability of metals: monograph" ("Matematicheskoe modelirovanie vodorodnoy pronitsayemosti metallov: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2012, 248 p.
17. Zvyagintseva A.V. "Structural and impurity traps for point defects: monograph" ("Strukturnye i primesnye lovushki dlya tochechnykh defektov: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2017, 216 p.
18. McKay K. "Hydrogen compounds of metals" ("Vodorodnye soyedineniya metallov"), Moscow, Mir, 1968, 244 p.

Submitted 16.03.2018; revised 16.05.2018

#### Information about the authors

**Yuriy N. Shalimov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: shalimov\_yn@mail.ru  
**Alla V. Zvyagintseva**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: zvygincevaav@mail.ru  
**Aleksandr V. Pomiguyev**, Graduate Student, Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and J.U.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), tel. +79102480250, e-mail: Pomiguyev.IAS@yandex.ru  
**Aleksandr V. Russu**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: arussu@mail.ru