

## СОДЕРЖАНИЕ

### Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка метода определения присоединенных параметров манипулятора с вращающимися звеньями на основе генетических алгоритмов <b>С.Н. Медведев, А.Ю. Яковлев, О.Г. Корольков.....</b>	<b>8</b>
Разработка автоматизированной информационной системы оценки состояния, диагностики и выбора тактики лечения больных с хроническими заболеваниями <b>К.О. Левенков, Е.Н. Коровин.....</b>	<b>16</b>
Метод структурно-параметрического синтеза моделей изолирующих дыхательных аппаратов дополненной реальности <b>М.Н. Краснянский, В.Г. Матвейкин, С.Ю. Алексеев, А.Ю. Захаров.....</b>	<b>25</b>
Рационализация архитектурного проектирования мультиагентных систем на основе многовариантной интеграции <b>Н.А. Рындин, С.В. Сапегин.....</b>	<b>33</b>

### Энергетика

Математическая модель термоэлектрического генераторного модуля кольцевой геометрии <b>О.В. Калядин, К.Г. Королев.....</b>	<b>38</b>
Анализ тепловых процессов в рамках электротехнических комплексов с использованием средств математического моделирования <b>А.И. Борисова, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>46</b>
Генератор для ветроэнергетической установки вертикального исполнения <b>А.Ю. Писаревский, Т.Е. Черных, А.В. Тикунов.....</b>	<b>49</b>
Компенсация реактивной мощности в электрических распределительных сетях переменного тока на базе батарей статических конденсаторов <b>В.Н. Крысанов, Н.В. Ситников, Н.И. Королев, Д.А. Мамонтов, С.А. Горемыкин....</b>	<b>61</b>
Оценка несимметрии индукционной машины с применением метода симметричных составляющих <b>Е.С. Кинев, А.А. Тяпин, С.Н. Ефимов.....</b>	<b>68</b>
Повышение энергетической эффективности систем вентиляции жилых и промышленных помещений <b>А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, Н.Н. Кожухов, Д.А. Прутских.....</b>	<b>80</b>
К определению параметров оребрения при термостатировании поверхности теплообмена в условиях конвективной теплоотдачи <b>С.В. Дахин.....</b>	<b>87</b>
Оптимизационные модели управления динамикой перетоков мощности в электроэнергетических системах <b>А.Л. Руцков, А.В. Бурковский, О.Г. Яскевич.....</b>	<b>92</b>

### Радиотехника и связь

Линейный стабилизатор напряжения со сверхмалым падением напряжения <b>А.С. Шайкин, И.А. Суров, Е.Д. Алперин.....</b>	<b>98</b>
Реализация стохастического LDPC-декодера на ПЛИС <b>А.В. Башкиров, И.В. Свиридова.....</b>	<b>103</b>
Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС <b>А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров.....</b>	<b>108</b>

Методика оценки виброакустических сигналов роликового подшипника колёсной пары железнодорожного вагона <b>Д.В. Журавлёв, Т.С. Глотова, В.В. Глотов</b> .....	117
Исследование влияния линзы Френеля на параметры ТЕМ-рупора <b>Л.Н. Коротков, А.С. Самодуров, Д.С. Погребной</b> .....	123
Управляемые двухкаскадные генераторы на ПАВ-фильтрах <b>М.И. Бочаров, С.Г. Некрасов, А.Е. Акиншин</b> .....	129

### Машиностроение и машиноведение

Экспериментальное определение коэффициентов трения по методу обтяжки <b>В.В. Елисеев, Л.В. Хливненко, А.М. Гольцев, С.С. Одинг</b> .....	135
Влияние ультрадисперсных модификаторов технологических сред на силовые характеристики процесса точения конструкционных материалов <b>Ю.А. Цеханов, И.В. Харченко, Р.М. Джамалидинов, В.В. Скакун</b> .....	140
Электрохимическая обработка титановых сплавов проволокой с осевой подачей электролита <b>Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, О.Г. Шпилова, Д.Е. Крохин</b> .....	146
Применение комплексно-легированных сплавов для изготовления режущего инструмента <b>Л.С. Печенкина, О.И. Попова, М.И. Попова</b> .....	152
Особенности расчета комбинированного электрода-инструмента для электрических методов обработки, изготавливаемого на основе аддитивных технологий <b>А.П. Суворов, А.В. Кузовкин</b> .....	158

### Физика

Термоэлектрический материал на основе халькогенидов висмута n-типа проводимости с наноразмерной оксидной фазой <b>Ю.В. Панин, Ю.Е. Калинин</b> .....	163
Влияние давления и времени выдержки при горячем прессовании на термоэлектрические свойства теллурида висмута <b>А.А. Гребенников, А.И. Бочаров, В.В. Бавыкин, И.В. Извекова</b> .....	170
Декремент затухания и внутреннее трение струны <b>А.Т. Косилов, В.А. Юрьев, Р.Б. Калинин</b> .....	175
Термоэлектрические свойства тонких пленок теллурида свинца, полученных методом ионно-лучевого распыления <b>В.В. Бавыкин, Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, В.А. Юрьев</b> .....	179
Модуль сверхпроводящего преобразователя частот с каскадом термоэлектрического охладителя <b>А.В. Сергеев, И.М. Голев</b> .....	185
Структура и механические свойства компактированных полупроводников на основе твердого раствора $Bi_2Te_3-Sb_2Te_3$ , полученных в процессе горячего прессования и последующих обработок поверхности <b>В.А. Дыбов, Д.В. Сериков, Е.Н. Федорова, Д.А. Синецкая, П.С. Мозговой, М.С. Дякина</b> .....	191

## CONTENTS

### Informatics, computer engineering and control

Development of the method for determining the associated parameters of the manipulator with rotating links based on genetic algorithms <b>S.N. Medvedev, A.Yu. Yakovlev, O.G. Korol'kov</b> .....	8
Development of the automated information system of the condition evaluation, diagnostics and selection of tactics for the treatment of patients with chronic diseases <b>K.O. Levenkov, E.N. Korovin</b> .....	16
Method of structural and parametrical synthesis of models of isolating respiratory devices of augmented reality <b>M.N. Krasnyanskiy, V.G. Matveykin, S.Yu. Alekseev, A.Yu. Zakharov</b> .....	25
Rationalization of architectural designing of multi-agent systems based on multi-variant integration <b>N.A. Ryndin, S.V. Sapegin</b> .....	33

### Energetics

Mathematical model of the thermoelectric generator module of annular geometry <b>O.V. Kalyadin, K.G. Korolev</b> .....	38
Analysis of thermal processes within electrotechnical complexes with the use of mathematical modelling <b>A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy</b> .....	46
The generator for vertical wind power installation <b>A.Yu. Pisarevskiy, T.E. Chernykh, A.V. Tikunov</b> .....	49
Reactive power compensation in electric distribution networks of alternate current on the basis of static capacitors batteries <b>V.N. Krysanov, N.V. Sitnikov, N.I. Korolev, D.A. Mamontov, S.A. Goremykin</b> .....	61
Evaluation of the asymmetry of an induction machine by the method of symmetric components <b>E.S. Kinev, A.A. Tyapin, S.N. Efimov</b> .....	68
Ventilation systems energy efficiency increasing in living quarters and industrial premises <b>A.V. Barakov, V.Yu. Dubanin, N.N. Kozhukhov, D.A. Prutskikh</b> .....	80
To determination of the ribbing parameters in thermostating of the surface of heat exchange in conditions of convective heat release <b>S.V. Dakhin</b> .....	87
Optimization models of power flow dynamics control in electric power systems <b>A.L. Rutskov, A.V. Burkovskiy, O.G. Yaskovich</b> .....	92

### Radio engineering and communication

Linear voltage stabilizer with minute voltage fall <b>A.S. Shaikin, I.A. Surov, E.D. Alperin</b> .....	98
Realization of a stochastic LDPC decoder on a FPGA <b>A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova</b> .....	103
Method of designing the frequency synthesizer of direct digital synthesis on FPGA <b>A.A. Pirogov, E.A. Bocharov, E.V. Syemka, O.Yu. Makarov</b> .....	108
Estimation methodology of vibroacoustic signals of the roller bearing of the railway carriage wheel pair <b>D.V. Zhuravlyev, T.S. Glotova, V.V. Glotov</b> .....	117

Research of the Fresnel lens influence on parameters of the TEM-horn <b>L.N. Korotkov, A.S. Samodurov, D.S. Pogrebnoy</b> .....	123
Controllable two-cascade generators on SAW-filters <b>M.I. Bocharov, S.G. Nekrasov, A.E. Akin'shin</b> .....	129

### Mechanical engineering and science of machines

Experimental determination of friction coefficient by stretch-forming method <b>V.V. Eliseev, L.V. Khlivnenko, A.M. Gol'tsev, S.S. Oding</b> .....	135
Influence of ultradispersed modifiers of fluids on power characteristics of the process of cutting construction materials <b>Yu.A. Tsekhanov, I.V. Kharchenko, R.M. Dzhemalyadinov, V.V. Skakun</b> .....	140
Electrochemical treatment of titanium alloys with wire with axial electrolyte flow <b>E.V. Smolentsev, V.G. Gritsyuk, O.G. Shipilova, D.E. Krokhin</b> .....	146
Application of integrated hydra metals for the cutting tool manufacturing <b>L.S. Pechenkina, O.I. Popova, M.I. Popova</b> .....	152
Features of calculation of a combined electrode-tool for electrical methods for treatment manufactured based on additive technologies <b>A.P. Suvorov A.V. Kuzovkin</b> .....	158

### Physics

Thermoelectric material based on chalcogenides of bismuth and the n-type conductivity with nanoscale oxide phase <b>Yu.V. Panin, Yu.E. Kalinin</b> .....	163
Influence of pressure and holding time at hot pressing on thermoelectric properties of bismuth tellurid <b>A.A. Grebennikov, A.I. Bocharov, V.V. Bavykin, I.V. Izvekova</b> .....	170
Damping decrement and internal friction of the filament <b>A.T. Kosilov, V.A. Yuriev, R.B. Kalinin</b> .....	175
Thermoelectric properties PbTe thin films prepared by ion-beam sputtering <b>V.V. Bavykin, Yu.E. Kalinin, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov, V.A. Yur'ev</b> .....	179
Module of super-conducting frequency converter with cascade of thermoelectric cooler <b>A.V. Sergeev, I.M. Golev</b> .....	185
Structure and mechanical properties of compacted semiconductors on the basis of Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> -Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> solid solution, obtained in the process of hot pressing and further surface treatment <b>V.A. Dybov, D.V. Serikov, E.N. Fedorova, D.A. Sinetskaya, P.S. Mozgovoy, M.S. Dyakina</b> .....	191

**Информатика, вычислительная техника и управление**

УДК 531.1, 519.168

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИСОЕДИНЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МАНИПУЛЯТОРА С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЗВЕНЬЯМИ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

С.Н. Медведев, А.Ю. Яковлев, О.Г. Корольков

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается проблема выбора оптимального или близкого к оптимальному положения четырехзвенного манипулятора на плоскости. Вначале обратная задача кинематики формулируется в виде задачи нелинейной оптимизации. Отдельное внимание в математической модели уделено целевой функции. Далее для решения поставленной задачи предлагается генетический алгоритм выбора оптимального положения четырехзвенного манипулятора на плоскости. В соответствии с логикой генетических алгоритмов разработаны оригинальные операторы скрещивания и мутации. Каждый из них основывается на решении геометрической задачи пересечения двух окружностей. Предложенные операторы рассматриваются для представления особи в виде набора координат вершин манипулятора, однако также даны указания по созданию подобных операторов для представления особи в виде набора углов. Для апробации алгоритма был разработан программный комплекс, а также сконструирован мини-манипулятор. Программный комплекс включает в себя программную реализацию для настройки параметров алгоритма на стационарном компьютере и реализацию для микроконтроллера с управлением сервоприводами реального мини-манипулятора. Представлены результаты вычислительного эксперимента по настройке параметров, а также показана работа алгоритма на микроконтроллере с выводом результатов на дисплей. Показано построение оптимального решения на мини-манипуляторе. Сделаны выводы по работе, а также указаны возможные дальнейшие исследования в данной области

**Ключевые слова:** обратная задача кинематики, представление Денавита – Хартенберга, генетический алгоритм, скрещивание, мутация, манипулятор, вычислительный эксперимент, управление, мехатронные устройства

**Введение**

Рассматривается четырехзвенный манипулятор на плоскости. Для описания связей между звеньями используется представление Денавита – Хартенберга [7]. Необходимо для него решить обратную задачу кинематики (ОЗК) с нахождением оптимального или близкого к оптимальному расположения звеньев манипулятора согласно выбранному критерию. Под оптимальным положением манипулятора будем понимать достижение одного из различных критериев: минимальная сумма присоединенных параметров манипулятора – углы поворотов звеньев в сочленениях  $(\alpha_1, \dots, \alpha_4)$ , min-тах критерий, минимальный суммарный момент, минимальная или максимальная высота и др. Заметим, что задача динамики в данной работе не рассматривается, а масса звеньев будет выступать как заданный параметр оптимизационной задачи для определения текущего расположения звеньев.

**Постановка задачи**

Сформулируем ОЗК для четырехзвенного манипулятора на плоскости в виде задачи оптимизации. Пусть заданы координаты двух точек фиксации манипулятора  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_4, y_4)$  (рис. 1) и известны длины четырех звеньев  $l_i$ ,  $i = 1..4$ . Необходимо найти координаты трех оставшихся вершин манипулятора  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ .

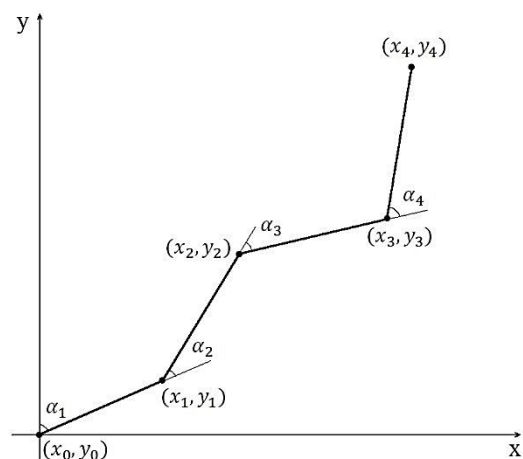


Рис. 1. Четырехзвенный манипулятор

Известно, что данная задача имеет множество решений [1, 7].

Заметим, что в классической постановке необходимо найти углы поворотов звеньев в сочленениях, однако в данной работе искомые углы будут найдены после нахождения координат вершин путем несложных математических операций. Целесообразность работы с координатами будет объяснена позднее.

Математическую модель ОЗК в виде задачи оптимизации можно представить следующим образом:

$$F(x, y) \rightarrow opt, \quad (1)$$

$$(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = l_i^2, \quad (2)$$

$$i = 1..4.$$

В качестве целевой функции, как уже было сказано ранее, можно рассматривать минимизацию суммы углов поворотов звеньев в сочленениях:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x_i, y_i), \quad (3)$$

или минимизацию суммарных моментов в вершинах манипулятора (будем считать, что на манипулятор действует только сила тяжести звеньев и схват манипулятора не нагружен)

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n m_i g h_i, \quad (4)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -го сегмента,

$h_i$  – расстояние от вершины до линии действия силы.

Далее сосредоточимся на работе с целевой функцией вида (4).

Распишем её подробнее. Центром масс одного звена является его середина с координатами

$$x_i^ц = \frac{x_{i-1} + x_i}{2}, y_i^ц = \frac{y_{i-1} + y_i}{2}, i = 1..4.$$

Координаты центра масс механической системы определяются по формулам

$$x_{цм} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i^ц}{\sum_{i=1}^n m_i}, y_{цм} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i^ц}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$

Тогда для системы, состоящей только из четвертого звена, имеем

$$x_4^{цм} = x_4^ц, y_4^{цм} = y_4^ц,$$

для системы, состоящей из третьего и четвертого звеньев,

$$x_3^{цм} = \frac{m_3 x_3^ц + m_4 x_4^ц}{m_3 + m_4}, y_3^{цм} = \frac{m_3 y_3^ц + m_4 y_4^ц}{m_3 + m_4},$$

для системы, состоящей из второго, третьего и четвертого звеньев,

$$x_2^{цм} = \frac{m_2 x_2^ц + m_3 x_3^ц + m_4 x_4^ц}{m_2 + m_3 + m_4},$$

$$y_2^{цм} = \frac{m_2 y_2^ц + m_3 y_3^ц + m_4 y_4^ц}{m_2 + m_3 + m_4},$$

и для всего манипулятора

$$x_1^{цм} = \frac{m_1 x_1^ц + m_2 x_2^ц + m_3 x_3^ц + m_4 x_4^ц}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4},$$

$$y_1^{цм} = \frac{m_1 y_1^ц + m_2 y_2^ц + m_3 y_3^ц + m_4 y_4^ц}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}.$$

Тогда расстояние  $h_i$  будет высчитываться по формуле

$$h_i = |x_i^{цм} - x_{i-1}|, i = 1..4.$$

В результате формула суммарных моментов примет вид

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n m_i g h_i =$$

$$g \left( \left| -\frac{x_0}{2} (m_1 + 2m_2 + 2m_3 + 2m_4) + x_1 (m_1 + m_2) + x_2 (m_2 + m_3) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_1}{2} (m_2 + 2m_3 + 2m_4) + (m_2 + m_3) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_2}{2} (m_3 + 2m_4) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_3}{2} m_4 + x_4 m_4 \right| \right).$$

Заметим, что она не зависит от координат  $y_i, i = 1..4$ .

Таким образом, ОЗК с целевой функцией будет выглядеть следующим образом

$$F(x) = \frac{g}{2} \left( \left| -x_0 (m_1 + 2m_2 + 2m_3 + 2m_4) + x_1 (m_1 + m_2) + x_2 (m_2 + m_3) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_1}{2} (m_2 + 2m_3 + 2m_4) + x_2 (m_2 + m_3) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_2}{2} (m_3 + 2m_4) + x_3 (m_3 + m_4) + x_4 m_4 \right| + \left| -\frac{x_3}{2} m_4 + x_4 m_4 \right| \right) \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = l_i^2, \quad (6)$$

$$i = 1..4.$$

Если считать, что массы звеньев одинаковые  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m$ , то формула (5) преобразуется следующим образом

$$F(x) = mg \left( \left| -7\frac{x_0}{2} + x_1 + x_2 + x_3 + \frac{x_4}{2} \right| + \left| -5\frac{x_1}{2} + x_2 + x_3 + \frac{x_4}{2} \right| + \left| -3\frac{x_2}{2} + x_3 + \frac{x_4}{2} \right| + \left| -\frac{x_3}{2} + \frac{x_4}{2} \right| \right). \quad (7)$$

Заметим, что в (5)-(7)  $x_0, x_4, m, g$  – являются заданными константами.

Таким образом, рассматривается оптимизационная задача (5)-(6) (или (5), (7)).

## Обзор известных методов решения

Основные исследования в данной области связаны с нахождением аналитических, геометрических или численных методов решения ОЗК [1, 7]. К таким методам относятся: методы обратных преобразований, винтовой алгебры, двойственных матриц, двойственных кватернионов, итераций, геометрический подход. При этом исследователю приходится полагаться на собственную интуицию [7] в зависи-

мости от конфигурации конкретного манипулятора. Поэтому большинство промышленных роботов удовлетворяют одному из следующих условий: оси трех смежных сочленений пересекаются в одной точке, оси трех смежных сочленений параллельны между собой [7].

Данная работа направлена, прежде всего, на отыскание оптимального (в силу выбранного критерия) положения манипулятора. Однако в ней также затрагивается получение новых решений ОЗК на основе уже найденных, что обуславливается идеей генетических алгоритмов [2, 4], которые выбраны в качестве базового оптимизационного метода. Одним из главных преимуществ генетических алгоритмов является то, что они дают возможность уйти от громоздких формул и вычислений за счёт применения механизмов скрещивания и мутации. Но определенной платой за это является отсутствие гарантии оптимальности полученного решения.

**Метод решения**

Итак, основным инструментом для решения оптимизационной задачи (5)-(6) в работе выбраны генетические алгоритмы. Кратко приведем общую схему генетического алгоритма.

**Алгоритм 1.** Общая схема генетического алгоритма [3, 4].

1. Формирование начальной популяции.
2. Оценка особей популяции.
3. Отбор (селекция).
4. Скрещивание (кроссовер).
5. Мутация.
6. Формирование новой популяции.

7. Проверка на останов. Если останов не выполнен, то переход на шаг 2, иначе – алгоритм заканчивает свою работу.

Для начала определим, что будет представлять собой особь в нашей задаче. Здесь возможны два варианта: набор координат  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$  или набор углов  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ .

Конкретизируем каждый из шагов алгоритма.

**1. Формирование начальной популяции.** На данном этапе может быть использован любой из известных методов решения ОЗК, который позволяет получить заданное наперед количество решений [1, 7].

**2. Оценка особей популяции.** Так как решается задача минимизации, то в качестве

функции приспособленности особи можно взять функцию  $-F(x, y)$ . То есть, чем лучше решение (меньше суммарный момент), тем больше функция приспособленности.

**3. Отбор (селекция).** Можно использовать любой из известных операторов селекции [3]. В эксперименте, представленном в данной работе, был выбран пропорциональный отбор.

**4. Скрещивание (кроссовер).** Оператор скрещивания чаще всего уникален для каждой конкретной задачи. Прежде чем перейти к его описанию, напомним, что ОЗК для двухзвенного манипулятора на плоскости имеет ровно два решения, которые можно найти, решив геометрическую задачу с пересечением двух окружностей (рис. 2) [5].

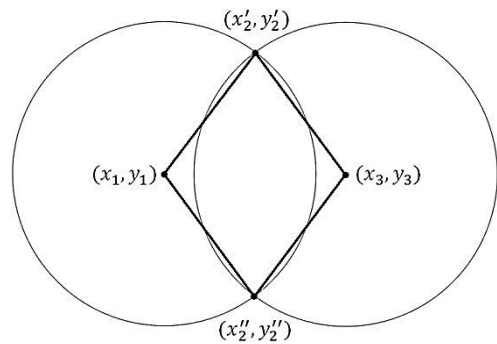


Рис. 2. Двухзвенный манипулятор

Предлагается следующий вариант оператора скрещивания. Пусть выбраны два манипулятора-родителя (рис. 3). Тогда, чтобы получить первую группу потомков, необходимо у первого родителя задать некоторое допустимое смещение первого звена, а у второго родителя – четвертого звена (сплошные линии на рис. 3).

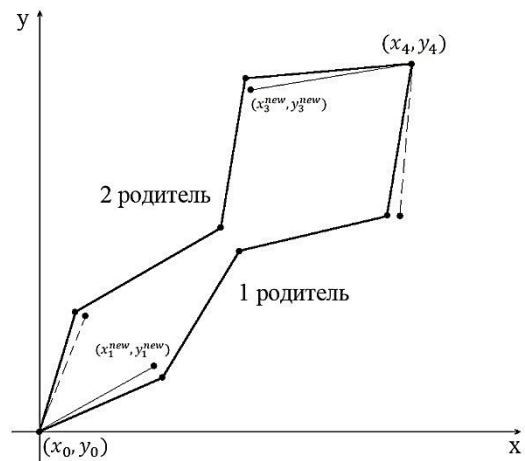


Рис. 3. Оператор скрещивания. Два манипулятора-родителя

Получатся две новые точки с координатами  $(x_1^{new}, y_1^{new}), (x_3^{new}, y_3^{new})$ . Для них решается задача нахождения координат  $(x_2^{new'}, y_2^{new'}), (x_2^{new''}, y_2^{new''})$  (рис. 2). Таким образом, получаем два новых манипулятора-потомка:  $(x_0, y_0), (x_1^{new}, y_1^{new}), (x_2^{new'}, y_2^{new'}), (x_3^{new}, y_3^{new}), (x_4, y_4)$  и  $(x_0, y_0), (x_1^{new}, y_1^{new}), (x_2^{new''}, y_2^{new''}), (x_3^{new}, y_3^{new}), (x_4, y_4)$  (рис. 4). Можно увидеть, что потомки «наследуют» информацию от родителей. Например, первый потомок первыми двумя звеньями «похож» на первого родителя, а третьим и четвертым – на второго. Второй потомок первым звеном «похож» на первого родителя, а последним – на второго, т.е. он «унаследовал» меньше информации от родительских особей, тем самым разнообразив генотип популяции.

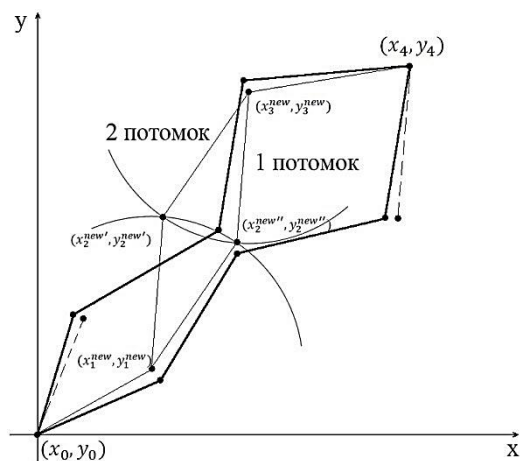


Рис. 4. Оператор скрещивания. Два манипулятора-потомка

Чтобы получить вторую группу потомков, необходимо произвести противоположные действия с манипуляторами-родителями: у первого родителя задать допустимое смещение четвертого звена, а у второго родителя – первого (пунктирные линии на рис. 3).

Таким образом, получаем оператор скрещивания со схемой «2 – 4»: из двух родителей формируются четыре потомка.

Заметим, что для предложенного оператора кроссовера выгоднее использовать представление особи в виде набора координат, а не углов. Это обусловлено тем, что для решения геометрической задачи с пересечением двух окружностей необходимо знать координаты центров окружностей. Если бы изначально были заданы углы, то пришлось бы сначала пересчитывать по ним координаты, а после уже решать саму задачу, т.е. необходимо произво-

дить лишние вычисления. С другой стороны, смещение первого и четвертого звеньев удобнее задавать через углы, нежели высчитывать допустимые координаты по уравнению окружности. Например, при задании углов можно использовать, так называемый, непрерывный арифметический кроссовер [3]:

$$\alpha_1^{1new} = \vartheta \alpha_1^1 + (1 - \vartheta) \alpha_4^2,$$

$$\alpha_4^{2new} = (1 - \vartheta) \alpha_1^1 + \vartheta \alpha_4^2,$$

где  $\vartheta \in (0, 1)$ ,

$\alpha_1^1, \alpha_4^2$  – первый и четвертый углы соответственно первого и второго родителя,

$\alpha_1^{1new}, \alpha_4^{2new}$  – новые первый и четвертый углы соответственно первого и второго родителя.

**5. Мутация.** Оператор мутации также требует отдельного рассмотрения в каждой конкретной задаче. Предлагается следующий вариант: для заданного манипулятора необходимо задать допустимое смещение координат второй точки

$$x_2^{new} = x_2 + \Delta x, y_2^{new} = y_2 + \Delta y,$$

далее необходимо решить две ОЗК для двух двухзвенных манипуляторов с фиксированными точками  $(x_0, y_0), (x_2^{new}, y_2^{new})$  и  $(x_2^{new}, y_2^{new}), (x_4, y_4)$  соответственно (рис. 5). Из полученных новых четырех манипуляторов каким-либо образом выбирается один, например, с лучшим значением функции приспособленности.

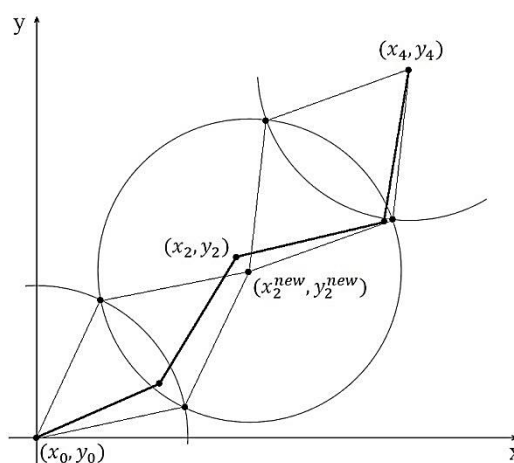


Рис. 5. Оператор мутации

Заметим, что данный вариант оператора мутации удобно использовать для особей, представленных набором координат.

Для представления через набор углов лучше использовать другой вариант оператора мутации. Например, можно задать допустимое



изменение второго угла:  $\alpha_2^{new} = \alpha_2 + \Delta\alpha$ . Далее, пересчитать новые координаты  $(x_2^{new}, y_2^{new})$  через углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2^{new}$  и решить ОЗК для двухзвенного манипулятора с фиксированными точками  $(x_2^{new}, y_2^{new})$ ,  $(x_4, y_4)$ .

**6. Формирование новой популяции.** На данном этапе может быть использован любой из известных способов формирования популяции: механизм замещения, вытеснения, принцип элитизма и т.д. [3, 4]. В эксперименте, представленном в данной работе, был выбран вариант, в котором из шестерки особей (2 родителя, 4 потомка) в новое поколение выбирались две лучшие особи в смысле значения функции приспособленности с заменой двух худших особей в популяции.

**7. Проверка на останов.** На данном этапе может быть использован любой из известных остановов: ограничение по количеству поколений, длительное отсутствие прогресса, малая разница между лучшим и худшим решениями и т.д.

**В конце** работы алгоритма для оптимального (с точки зрения генетического алгоритма) манипулятора в случае координатного представления высчитываются необходимые углы поворота сочленений.

### Эксперимент

Для проверки работоспособности предложенного генетического алгоритма оптимального решения ОЗК для четырехзвенного манипулятора была разработана и написана его программная реализация в среде Visual Studio 2010 на языке C++.

Особенности алгоритма:

- использовалось координатное представление особи;
- для создания начальной популяции использовались случайно сгенерированные манипуляторы;
- использовался пропорциональный отбор;
- использовались предложенные выше операторы скрещивания и мутации для координатного представления;
- скрещивание производилось всегда, т.е. вероятность применения оператора скрещивания  $p_c = 1$ ;
- вероятность мутации  $p_m = 0,1$ ;
- из шести манипуляторов (2 родителя, 4 потомка) выбирались два с лучшим значением функции приспособленности;

– использовался стандартный останов по количеству итераций.

Входные данные эксперимента:

- $(x_0, y_0) = (0, 0)$ ,  $(x_4, y_4) = (4, 4)$ ;
  - длина всех звеньев манипулятора равна 2;
  - масса всех звеньев манипулятора равна 1.
- Настраиваемые параметры:
- количество особей в популяции;
  - максимальное количество итераций.

Лучшая особь оценивалась по суммарному минимальному моменту (7).

Далее представлена таблица, в которой приведены значения целевой функции (7) задачи в зависимости от числа особей в популяции и количества итераций.

Из таблицы видно, что большое увеличение числа особей в популяции или количества итераций алгоритма не приводит к существенному улучшению решения. Это может привести и к обратному эффекту, например, в последней строке (при 100 особях) значения целевой функции не лучше, чем в других строках в соответствующих столбцах.

Значение целевой функции

Кол-во итер-й \ Число особей в попул.	Нач. попул.	1	10	20	50	100	1000
5	119,685	116,134	80,584	80,251	80,251	80,182	80,182
10	98,688	82,742	74,935	74,661	74,582	74,582	74,582
20	82,742	82,742	75,131	74,886	74,886	74,886	74,739
50	82,742	82,742	74,592	74,543	74,543	74,543	74,543
100	82,742	82,742	81,212	81,212	81,212	81,212	76,642

Из данной таблицы можно сделать вывод о том, что значения параметров генетического алгоритма для данной задачи можно выбирать следующим образом:  $n \in [10, 20]$ ,  $N\_Max \in [10, 20]$ . Можно предложить эвристическое правило определения параметров  $n = N\_Max$ .

На рис. 6 показана поэтапная работа программы (с отображением лучшего манипулятора утолщенной линией) для пяти особей в популяции.

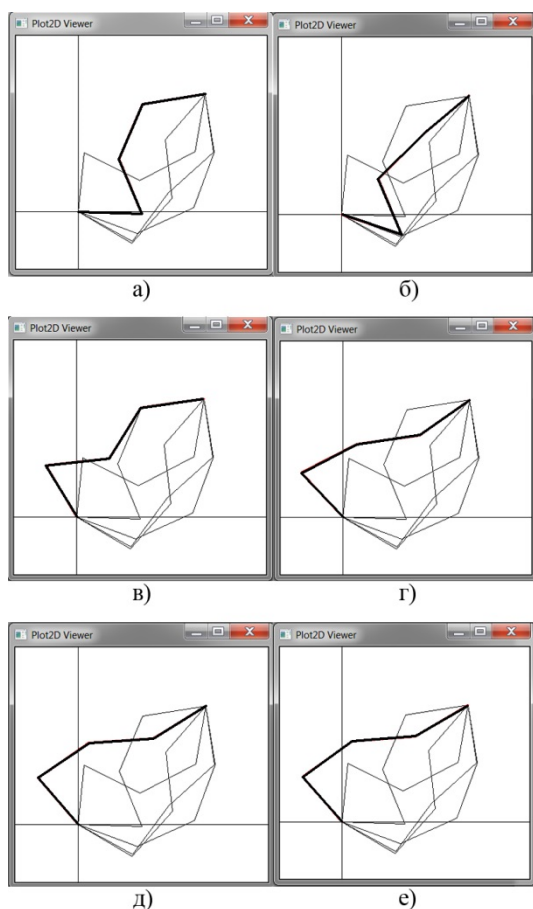


Рис. 6. Работа программы. Лучший манипулятор а) в начальной популяции ( $F = 12.204$ ); б) после 1 итерации ( $F = 11.842$ ); в) после 2 итераций ( $F = 10.064$ ); г) после 4 итераций ( $F = 8.437$ ); д) после 10 итераций ( $F = 8.217$ ); е) после 50 итераций ( $F = 8.183$ )

Как видно, уже после четвертой итерации алгоритм получает «хорошее» решение, которое в дальнейшем улучшается в результате работы алгоритма.

Время работы алгоритма при 100 особях и 100 итерациях 2,81с (Intel Core i3-2120, CRU 3.30 GHz, RAM 8 Gb).

### Различные целевые функции

Генетические алгоритмы позволяют легко менять целевую функцию задачи. На рис. 7 показаны результаты работы программы с тремя различными целевыми функциями: 1) минимальная сумма углов поворота в сочленениях (3)  $F(x, y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x_i, y_i)$ ; 2) min-max критерий для углов  $F(x, y) = \min \max_i \alpha_i(x_i, y_i)$ ; 3) минимальная сумма моментов сил тяжести сочленений ма-

нипулятора (5). Значения параметров алгоритма  $n = 20$ ,  $N_{Max} = 20$ .

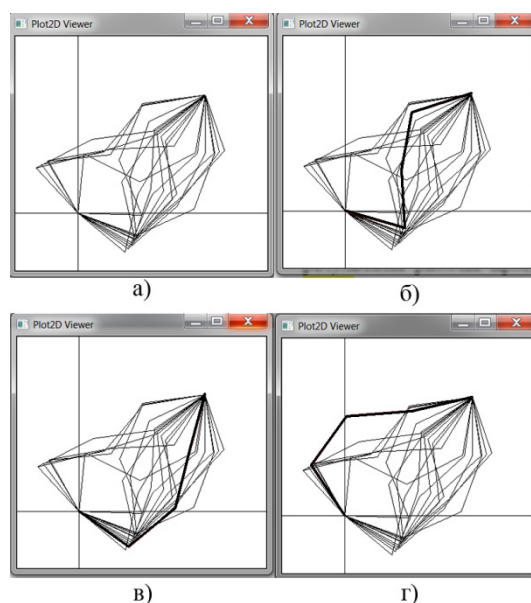


Рис. 7. Работа программы. Лучший манипулятор а) начальная популяция; б) целевая функция (3); в) min-max критерий; г) целевая функция (5)

### Применение алгоритма к физической модели микроманипулятора

Для апробирования работы описанного алгоритма был создан реальный мини-манипулятор. Звенья манипулятора напечатаны на 3D-принтере по модели из открытого проекта [8]. Подвижность звеньев обеспечивается девятиграммовыми сервоприводами. Для их управления применяется микроконтроллер STM32F746IGT6. Среда разработки для микроконтроллера – Keil5 с библиотекой HAL.

На рис. 8 показана физическая модель мини-манипулятора, управляемая с использованием представленного алгоритма.

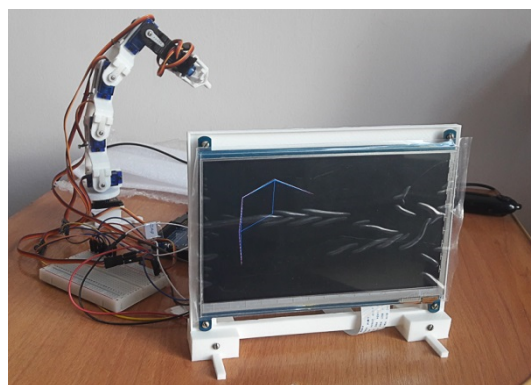


Рис. 8. Работа программы с физической моделью мини-манипулятора

На экране можно увидеть лучшую особь (из 25 в популяции) после 25 итераций работы алгоритма. Заметим, что популяция «сошлась», т.е. практически все особи-манипуляторы стали похожи друг на друга, кроме одной. Данная особь отвечает за одного из двух лучших потомков и, в силу решения геометрической задачи, всегда будет присутствовать в популяции.

### Выводы

1. Разработан генетический алгоритм для выбора оптимального положения манипулятора при решении ОЗК для четырехзвенного манипулятора на плоскости.

2. Разработана программная реализация алгоритма на языке C++ и проведена оценка его параметров.

3. Разработана программная реализация на языке C для микроконтроллера STM32F746IGT6, которая включает в себя: визуализацию работы алгоритма на подключаемом к микроконтроллеру сенсорном дисплее; управление сервоприводами с частотой обновления сигнала 50 Гц.

Алгоритм применен к физической модели манипулятора.

### Перспективы исследований

Предложенный подход можно развивать далее для применения к определению оптимального положения манипулятора в пространстве. Также интересно исследовать возможность применения эволюционного подхода к построению оптимального пути перемещения хвата манипулятора, например, используя в качестве начальной популяции набор примитивных траекторий.

### Литература

1. Булгаков А.Г., Воробьев В.А. Промышленные роботы. Кинематика, динамика, контроль и управление. М.: Солон-Пресс, 2007. 488 с.
2. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. М.: Физматлит, 2006. 402 с.
3. Каширина И.Л. Введение в эволюционное моделирование: учеб. пособие. Воронеж: ВГУ, 2007. 39 с.
4. Основы генетических алгоритмов. URL: <https://www.intuit.ru/studies/courses/14227/1284/lecture/24168> (дата обращения: 23.05.2018).
5. Пересечение: Две окружности. URL: <http://algotlist.manual.ru/math/geom/intersect/circlecircle2d.php> (дата обращения: 25.04.2018).
6. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы; пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия-Телеком, 2004. 383 с.
7. Юревич Е. Основы робототехники: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 368 с.
8. Thingiverse URL: <https://www.thingiverse.com> (дата обращения: 15.02.2018).

Поступила 26.09.2018; принята к публикации 13.11.2018

### Информация об авторах

**Медведев Сергей Николаевич** - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: [s\\_n\\_medvedev@mail.ru](mailto:s_n_medvedev@mail.ru), тел. 8-906-671-62-05

**Яковлев Александр Юрьевич** - канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры математического и компьютерного моделирования, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: [yakovlev@amm.vsu.ru](mailto:yakovlev@amm.vsu.ru), тел. (473)2-20-82-66

**Корольков Олег Геннадьевич** - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительной математики и прикладных информационных технологий, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: [dahl@list.ru](mailto:dahl@list.ru), тел. (473)2-20-82-66

## DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE ASSOCIATED PARAMETERS OF THE MANIPULATOR WITH ROTATING LINKS BASED ON GENETIC ALGORITHMS

S.N. Medvedev, A.Yu. Yakovlev, O.G. Korol'kov

Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the problem of choosing the optimal or close to optimal position of a four-link manipulator on a plane is considered. First, the inverse kinematics problem is formulated as a nonlinear optimization problem. Special attention in the mathematical model is given to the objective function. Next, to solve the problem, we propose a genetic algorithm for choosing the optimal position of a four-link manipulator on a plane. In accordance with the logic of genetic algorithms, original crossing and mutation operators were developed. Each of them is based on solving a geometric problem of intersection of two circles. The proposed operators are considered to represent the individual in the form of a set of coordinates of the vertices of the manipulator; however, instructions are also given to create such operators to represent the individual as a set of angles. To test the algorithm, a software package was developed, and a mini-manipulator was designed. The software package includes a software implementation for setting the algorithm parameters on a stationary computer and an implementation for a microcontroller with servo control of a real mini-manipulator. The article presents the results of a computational experiment for setting parameters, and also shows the operation of the algorithm on the microcontroller with the output of the results on the display. The construction of the optimal solution on a mini-manipulator is shown. Conclusions on work are made, and also possible further researches in the field are specified

**Key words:** inverse kinematics problem, Denavit – Hartenberg representation, genetic algorithm, crossing, mutation, manipulator, computational experiment, control, mechatronic devices

### References

1. Bulgakov A.G., Vorob'ev V.A., "Industrial robots. Kinematics, dynamics, control and management" ("Promyshlennye roboty. Kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie"), Moscow, Solon-Press, 2007, 488 p.
2. Gladkov L.A., Kureychik V.M. "Genetic algorithms" ("Geneticheskie algoritmy"), Fismatlit, 2006, 402 p.
3. Kashirina I.L. "Introduction to evolutionary modeling" ("Vvedenie v evolyutsionnoe modelirovanie"), VSU, Voronezh, 2007, 39 p.
4. "Fundamentals of genetic algorithms" ("Osnovy geneticheskikh algoritmov"), available at: <https://www.intuit.ru/studies/courses/14227/1284/lecture/24168> (accessed: 23.05.2018).
5. "Intersection: two circles" ("Peresechenie: dve okryznosti"), available at: <http://algotlist.manual.ru/maths/geom/intersect/circlecircle2d.php> (accessed: 25.04.2018).
6. Rutkovskaya D., Pilin'skiy L., Rutkovskiy L. "Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems" ("Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy"), Goryachaya liniya Telecom, 2004, 383 p.
7. Yurevich E., "Basics of robotics: manual" ("Osnovy robototekhniki: ucheb. posobie"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2010, 368 p.
8. "Thingiverse", available at: <https://www.thingiverse.com> (accessed: 15.02.2018).

Submitted 26.09.2018; revised 13.11.2018

### Information about the authors

**Sergey N. Medvedev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [s\\_n\\_medvedev@mail.ru](mailto:s_n_medvedev@mail.ru), tel. 8-906-671-62-05

**Aleksandr Yu. Yakovlev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [yakovlev@amm.vsu.ru](mailto:yakovlev@amm.vsu.ru), tel. (473)2-20-82-66

**Oleg G. Korolkov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: [dahl@list.ru](mailto:dahl@list.ru), tel. (473)2-20-82-66

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ, ДИАГНОСТИКИ И ВЫБОРА ТАКТИКИ ЛЕЧЕНИЯ БОЛЬНЫХ С ХРОНИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

К.О. Левенков, Е.Н. Коровин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** представлен процесс проектирования автоматизированной медицинской информационной системы оценки состояния, диагностики и выбора тактики лечения больных с патологией мочеполовой системы на основе статистического, имитационного и нейросетевого моделирования. В качестве входной информации для построения математических моделей оценки состояния и подбора терапии были изучены и выбраны необходимые данные из 150 историй болезни пациентов, страдающих патологиями мочевыделительной системы. Для оценки значимости клинических признаков использовались корреляционный анализ и метод априорного ранжирования мнения экспертов. Оценка состояния пациентов с патологией выделительной системы осуществлялась с помощью построения «дерева решений» и статистического моделирования. Выбор схемы лечения пациентов с хроническим пиелонефритом и мочекаменной болезнью осуществлялся с помощью нейросетевых моделей, дискриминантных функций. Проведен кластерный анализ данных по выбору терапии. Представленная в статье сеть Петри позволяет отслеживать состояние процесса диагностики и разрабатывать схемы лечения с помощью имитации. Полученные нейросетевые модели, дискриминантные функции, статистические модели и результаты анализов, сеть Петри, а также модуль цифровой обработки результатов ультразвуковой доплерографии используются в автоматизированной медицинской информационной системе, которая способствует повышению эффективности процессов диагностики и оценки состояния пациентов. Также медицинская информационная система позволяет повысить качество и сократить время выбора схемы лечения пациентов с патологией мочеполовой системы

**Ключевые слова:** нейросетевое моделирование, хронический пиелонефрит, мочекаменная болезнь, дискриминантные функции, сеть Петри, ультразвуковая доплерография, модуль, имитационное моделирование

### Введение

Самыми часто встречающимися и серьезными заболеваниями в урологической практике являются пиелонефрит и мочекаменная болезнь. Пиелонефрит занимает второе место в структуре нозологий среди урологических заболеваний во всех возрастных категориях. Пиелонефрит представляет собой неспецифическое воспалительное заболевание инфекционной природы, которое одновременно или последовательно поражает лоханку почки и почечную паренхиму. Под мочекаменной болезнью понимают патологический процесс, вызванный нарушением обмена веществ, который обусловлен различными эндогенными и экзогенными факторами и отличается образованием камней в мочевыводящих путях и почках.

Согласно данным статистики, пиелонефрит и мочекаменная болезнь составляют до 70 % всей урологической патологии. Диагностика этих патологий осложняется различными формами течения болезни, а также сопутствующими патологиями. В такой ситуации, чтобы поставить точный диагноз, врачу-диагносту необ-

ходимо обработать широкий спектр анамнестической информации и результаты лабораторных и инструментальных исследований. Таким образом, диагност оказывается в ситуации, когда требуется быстрая обработка большого количества информации. Отметим, что при назначении лечения доктору необходимо учитывать состояние пациента, форму заболевания и сопутствующие заболевания.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить, что в современных реалиях при ведении больных с диагнозом хронический пиелонефрит и/или мочекаменная болезнь приобретает большое значение использование медицинских информационно-программных подсистем, предназначенных для поддержки принятия решений.

### Постановка задачи

Для повышения эффективности выбора необходимой терапии и оценки состояния пациентов невозможно не обратиться к автоматизации обработки диагностических данных с использованием информационных технологий. Для решения данных медицинских задач необходимо создание компьютерной системы поддержки принятия решений, способной прини-

мать во внимание огромный объем диагностической информации и позволяющей исключить ошибки субъективного характера.

Ключевой целью нашего исследования является проектирование автоматизированной медицинской информационной системы, позволяющей по данным анамнеза, результатам лабораторных и клинических исследований индивидуально и максимально точно давать оценку состоянию пациента, что значительно ускорит процесс диагностики, исключит возможность «врачебной ошибки» при выборе тактики лечения пациента с учетом индивидуальных особенностей.

### Оценка диагностической значимости клинических признаков на основе статистических методов обработки данных

Для оценки значимости клинических признаков больных хроническим пиелонефритом и мочекаменной болезнью были применены корреляционный анализ и метод априорного ранжирования мнения экспертов. На базе метода корреляционного анализа рассмотрена зависимость между клиническими показателями и диагнозом. Анализировали следующие клинические показатели:  $X_1$  – уровень гемоглобина в ОАК,  $X_2$  – уровень эритроцитов в ОАК,  $X_3$  – уровень лейкоцитов в ОАК,  $X_4$  – СОЭ в ОАК,  $X_5$  – белок в ОАМ,  $X_6$  – лейкоциты в ОАМ,  $X_7$  – эритроциты в ОАМ,  $X_8$  – уровень глюкозы в биохимическом анализе крови,  $X_9$  – уровень мочевины в биохимическом анализе крови,  $X_{10}$  – уровень креатинина в биохимическом анализе крови,  $X_{11}$  – общий белок в биохимическом анализе крови,  $X_{12}$  – обобщенные результаты УЗИ и КТ диагностики,  $X_{13}$  – размеры камня в мочеточнике,  $X_{14}$  – размеры камня в почке,  $X_{15}$  – результаты посева мочи,  $X_{16}$  – результаты внутривенной урографии. Результаты корреляционного анализа представлены в виде корреляционной матрицы (таблица).

Результаты корреляционного анализа

	$X_3$	$X_5$	$X_6$	$X_{10}$	$X_{14}$	$X_{15}$	$X_{16}$
$Y$	0,1	0,23	0,16	0,26	0,92	0,61	0,33

По результатам, представленным в таблице, видно, что степень корреляции диагноза достаточно велика с рядом признаков, таких как: уровень лейкоцитов в ОАК, белок в ОАМ, лейкоциты в ОАМ, уровень креатинина в биохимическом анализе крови, камень в почке, резуль-

таты посева мочи, результаты внутривенной урографии. Однако наибольшая корреляция в 0,92 отмечена с признаком «размеры камня в почке».

Для оценки диагностической ценности клинических признаков хронического пиелонефрита и мочекаменной болезни использовался метод априорного ранжирования мнения экспертов. Вниманию специалистов была представлена анкета, в которой требовалось оценить диагностическую ценность клинических признаков пиелонефрита и мочекаменной болезни. Каждой переменной присваивается определенный ранг в результате ранжирования переменных по степени убывания или возрастания. В том случае, когда эксперт не может присвоить всем переменным разные ранги, разрешается нескольким переменным присвоить равнозначные ранги. Если происходит совпадение рангов, матрица приводится к нормальному виду. Для приведения матрицы к нормальному виду переменным, которые имеют равнозначные ранги, присваивается ранг, равный среднему значению мест, которые переменные поделили между собой. На заключительном этапе априорного ранжирования производится оценка согласованности респондентов, которая оценивается путем расчета коэффициента конкордации.

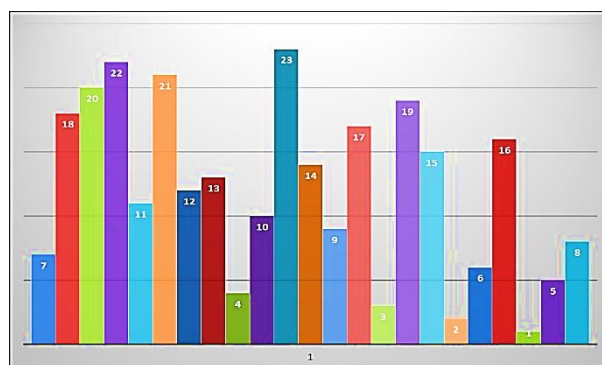


Рис. 1. Гистограмма значимости клинических признаков

На рис. 1 представлена гистограмма значимости клинических признаков хронического пиелонефрита и/или мочекаменной болезни. Таким образом, наиболее значимыми симптомами оказались: наличие камня в почке; конкременты в мочеточнике; высокая степень бактериурии, которая отмечается при посеве мочи; сдвиги лейкоцитарной формулы крови; повышение креатинина; увеличение белка в моче.

С помощью данных статистических методов была сформирована матрица входных данных для дальнейшего построения математиче-

ских моделей по оценке состояния больных и выбору терапии.

### Оценка состояния больных с патологией мочевыводительной системы на основе «дерева решений»

На базе аналитической платформы Deductor Academic разработано дерево принятия решений, которое позволяет проводить оценку состояния пациента, что особенно актуально в первые дни пребывания в стационаре. Для построения дерева был применен алгоритм C4.5, разработанный Р. Куинленом. Идея данного алгоритма заключается в следующем: спроектировать алгоритм, предсказывающий значение целевой переменной на базе определенного количества переменных на входе. Каждый лист дерева и есть значение целевой переменной, измененной при перемещении от корня дерева к листу. Матрица обучающей выборки была составлена после анализа 90 историй болезни пациентов отделения урологии. Больные поступали в стационар с различными патологиями. В нашем случае были выделены пациенты, в диагнозе которых фигурировали хронический пиелонефрит и мочекаменная болезнь. Необходимо заметить, что из 150 пациентов урологического отделения больницы было несколько больных с дополнительными хроническими заболеваниями, такими как сахарный диабет, артериальная гипертензия, аллергия на антибиотики. Также среди обследуемых было 3 беременные пациентки. Все эти дополнительные факторы должны учитываться врачом-диагностом при назначении схемы лечения.



Рис. 2. «Дерево решений» по оценке состояния пациентов с патологией мочевыводящей системы

Построенное дерево принятия решений позволяет на основе клинических признаков оценить состояние пациента и классифициро-

вать для дальнейшего принятия решения о назначении терапии. Данное дерево решений состоит из 19 узлов, в основе логических правил которых лежит 8 исходных признаков. Наиболее значимыми целевыми атрибутами в данном случае являются: анатомические препятствия в прилоханочном или дистальном отделах мочеточника; нарушение оттока мочи из лоханки, которое образуется вследствие наличия камня или другого анатомического препятствия; уретроррагия; аллергические реакции на антибиотики; беременность; сахарный диабет в анамнезе; неконтролируемое артериальное давление.

Апробация построенного «дерева решений» проводилась на контрольной выборке из 60 пациентов отделения урологии. Состояние 56 пациентов было оценено верно, таким образом, достоверность данного «дерева решений» достаточно высока.

### Моделирование процесса выбора тактики лечения на основе статистического и нейросетевого моделирования

Для построения дискриминантных функций данные из историй болезни пациентов отделения урологии разделили на 2 группы. На основе результатов первой группы пациентов строились классификационные функции, вторая группа была предназначена для оценки достоверности полученных функций. Классификационные функции для каждого вида терапии имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & -137,8 + 0,505 * x_1 \\
 & -0,027 * x_2 + 0,306 * x_3 + 0,07 * x_4 + \\
 & 8,657 * x_5 + 1,532 * x_6 + 4,855 * x_7 \\
 & + 0,558 * x_8 - 0,005 * x_9 + 0,213 * x_{10} + \\
 & 2,162 * x_{11} + 1,66 * x_{12} - 0,222 * x_{13} + \\
 & 3,164 * x_{14} + 4,265 * x_{15} + 0,72 * x_{16} \\
 Y_2 = & -151,896 + 0,531 * x_1 \\
 & -0,6 * x_2 + 0,29 * x_3 + 0,079 * x_4 \\
 & + 9,149 * x_5 + 1,487 * x_6 + 5,498 * x_7 \\
 & + 0,586 * x_8 + 0,005 * x_9 + 0,243 * x_{10} + \\
 & 2,198 * x_{11} + 1,576 * x_{12} - 0,25 * x_{13} \\
 & + 3,577 * x_{14} + 4,554 * x_{15} + 1,949 * x_{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & -431,747 + 0,638 * x_1 \\
 & -0,163 * x_2 + 0,079 * x_3 + 0,06 * x_4 \\
 & +1,816 * x_5 + 3,566 * x_6 + 5,073 * x_7 \\
 & +0,884 * x_8 - 0,38 * x_9 + 0,25 * x_{10} \\
 & +2,009 * x_{11} + 1,858 * x_{12} - 0,279 * x_{13} \\
 & +154,239 * x_{14} + 5,152 * x_{15} + 2,213 * x_{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_4 = & -222,754 + 0,516 * x_1 \\
 & -0,08 * x_2 + 0,77 * x_3 + 0,61 * x_4 \\
 & +5,136 * x_5 + 2,99 * x_6 + 5,739 * x_7 \\
 & +1,28 * x_8 - 0,139 * x_9 + 0,236 * x_{10} \\
 & +2,353 * x_{11} + 2,007 * x_{12} - 0,256 * x_{13} \\
 & +71,083 * x_{14} + 3,863 * x_{15} + 2,357 * x_{16}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_5 = & -233,199 + 0,559 * x_1 \\
 & -0,09 * x_2 - 0,107 * x_3 + 0,063 * x_4 \\
 & +7,1 * x_5 + 3,421 * x_6 + 5,666 * x_7 \\
 & +1,138 * x_8 - 0,167 * x_9 + 0,227 * x_{10} \\
 & +2,292 * x_{11} + 1,845 * x_{12} - 0,261 * x_{13} \\
 & +74,483 * x_{14} + 3,261 * x_{15} + 3,844 * x_{16}
 \end{aligned}$$

где  $Y_1$  – преимущественно консервативная терапия антибактериальными, спазмолитическими и противовоспалительными препаратами в сочетании с физиотерапевтическими процедурами;  $Y_2$  – консервативная терапия в сочетании с оперативным лечением в объеме контактной литотрипсии (КЛТ);  $Y_3$  – консервативная терапия в сочетании с оперативным лечением в объеме дистанционной литотрипсии (ДЛТ);  $Y_4$  – консервативная терапия в сочетании с оперативным лечением в объеме перкутанной нефролитолапаксией (ПНЛТ);  $Y_5$  – открытая операция и консервативное лечение.  $X_1$  – уровень гемоглобина в ОАК,  $X_2$  – уровень эритроцитов в ОАК,  $X_3$  – уровень лейкоцитов в ОАК,  $X_4$  – СОЭ в ОАК,  $X_5$  – белок в ОАМ,  $X_6$  – лейкоциты в ОАМ,  $X_7$  – эритроциты в ОАМ,  $X_8$  – уровень глюкозы в биохимическом анализе крови,  $X_9$  – уровень мочевины в биохимическом анализе крови,  $X_{10}$  – уровень креатинина в биохимическом анализе крови,  $X_{11}$  – общий белок в биохимическом анализе крови,  $X_{12}$  – обобщенные результаты УЗИ и КТ диагностики,  $X_{13}$  – размеры камня в мочеточнике,  $X_{14}$  – размеры камня в почке,  $X_{15}$  – результаты посева мочи,  $X_{16}$  – результаты внутривенной урографии. Значение критерия Уилкса  $\lambda=0,0075668$  близко к 0, что говорит о хорошей различаемости классов.

Для построения нейронных сетей, предназначенных для моделирования процесса выбора терапии больных хроническим пиелонефритом и мочекаменной болезнью, использовались пакет STATISTICA 6 и алгоритм обучения с обратным распознаванием ошибки. В пакете STATISTICA 6 был построен ансамбль из 10 нейронных сетей. Обучение нейронной сети производилось на 120 примерах, 30 примеров было выделено для тестирования моделей.

Также входные данные, используемые для выбора тактики лечения, имеют различные единицы измерения, поэтому перед их подачей на вход сети они были преобразованы в 0 и 1. Таким образом, векторы классификационных признаков заболеваний хронического пиелонефрита и мочекаменной болезни представлены следующей последовательностью:  $x_1$  – снижение гемоглобина в ОАК,  $x_2, x_3$  – уровень эритроцитов в ОАК,  $x_4, x_5$  – уровень лейкоцитов в ОАК,  $x_6, x_7$  – увеличение СОЭ в ОАК,  $x_8$  – увеличение белка в ОАМ,  $x_9$  – увеличение лейкоцитов в ОАМ,  $x_{10}$  – увеличение эритроцитов в ОАМ,  $x_{11}$  – увеличение уровня глюкозы в биохимическом анализе крови,  $x_{12}, x_{13}$  – уровень мочевины в биохимическом анализе крови,  $x_{14}$  – увеличение креатинина в биохимическом анализе крови,  $x_{15}$  – снижение общего белка в биохимическом анализе крови,  $x_{16}$  – результаты посева мочи,  $x_{17}, x_{18}$  – размеры камня в мочеточнике,  $x_{19}, x_{20}$  – размеры камня в почке,  $x_{21}$  – нормализация кровоснабжения почек артериальной и венозной кровью, наблюдаемая в течение пребывания больного в стационаре по средствам ультразвуковой доплерографии.

Нейросетевые модели имеют по 5 выходов, которые соответствуют каждому из присутствующих в обучающей выборке классов лечения. В качестве нелинейного элемента нейрона используется нелинейный функциональный сигмоидальный преобразователь:

$$f_{yi}(S) = \frac{1}{1 + e^{-0.1s}}$$

Сети, которые реализуют данную систему, представлены на рис. 3.



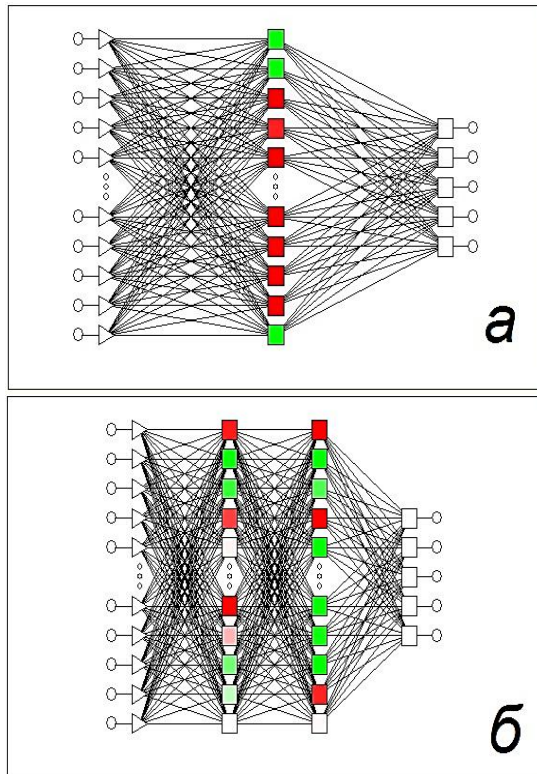


Рис. 3. Архитектура нейронных сетей: а – нейронная сеть с одним скрытым слоем; б – нейронная сеть с двумя скрытыми слоями

В нейронной сети под буквой (а) один скрытый слой, состоящий из 14 нейронов. В нейронной сети (б) два скрытых слоя, первый слой состоит из 14 нейронов, а второй слой нейронной сети состоит из 12 нейронов. Обучение нейронной сети производилось с применением линейной функции активации на входном слое, сигмоидальной функции на скрытом и логистической функции на выходном слое. При адекватном распознавании на одном из выходных элементов будет высокое значение активации при небольших величинах на остальных четырех элементах. Апробация моделей проводилась на контрольной выборке из 30 пациентов. Лишь одному пациенту была подобрана неправильная терапия, что соответствует достоверности выбора схемы лечения 97%.

#### Разработка модуля цифровой обработки результатов ультразвуковой доплерографии больных с патологией мочевыводящих путей

Ультразвуковая доплерография сосудов почек определяет состояние вен и сосудов, которые отвечают за правильное функционирование почек. Доплеровский эффект не что иное,

как разница между частотами посылаемого в орган ультразвукового импульса и ответным эхо-сигналом, отраженным от эритроцитов. Транслируемый на монитор компьютера результат расшифровывается врачом. Цветовое разрешение показателей, иначе цветовое доплеровское картирование (ЦДК), имеет большую информативность, поскольку, фактически, исключает ошибки при диагностике. Красным цветом на мониторе отображается кровоток, направленный к датчику, голубым – движение кровотока от датчика. Яркость цвета определяется скоростью процесса тока крови.

Разработка модуля цифровой обработки результатов ультразвукового доплерографического исследования проводилась в программе MATLAB. Материалом исследования явились снимки, которые сделаны при проведении ультразвуковой доплерографии почек пациентов урологического отделения. Данное инструментальное исследование проводилось на ультразвуковом аппарате Logiq 7 на момент поступления в больницу и на 5-е сутки после проведения медикаментозного лечения.

Врачу необходимо обработать результаты исследования для дальнейшего принятия решения о назначении терапии. Обработка состоит из визуального изучения снимков ультразвуковой доплерографии, а также подсчета количества «теплых» и «холодных» точек. Для выполнения подсчета необходимо провести преобработку снимка ультразвуковой доплерографии. На снимках мы видим не только сосудистую картину почек, но и сосудистый рисунок примыкающих органов. Целью исследования является оценка и подсчет количества венозной и артериальной крови в почечных сосудах, для этого необходимо избавиться от дополнительного рисунка на снимке. С помощью операторов пакета Image Processing Toolbox выполним кадрирование снимка ультразвуковой доплерографии. Геометрическое преобразование снимка осуществлялось при помощи оператора `imcrop`, который предназначен для выделения конкретной области. «Холодные» точки – это пиксели, которые имеют синий цвет, отображающие на экране монитора венозную кровь. «Теплые» точки – это пиксели красного цвета, которые отображают артериальную кровь.

В пакете MATLAB по конкретному алгоритму было обработано 100 снимков ультразвуковой доплерографии, проводимой у 25 пациентов, которые страдают мочекаменной болезнью и хроническим пиелонефритом. Больным,

у которых наблюдалось уменьшение кровотока, назначались операционная терапия и прием антибактериальных средств. Пациентам, у которых кровоснабжение почки нормализовалось, проводилось консервативное медикаментозное лечение в сочетании с физиотерапией.

Данный модуль цифровой обработки позволяет достаточно достоверно дать количественную оценку нарушению кровотока в почке и предоставить достаточную информацию для врача-уролога в целях назначения корректной терапии. Результаты тестирования снимков ультразвуковой доплерографии пациентов отделения урологии использовались как входные данные для нейросетевых моделей, ранее представленных в данной статье.

#### **Алгоритмизация процессов диагностики и выбора тактики лечения на основе имитационного моделирования**

В современной системе здравоохранения привлечение математического аппарата для моделирования процесса управления постановкой диагноза не является редкостью. Популярным направлением является имитационное моделирование. Имитационное моделирование является научным методом исследования, идея которого содержится в том, что изучаемая система заменяется моделью с адекватной точностью. Алгоритм процессов диагностики и выбор направления лечения заболевания включает в себя ряд взаимосвязанных событий, таких как: проведение первичного медицинского осмотра пациента, прибывшего в стационар, и сбор анамнеза; направление пациента на инструментальные и лабораторные исследования; оценка результатов анализов; выбор схемы лечения больного. Итогом нашего наблюдения за работой врачей, наблюдавших пациентов с пиелонефритом и/или мочекаменной болезнью, стало построение сетевой имитационной модели. В данной имитационной модели причинно-следственная связь была представлена на базе аппарата сетей Петри. Маркированная сеть Петри обозначена пятью символами  $\langle V, D, I, O, M \rangle$ , где  $V$  – это конечное число символов-позиций;  $D$  – переходы;  $I$  – входная функция;  $O$  – выходная функция.  $V = \langle b0-b18 \rangle$ ,  $D = \langle d1-d26 \rangle$ .

В построенной сети Петри под переходом понимается событие, которое происходит с больным отделением урологии в процессе диа-

гностики и лечения. События имеют конкретную продолжительность, следовательно, позиции будут выглядеть как условия, выполнение которых будет приводить к срабатыванию переходов. Функциональные назначения позиций:  $b0$  - Госпитализация больного в стационар для проведения диагностики;  $b1$  – Проведение первичного осмотра, сбор анамнеза;  $b2$  – Лабораторное исследование мочи количественными методами;  $b3$  – Посев мочи с целью определения патогенной микрофлоры;  $b4$  - Исследование функции почек (проба Реберга);  $b5$  - Общий анализ мочи;  $b6$  - Биохимический анализ крови;  $b7$  – ультразвуковая доплерография почек (УЗДГ);  $b8$  - Внутривенная урография;  $b9$  - Компьютерная томография (КТ);  $b10$  - Преднизолоновый тест;  $b11$  – Ангиография;  $b12$  - Анализ данных и постановка диагноза;  $b13$  – Нефростомия;  $b14$  – Катетеризация;  $b15$  - Антибактериальная, противовоспалительная, иммуностимулирующая, литокинетическая терапия;  $b16$  - Амбулаторное лечение: назначение уроантисептиков;  $b17$  - Противорецидивные курсы уроантисептиков;  $b18$  - Контрольное обследование.

Разработанная сеть Петри обладает правилами функционирования, которые позволяют отслеживать состояние процессов диагностики и лечения больных с патологией мочевыделительной системы. Также сеть позволяет генерировать варианты управления посредством имитации. На рис. 4 представлена сеть Петри для процессов диагностики и выбора тактики лечения хронического пиелонефрита и МКБ.

#### **Автоматизированная информационная система оценки состояния, диагностики и выбора тактики лечения хронического пиелонефрита и мочекаменной болезни**

В основе автоматизированной информационной системы лежат методы, модели и модули, представленные в статье выше. Система дает пользователю ряд возможностей хранения информации, корректировки данных, обобщения данных о пациентах отделения урологии и использования специальных средств, а именно, нейронных сетей, дискриминантного анализа, дерева решений. Также система оснащена возможностью формирования статистического отчета по отделению.

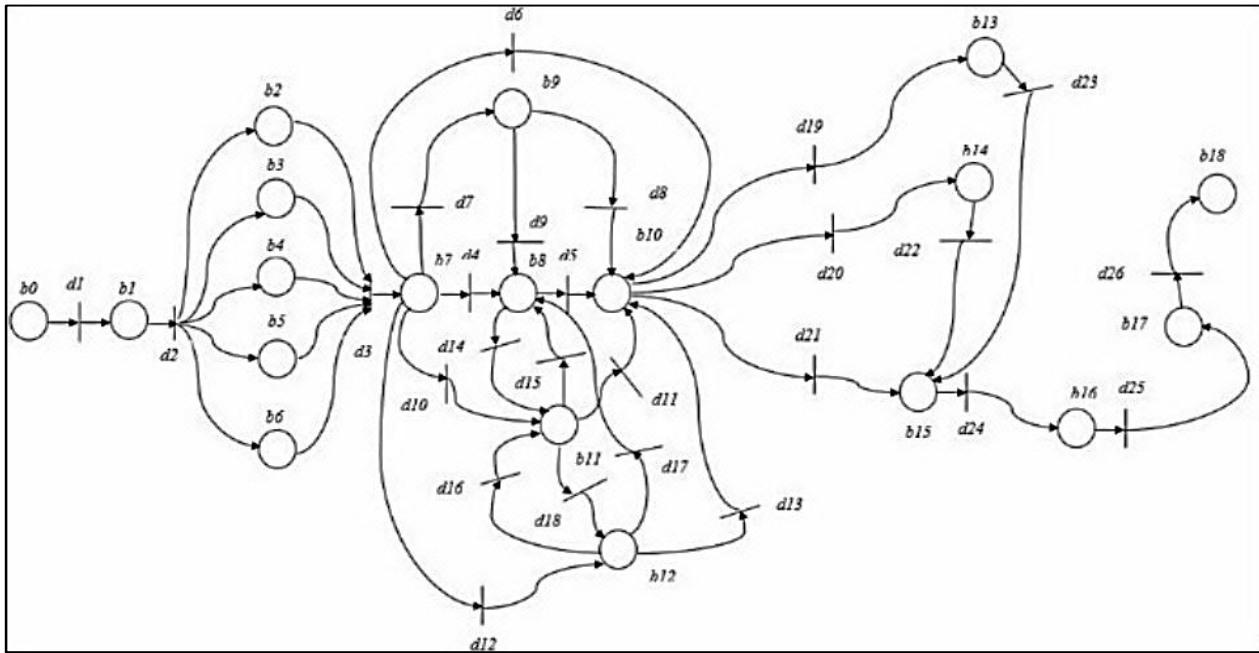


Рис. 4. Имитационная модель диагностики и лечения хронического пиелонефрита и мочекаменной болезни

Работа данной автоматизированной информационной системы обеспечивается с помощью двух специальных подсистем. Первая специальная подсистема несет ответственность за сбор, хранение, обработку информации и последующую оценку состояния пациента с применением метода «дерева решений». Данная подсистема представлена базой данных, которая хранит в себе необходимую информацию о пациенте, а также данные инструментальных исследований, такие как снимки ультразвуковой диагностики и внутривенной урографии. Источником информации в данном случае выступает пациент, сообщение которого с базой данных системы происходит при помощи врача-диагноста, который формирует историю болезни пациента.

Вторая подсистемы программы включает в себя набор моделей для выбора вида терапии. Выбор схемы лечения пациентов с патологией мочеполовой системы основывается на нейросетевых моделях и дискриминантных классификационных функциях.

Автоматизированная информационная система оснащена информационно-справочным модулем, который содержит информацию о хроническом пиелонефрите и мочекаменной болезни, о фитотерапии в урологии, о физиотерапевтических методах лечения патологий мочевыделительной системы, санаторно-курортном лечении заболевания, профилактики инфекций мочевыводящих путей. Также в модуле находится встроенная сетевая модель.

Функционирование автоматизированной информационной системы можно описать по следующему алгоритму:

- 1) обращение диагноста к базе данных;
- 2) получение диагностом информации о конкретном пациенте из БД или добавление нового пациента в БД;
- 3) преобразование и обработка данных;
- 4) оценка состояния пациента на основе «дерева решений»;
- 5) цифровая обработка снимков ультразвуковой доплерографии;
- 6) выбор тактики лечения с помощью дискриминантных классификационных функций;
- 7) выбор терапии при помощи нейросетевых модели;
- 8) в базу данных вводятся сведения о новом пациенте либо, по необходимости, корректируется информация о больном, который попал в отделение повторно;
- 9) вывод на печать медицинской карты пациента отделения урологии.

Автоматизированная медицинская информационная система написана на объектно-ориентированном языке программирования Java, который является надежным инструментом разработки прикладного программного обеспечения. В качестве среды разработки применялась интегрированная среда разработки с открытым исходным кодом NetBeans. Для разработки интерфейса использовали swing-технологии, для связи с базой данных Hibernate. Сама база данных выполнена в среде mySql.

## Заключение

При проектировании автоматизированной медицинской информационной системы оценки состояния, диагностики и выбора схемы лечения пациентов с хроническим пиелонефритом и/или мочекаменной болезнью были получены следующие результаты:

- по данным априорного ранжирования мнения экспертов и корреляционного анализа выделены наиболее ценные диагностические признаки, из которых составлена матрица входных значений;
- построен алгоритм оценки состояния пациентов на основе дерева принятия решений;
- получены модели дискриминантных классификационных функций по выбору схемы лечения;
- построены нейросетевые модели с одним и несколькими скрытыми слоями для выбора тактики лечения пациентов отделения урологии;
- разработан модуль цифровой обработки результатов ультразвуковой доплерографии;
- построена сетевая модель диагностики и подбора схемы терапии хронического пиелонефрита и/или мочекаменной болезни.

На базе спроектированных моделей и модулей была разработана автоматизированная медицинская информационная система, которая может быть применена врачом-урологом в качестве интеллектуальной системы поддержки принятия решений. Такое программное средство позволит повысить уровень оказываемой помощи пациенту, даст возможность врачу-диагносту сократить время постановки диагноза и с помощью математических моделей поможет выбрать верный алгоритм лечения пациентов.

## Литература

1. Коровин Е.Н, Родионов О.В. Методы обработки биомедицинских данных: учеб. пособие. Воронеж: ВГТУ, 2007.
2. Новикова Е.И., Родионов О.В., Коровин Е.Н. Моделирование биомедицинских систем: учеб. пособие. Воронеж: ВГТУ, 2008. 196 с.
3. Лопаткин Н.А. Урология. М.: ГЭОТАР – МЕД, 2004.
4. Шилова Е.М. Нефрология: учеб. пособие для послевузовского образования. М.: ГЭОТАР – Медиа, 2007.
5. Коровин Е.Н., Левенков К.О., Рябчунова Л.В. Анализ и алгоритмизация процессов диагностики и выбора тактики лечения хронического пиелонефрита на основе имитационного моделирования // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2016. Т. 15. № 1. С. 84-87.
6. Интеллектуализация процесса диагностики хронического пиелонефрита на основе априорного ранжирования мнения экспертов / Е.Н. Коровин, В.Н. Коровин, К.О. Левенков, М.В. Лущик // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2016. Т. 15. № 4. С. 647-651.
7. Кластерный анализ данных по выбору тактики лечения хронического пиелонефрита / К.О. Левенков, А.С. Турбин, Е.Н. Коровин, А.В. Кузьменко, Т.А. Гяургиев // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2017. Т. 16. № 4. С. 857-861.
8. Разработка нейронной сети для постановки диагноза «хронический пиелонефрит»/ В.Н. Коровин, Е.Н. Коровин, К.О. Левенков, М.В. Лущик // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. 2015. Т. 14. № 3. С. 585-588, 647-651.
9. Назаренко Г.И., Гулиев Я.И., Ермаков Д.Е. Медицинские информационные системы: теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 320 с.
10. Курс теории статистики: учебник/ под ред. В.Н. Салина, Э.Ю. Чурикова. М.: Финансы и Статистика, 2006. 353 с.
11. Savas L., Guvel S., Onlen Y. Nosocomial urinary tract infections: micro-organisms, antibiotic sensitivities and risk factors // WestIndianMed. 2006. № 55 (3). P. 188-193.
12. Блинов И.Н., Романчик В.С. Java. Промышленное программирование: практическое пособие. Минск: Универсал Пресс, 2007. 704 с.

Поступила 08.10.2018; принята к публикации 13.11.2018

## Информация об авторах

**Левенков Кирилл Олегович** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kirlevenkov@mail.ru

**Коровин Евгений Николаевич** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: korovin@saums.vorstu.ru

## DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED INFORMATION SYSTEM OF THE CONDITION EVALUATION, DAGNOSTICS AND SELECTION OF TACTICS FOR THE TREATMENT OF PATIENTS WITH CHRONIC DISEASES

**K.O. Levenkov, E.N. Korovin**

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

**Abstract:** the article presents the process of designing an automated medical information system for assessing the condition, diagnosis and tactics of treating patients with the pathology of the urogenital system based on statistical, simulation and neural network modeling. As input information for the construction of mathematical models for assessing the state and selection of a patient treatment scheme, data from 150 case histories of patients of the urology department of the Budgetary Healthcare Institution of the Voronezh Region of Voronezh City “Clinical Emergency Hospital No. 10” were used. To assess the significance of clinical signs we used correlation analysis and the method of a priori ranking of expert opinion. Assessment of the condition of patients with pathology of the excretory system was carried out using the construction of a “decision tree” and statistical modeling. The choice of treatment regimen for patients with chronic pyelonephritis and urolithiasis was carried out using neural network models and discriminant functions. A cluster analysis of data on the choice of therapy is given. A simulation model based on the Petri net was developed, which allows one to track the state of diagnosis and treatment of a patient with suspected pyelonephritis and/or urolithiasis and generate management options using imitation tools. The obtained neural network models, discriminant functions, statistical models and analysis results, the Petri net, as well as the digital processing module of the results of Doppler ultrasound are used in an automated medical information system, which contributes to an increase in the efficiency of diagnostic and patient assessment processes. Also, the medical information system allows one to improve the quality and reduce the time of selection of the scheme for treating patients with pathology of the genitourinary system

**Key words:** chronic pyelonephritis, urolithiasis, neural network modeling, discriminant functions, Petri network, Doppler ultrasound, module, simulation modeling

### References

1. Korovin E.N., Rodionov O.V. “Methods for processing biomedical data: manual” (“Metody obrabotki biomeditsinskikh dannykh: ucheb. posobie”), Voronezh, VSTU, 2007.
2. Novikov E.I., Rodionov O.V., Korovin E.N. “Simulation of biomedical systems: manual” (“Modelirovanie biomeditsinskikh sistem: ucheb. posobie”), Voronezh, VSTU, 2008, 196 p.
3. Lopatkin N.A., “Urology” (“Urologiya”), Moscow, GEOTAR - MED, 2004.
4. Shilova E.M. “Nephrology: manual for postgraduate education” (“Nefrologiya: ucheb. posobie dlya po-slevuzovskogo obrazovaniya”), Moscow, GEOTAR - Media, 2007.
5. Levenkov K.O., Korovin E.N., Ryabchunova L.V. “Analysis and algorithmization of diagnostic processes and the choice of tactics for the treatment of chronic pyelonephritis based on simulation modeling”, *System Analysis and Management in Biomedical Systems (Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh)*, 201, vol.15, no.1, pp. 84-87
6. Levenkov K.O., Korovin E.N., Kovrov V.N., Lushchik M.V. “Intellectualization of the process of diagnosing chronic pyelonephritis based on a priori ranking of expert opinion”, *System Analysis and Management in Biomedical Systems (Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh)*, 2016, vol. 15, no. 4, pp. 647-651.
7. Levenkov K.O., Turbin A.S., Korovin E.N., Kuz'menko A.V., Gyaurgiev T.A. “Cluster analysis of data on the choice of tactics for the treatment of chronic pyelonephritis”, *System Analysis and Management in Biomedical Systems (Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh)*, 2017, vol. 16, no. 4, pp. 857-861.
8. Korovin V.N., Korovin E.N., Levenkov K.O., Lushchik M.V. “Development of a neural network for the installation of the diagnosis of chronic pyelonephritis”, *System Analysis and Management in Biomedical Systems (Sistemnyy analiz i upravlenie v biomeditsinskikh sistemakh)*, 2015, vol. 14, no. 3, pp. 585-588, 647-651.
9. Nazarenko G.I., Guliev Ya.I., Ermakov D.E. “Medical information systems: theory and practice” (“Meditsinskie informatsionnye sistemy: teoriya i praktika”), FIZMATLIT, 2005, 320 p.
10. Ed. Salin V.N., Churikov E.Yu. “The theory of statistics course: manual” (“Kurs teorii statistiki: uchebnyk”), Moscow, Finansy i Statistika, 2006, 353 p.
11. Savas L., Guvel S., Onlen Y. “Nosocomial urinary tract infections: micro-organisms, antibiotic sensitivities and risk factors”, *WestIndianMed*, 2006, no. 55 (3), pp. 188-193.
12. Blinov I.N., Romanchik V.S. “Java. Industrial programming: practical guide” (“Promyshlennoe programmirovaniye: prakticheskoye posobie”), Minsk, Universal Press, 2007, 704 p.

Submitted 08.10.2018; revised 13.11.2018

### Information about the authors

**Kirill O. Levenkov**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kirlevenkov@mail.ru

**Evgeniy N. Korovin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: korovin@saums.vorstu.ru

## МЕТОД СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МОДЕЛЕЙ ИЗОЛИРУЮЩИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

М.Н. Краснянский<sup>1</sup>, В.Г. Матвейкин<sup>2</sup>, С.Ю. Алексеев<sup>2</sup>, А.Ю. Захаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

<sup>2</sup>ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов, Россия

**Аннотация:** обучение навыкам использования дыхательных аппаратов и дыхания в них осуществляется с помощью специализированных тренажеров. Основным их элементом является модель дыхательного аппарата. Сейчас в качестве моделей используются регенеративные тренажеры, являющиеся полными аналогами дыхательных аппаратов, только с уменьшенным временем защитного действия. Они точно моделируют полный спектр воздействий аппарата на человека, но их использование сопряжено с необходимостью утилизировать отработанный химический регенеративный продукт, невозможностью вмешиваться инструктору в процесс работы модели и с уменьшенным, по сравнению с оригинальным аппаратом, временем работы. Рассмотрена задача построения моделей дыхательных аппаратов на основе технологий математического и компьютерного моделирования, мехатроники, регистрации и оценки состояния кардио- и респираторной систем человека. По сравнению с регенеративными моделями они позволяют получать дополнительную информацию о режимах работы аппарата и состоянии пользователя, поэтому их можно рассматривать как модели дополненной реальности. Эти модели не используют химический регенеративный продукт, позволяют моделировать широкий спектр режимов работы дыхательного аппарата, обеспечивают полный контроль со стороны инструктора над факторами, оказывающими влияние на человека в любой момент времени работы. Результатом решения задачи является структура модели дыхательного аппарата, при которой время решения задачи моделирования меньше времени одного такта вдоха-выдоха. Задача решается при ограничениях на габаритные размеры модели, ее массу, энергопотребление и внешний вид, который должен соответствовать внешнему виду дыхательного аппарата. В этом случае работа модели может быть обеспечена малогабаритными вычислительными системами с незначительной производительностью и автономными аккумуляторами. Построение моделей, функционирующих в составе стационарных тренажерных комплексов, к которым не предъявляются ограничения по вычислительной мощности и энергопотреблению, является частным случаем задачи

**Ключевые слова:** тренажерный комплекс, дыхательные аппараты, структурно-параметрический синтез, анализ сложных систем

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части (проект 8.2906.2017/ПЧ)

### Введение

Для обеспечения возможности выполнения действий человеком в аварийной ситуации, сопровождающейся непригодной для дыхания атмосферой, используются дыхательные аппараты с химически связанным кислородом, не препятствующие выполнению человеком его основных профессиональных обязанностей. К основным достоинствам этих аппаратов относятся простота конструкции, длительные гарантийные сроки хранения, минимальные масса и габариты аппаратов, возможность длительного пребывания в состоянии ожидания использования, минимальные проверки технического состояния, сравнительно небольшая стоимость [1].

Спасение жизни человека в этих условиях зависит от наличия у него устойчивых навыков включения в изолирующий дыхательный ап-

парат, работы в нем при различных физических нагрузках и внешних факторах, возобновления его работы в случае возникновения сбоев или ошибок при его эксплуатации.

Сейчас обучение пользователей осуществляется с помощью регенеративных тренажеров. Их использование связано с большими экономическими затратами, узким спектром представленных ситуаций, характерных для эксплуатации дыхательного аппарата, затруднениями мониторинга состояния обучаемого.

Повышение качества обучения правильному использованию и навыкам дыхания в дыхательных аппаратах возможно при использовании обучающих тренировочных комплексов виртуальной и дополненной реальности.

### Постановка задачи

Обучение навыкам использования дыхательных аппаратов и дыхания в них осуществляется с помощью тренажеров, которые моде-

лируют режимы работы дыхательного аппарата и его воздействие на человека. Основные виды воздействия, которые испытывает человек при дыхании в аппарате, – компоненты газовой дыхательной смеси, температура и влажность газовой дыхательной смеси, подготавливаемой аппаратом, сопротивление дыханию, габаритные размеры и масса. Количественные значения этих параметров и границы их изменения различаются в зависимости от конструкции, принципа действия и назначения дыхательного аппарата.

Общей задачей моделирования работы дыхательного аппарата является воспроизведение и обеспечение воздействия на человека всех перечисленных выше факторов.

Сейчас в качестве моделей используются регенеративные тренажеры, являющиеся полными аналогами дыхательных аппаратов с уменьшенным временем защитного действия. Они точно моделируют полный спектр воздействий аппарата на человека, но их использование сопряжено с необходимостью утилизировать отработанный химический регенеративный продукт, невозможностью инструктора вмешиваться в процесс работы модели и уменьшенное, по сравнению с оригинальным аппаратом, время работы [2].

Альтернативой регенеративным моделям дыхательных аппаратов могут быть модели дополненной реальности, выполненные на основе методов математического и компьютерного моделирования, мехатроники, регистрации и оценки состояний кардио- и респираторной систем человека. Использование этих методов позволяет выполнить модель внешне идентичной оригинальному дыхательному аппарату и одновременно значительно расширить ее функциональность. В этом случае повышается степень реалистичности погружения человека в реальную обстановку, он ощущает на себе модель так, как если бы это был оригинальный аппарат. Расширение функциональности здесь предполагает увеличение количества моделируемых режимов дыхания и ситуаций, связанных с использованием аппарата, обеспечение дополнительных функций контроля состояния респираторной системы и полного контроля инструктором режимов работы модели.

Решение задачи моделирования дыхательного аппарата с помощью моделей дополненной реальности предполагает моделирование отдельных, несвязанных между собой процессов. Каждый из них обеспечивает моде-

лирование отдельного аспекта работы дыхательного аппарата. Физическая природа этих процессов различна, также принципиально различны методы, используемые для их моделирования. Например, моделирование сопротивления дыханию аппарата и нагрева газовой дыхательной смеси имеют в своей основе различные физические процессы и осуществляются разными механизмами с отличающимися принципами действия.

Для обеспечения точности такой же, как у регенеративных моделей задача моделирования в процессе тренировки решается многократно, для каждого такта вдох-выдоха. В регенеративных моделях прохождение газовой смеси через слой химического продукта инициирует химическую реакцию, тепло- и массообменные процессы. Их течение определяет режимы работы модели. Состав выдыхаемой газовой смеси меняется во времени, частота и глубина дыхания меняются для каждого такта вдоха-выдоха, поэтому можно рассматривать изменение режимов работы модели также для каждого такта вдоха-выдоха. Аналогично и для моделей дополненной реальности исходными данными для моделирования служат параметры дыхания человека. На их основе вычисляются значения температуры и сопротивления дыханию в реальном аппарате, и эти значения потом воспроизводятся.

Необходимость многократного решения задачи моделирования для каждого такта вдоха-выдоха предъявляет к модели дополнительные требования производительности.

Возможность использования моделей дополненной реальности в условиях максимально приближенных к реальным, вне учебных классов, может быть реализована благодаря использованию для обеспечения ее работы встраиваемых вычислительных систем и малогабаритных автономных источников энергии. Это предъявляет к самой модели требования снижения вычислительной нагрузки при сохранении точности моделирования и снижение энергопотребления. Построение моделей, функционирующих в составе стационарных тренажерных комплексов, для которых не предъявляются ограничения по вычислительной мощности и энергопотреблению, является частным случаем задачи.

### Методы исследования

Согласно проведенным исследованиям [3-6], состав газовой смеси человеком не ощуща-

ется. Поэтому при моделировании принимается допущение о том, что состав газовой смеси не оказывает на человека ощутимого влияния.

Сопротивление дыханию ощущается человеком при циркуляции газовой смеси через дыхательный аппарат в момент вдоха или выдоха. Температура газовой смеси, поступающей из дыхательного аппарата в легкие человека, превышает температуру тела человека.

На стадии выдоха человек подает выдыхаемую газовую смесь в модель, которая создает сопротивление выдоху. После этого газовая смесь попадает в дыхательный мешок. Это позволяет моделировать его наполнение соответственно реальному дыхательному аппарату. Степень реалистичности восприятия человеком дыхательного аппарата при этом повышается. На вдохе человек забирает воздух из атмосферы. В этом случае модель также создает сопротивление и дополнительно нагревает воздух до температуры, которая соответствует температуре работы реального аппарата в одинаковые промежутки времени при режимах дыхания.

Модель дыхательного аппарата может быть рассмотрена только как система. Она не может быть рассмотрена как единое монолитное устройство ввиду того, что моделирование процессов нагрева и сопротивления дыханию, регистрация параметров дыхания человека осуществляется с помощью устройств с отличающимися принципами действия. Определяющим признаком системы является то, что свойства и поведение ее составляющих оказывают влияние друг на друга. Корректное функционирование каждой подсистемы зависит от функционирования других подсистем. Сложность системы не сводится просто к сумме сложностей ее составных частей. Она имеет интеграционные свойства, которые присущи ей только как целостной системе. Они проявляются только тогда, когда система рассматривается как единое целое. Их невозможно оценить, исходя только из оценки отдельных системных компонентов [7].

Таким образом, эксплуатационные характеристики системы определяются сначала на уровне ее структуры, а затем на уровне характеристик каждой из ее подсистем. Без рассмотрения вариантов структуры системы нельзя обеспечить ее эксплуатационные характеристики, которые делают возможным решение задачи моделирования для каждого такта вдоха – выдоха. Оно предполагает выполнение следующих шагов алгоритма (рис. 1)

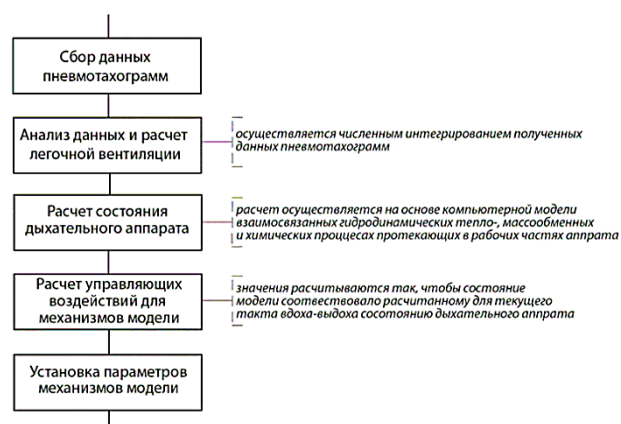


Рис. 1. Алгоритм решения задачи моделирования

Задача выбора оптимального варианта структуры может быть сформулирована следующим образом:

$$T(A, N, B, V, C) \rightarrow \min (1)$$

при ограничениях:  $M_a = M, G_a = G,$

где  $T$  – время моделирования одного такта вдоха-выдоха;  $A$  – количество подсистем модели;  $N = \{N_1, \dots, N_A\}$  – вектор значений, характеризующий среднюю вычислительную нагрузку на каждую подсистему;  $B$  – количество взаимосвязей;  $V = \{V_1, \dots, V_B\}$  – вектор значений, характеризующий направление каналов связи между подсистемами;  $C$  – трафик каждого канала связи;  $M, M_a$  – масса модели и реального дыхательного аппарата;  $G, G_a$  – вектор значений, характеризующий внешний вид (геометрию) модели и реального аппарата.

Решение задачи (1) обеспечивает получение структуры системы, при которой время выполнения алгоритма, представленного на рис. 1, минимально. При этом исключаются потери данных, характеризующих работу кардио- и респираторной систем человека. Они регистрируются непрерывно и являются исходными данными для расчета параметров исполнительных механизмов, моделирующих сопротивление дыханию и температуру. Их потеря снижает точность моделирования.

Полностью с помощью традиционных поисковых методов сформулированная задача оптимизации решена быть не может вследствие того, что она оперирует не только количественными, но и качественными характеристиками системы. Учитывая это, а также то, что анализ большого количества вариантов структуры затруднителен, было проанализировано два противоположных варианта, отличающихся степенью декомпозиции. Она оказывает влияние на время моделирования за счет



того, что определяет количество подсистем, выполняющих независимо. С повышением степени декомпозиции уменьшается вычислительная нагрузка на отдельную подсистему и увеличивается трафик обмена данными между ними. При слабой степени декомпозиции определяющим фактором является время работы подсистем, при высокой степени – синхронизация работы подсистем и обеспечение обмена данными между ними [8-10].

В каждом случае подсистемы выделялись так, чтобы они могли выполняться автономно, в отдельном вычислительном процессе.

Для каждого полученного функционального элемента синтезировалась соответствующая подсистема, которая в результате представляла собой самостоятельный программно-аппаратный или просто программный комплекс. В основу каждой подсистемы были положены абстракции той функциональности, за которые она отвечала. Так, например, подсистема расчета состояния дыхательного аппарата оперировала абстракциями конструктивных элементов аппарата, химического продукта и т.д. Подсистемы, содержащие аппаратные элементы, выполнялись так, что программное обеспечение определяло и при необходимости расширяло функциональность каждого элемента в отдельности, сохраняя возможность их автономного существования. В случае, если этого было недостаточно, существующие аппаратные элементы дополнялись программными абстракциями новых элементов. Связывание подсистем происходило так, чтобы сократить трафик обмена информацией между ними. Подсистемы функционировали на основе децентрализованной модели управления, обмениваясь между собой асинхронными сообщениями. Это позволило сократить количество управляющих и синхронизирующих сообщений. Во многом интенсивность трафика определяла конструкция самих подсистем.

Модель с минимальной степенью декомпозиции предполагает выполнение единой управляющей программы для всех подсистем. Это обеспечивает сосредоточение всех вычислительных операций, показанных на рис. 1, в одном месте и последовательное их выполнение. Модель в этом случае выглядела как система, представляющая собой монолитное программное ядро, к которому подключены датчики и исполнительные механизмы.

Второй вариант структуры модели был сконструирован так, чтобы за решение каждой задачи, показанной на рис. 1, отвечала мини-

мум одна подсистема. В этом случае каждая подсистема представляет собой отдельный программно-аппаратный комплекс, обладающий возможностью функционировать самостоятельно, в отдельном потоке управления. Этот вариант структуры показан на рис. 2.

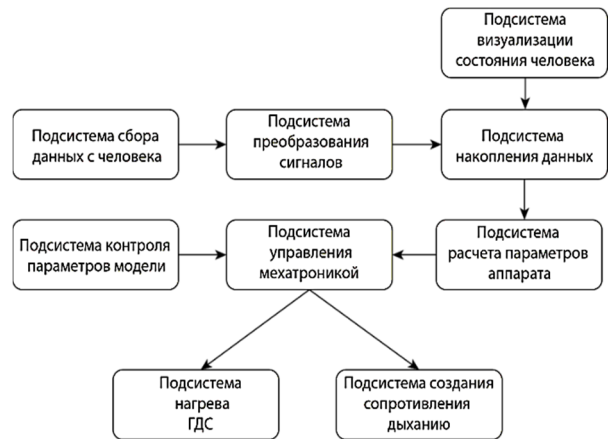


Рис. 2. Структура модели, где каждая подсистема выполняется параллельно, в отдельном потоке управления

Здесь количество подсистем превышает количество шагов алгоритма. Добавлена подсистема контроля параметров модели, которая обеспечивает корректное выполнение его шагов 4,5. Анализ данных пневмотахограмм и расчет легочной вентиляции обеспечивается решение трех взаимосвязанных задач. Решение каждой задачи может быть реализовано на базе отдельной подсистемы. Генерация управляющих воздействий реализована двумя задачами: отдельно для каждого исполнительного механизма - своя.

Полученный уровень декомпозиции позволяет отдельно рассматривать каждую задачу, что снижает уровень конструктивной сложности всей модели и обеспечивает автономное выполнение подсистем. Дополнительно он исключает необходимость получения обратного подтверждения от подсистем об обработке ими поступающих к ним данных. В этом случае достаточным является просто делегирование подсистеме ответственности за выполнение действий, на которые она рассчитана.

С конструктивной точки зрения такая декомпозиция делает возможным монтаж частей системы в различных участках модели, что позволяет повысить точность моделирования при одновременном сокращении затрачиваемых ресурсов. Например, такой вариант декомпозиции позволяет разместить устройство нагрева газовой смеси в воздухопроводной системе, ближе

к загубнику, соединенному с дыхательной системой человека, что снижает тепловые потери и позволяет экономить ресурс питающих аккумуляторов. Для мобильной версии модели дыхательного аппарата, питание которой осуществляется от аккумуляторов, экономия энергии имеет принципиальное значение.

С точки зрения эффективности использования вычислительных ресурсов и скорости работы подсистемы, это позволяет обеспечивать параллельное выполнение подсистем. Оно позволяет повысить надежность системы за счет того, что отказ одного элемента не приводит к отказу всех других.

### Обсуждение результатов

В работе было проведено сравнение двух описанных вариантов структуры модели дыхательного аппарата и рассмотрено их влияние на эксплуатационные характеристики модели. Для этого были проведены симуляции работы моделей различной структуры. Они выполнялись на микрокомпьютере *raspberry pi B+*. В ходе симуляций измерялось время решения задачи моделирования для одной стадии вдоха-выдоха, количество и динамика изменения количества потерянных данных о паттернах дыхания человека.

Данные о режиме дыхания человека представлялись функцией  $f(\tau)$ , показывающей изменение скорости дыхательной смеси во времени. Значения функции  $f(\tau)$  генерировались непрерывно с периодичностью 1000 раз в секунду. Данные о каждом цикле дыхания обрабаты-

вались в соответствии с этапами алгоритма, представленного на рис. 1. После того, как выполнение всех шагов алгоритма завершалось, считалось, что один цикл дыхания обработан, и осуществлялся переход к следующему.

Количество потерянных данных оценивались следующим образом. Каждому генерируемому значению функции  $f(\tau)$  присваивался порядковый номер. Значения функции  $f(\tau)$ , соответствующие каждой стадии вдоха-выдоха, помещались в буфер. После окончания стадии вдоха-выдоха буфер полностью передавался на обработку. С содержимым буфера выполнялись действия в соответствии с шагами 2 – 5 алгоритма, представленного на рис. 1. По их окончании цикл моделирования заканчивался, и осуществлялось чтение новой порции данных. Во время выполнения шагов 2 – 5 алгоритма буфер параллельно заполняется данными следующего такта вдоха – выдоха. В том случае, если данные из буфера не были вовремя переданы дальше на обработку, происходила их потеря. При каждом процессе чтения данных из буфера оценивались номера их значений. По известному количеству поступающих в буфер значений функции  $f(\tau)$  и их номерам, которые были обработаны, определялось количество потерянных данных.

Ниже на графике представлено количество теряемых исходных данных для двух различных вариантов декомпозиции модели (рис. 3). Отрицательное количество потерянных данных на второй кривой показывает образование свободного места в буфере (отрицательные значения потерянных данных).

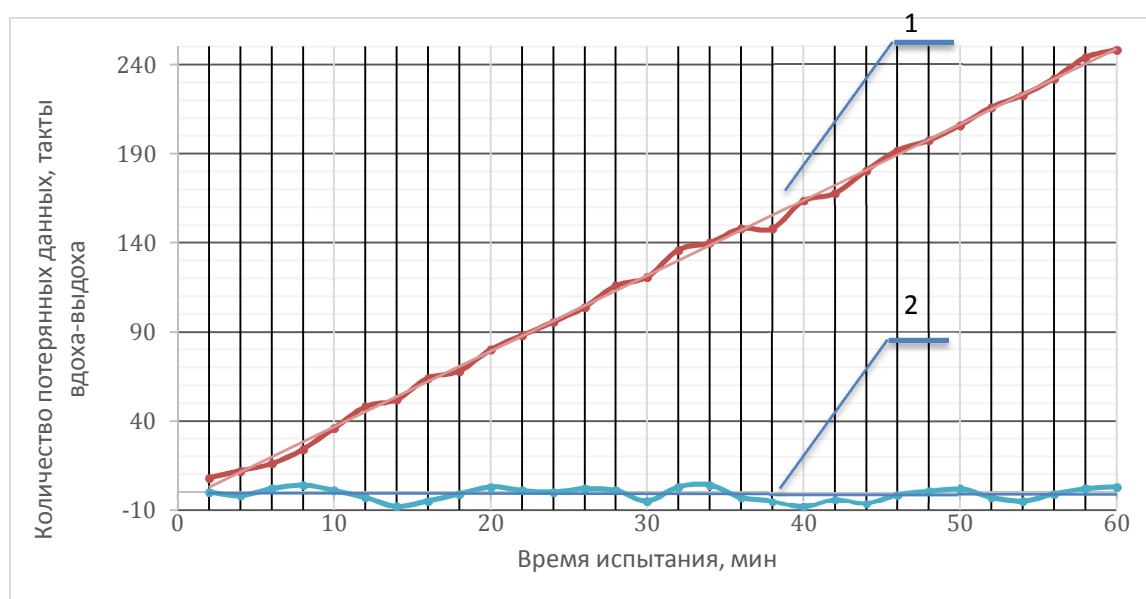


Рис. 3. Количество теряемой информации при различных вариантах декомпозиции

Использование монолитной программы управления предполагает один поток управления, в рамках которого можно организовать только последовательное выполнение функций моделирования температуры и сопротивления. Остальные вычислительные операции выполняются также последовательно. Это замедляет принятие решения и получения результата моделирования.

Второй вариант структуры позволяет часть функций выполнять параллельно, в различных потоках управления. Это избавляет от необходимости выполнять ожидание функции, а можно просто делегировать ее выполнение соответствующей подсистеме. После делегирования система, которая его выполняла, не останавливается, а продолжает выполнение своих задач. Время решения задачи при этом сокращается (рис. 4).

На рисунке показаны временные диаграммы работы модели. На левой части рисунка показана временная диаграмма последовательного выполнения шагов алгоритма, на правой – временная диаграмма параллельного выполнения. Шаг алгоритма 5 разбивается на два 5.1 – 5.2, т.к. он выполняется разными устройствами.

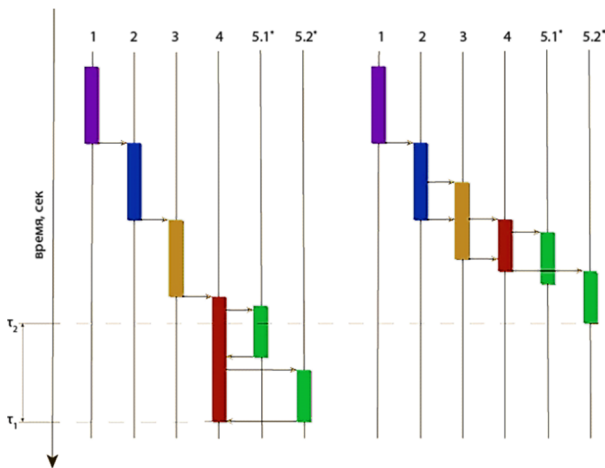


Рис. 4. Временные диаграммы работы моделей различной структуры

Вариант структуры с большим уровнем декомпозиции, который предполагает, что все подсистемы работают автономно, обеспечивает меньшее время решения задачи моделирования:

$$\tau_2 < \tau_1,$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – время решения задачи моделирования с малым уровнем и высоким уровнем декомпозиции, с. Для частоты дыхания  $20 \text{ мин}^{-1}$  в результате проведения симуляций зна-

чения  $\tau_1$  и  $\tau_2$  составили 4,3 секунды и 2,6 секунды соответственно. При длительности вдоха 3 секунды, в первом случае присутствует потеря данных, во втором – нет. При малом уровне декомпозиции возникают потери данных о дыхании человека, непрерывно поступающих на вход модели в течение всего времени ее работы. Отказ или ошибка в работе одной вычислительной операции может остановить работу модели без возможности ее восстановления.

При увеличении степени декомпозиции время решения задачи сокращается. Из сравнения левой и правой временных диаграмм можно увидеть, что большее снижение времени невозможно. Его ограничивают возможности распараллеливания алгоритма. Каждое действие алгоритма предполагает использование результатов, полученных на предыдущем шаге. Максимальная степень его распараллеливания показана на правой временной диаграмме. Дальнейшее снижение времени решения задачи моделирования возможно при сокращении времени работы каждой подсистемы в отдельности. Это требует повышения вычислительной мощности аппаратных вычислительных средств, обеспечивающих работу подсистемы.

## Выводы

В работе сформулирована задача структурно-параметрического синтеза моделей изолирующих дыхательных аппаратов, реализующих технологии дополненной реальности. Показано, что процесс решения задачи является поиском не только количественных, но и качественных характеристик.

Представлено решение сформулированной задачи. В ходе решения задачи осуществлялась генерация вариантов структуры модели и их сравнение с точки зрения времени решения задачи моделирования. Каждый вариант модели генерировался на основе методов системного анализа – декомпозиции, синтеза и связывания. В основу синтеза была положена методология разработки систем на базе абстракций предметной области и функционирующей в ее рамках технической системы.

На примере решения сформулированной задачи показано влияние структуры модели на скорость ее работы. Обоснован перечень варьируемых параметров конструкции модели, обеспечивающий возможность получения мо-

дели дыхательного аппарата с требуемыми эксплуатационными характеристиками в зависимости от его назначения и области использования.

Сформулированную задачу оптимизации можно дополнить и представить в виде, когда критерием оптимальности является комплексный показатель – минимальное время проведения одного цикла моделирования и количество потерянных данных, максимальное время нахождения подсистем в режиме ожидания, когда ими не выполняется никаких действий. На следующем этапе возможно дальнейшее развитие задачи оптимизации, чтобы исключить критерии качественной оценки за счет увеличения количественных. При этом исчезает необходимость ручного перебора вариантов, и появляется возможность использования для решения задачи методов автоматизированного поиска (*Search Based Software Engineering*).

#### Литература

1. Колтон, Крейг Е. Классификация респираторов: справочник по защите органов дыхания. CRC Press, 2017. С. 47-74.

2. Модель формирования канала обратной связи в эргатических системах для мониторинга качества процессов формирования компетенций персонала / И. Вешнева и др. // Международный журнал исследования качества. 2015. Т. 9. № 3. С. 125-131.

3. Пат. 9632827 США. Resource manager for managing the sharing of resources among multiple workloads in a distributed computing environment / Ahmed K. et al. 2017.

4. Белик К., Белик Д. Механизмы реагирования организма человека на физические воздействия. Предпосылки к созданию физиотерапевтических аппаратов // Litres, 2018. С. 153

5. Бочаров М.И. Терморегуляция организма при холодовых воздействиях (обзор). Сообщение II // Журнал медико-биологических исследований. 2015. № 2. С. 16.

6. Бяловский Ю.Ю., Булатецкий С.В. Системная организация адаптации организма к дополнительному респираторному сопротивлению // Центральный научный вестник. 2017. Т. 2. № 10. С. 6 – 8.

7. Sommerville I. Software Engineering 10h edition. Pearson. 2015.

8. Fujimoto R. Parallel and distributed simulation // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. IEEE Press, 2015. С. 45-59.

9. Map-Balance-Reduce: An improved parallel programming model for load balancing of MapReduce / J. Li, Y. Liu, J. Pan, P. Zhang, W. Chen, L. Wang // Future Generation Computer Systems. 2017 Mar 18. P. 17.

10. Пат. 9201690 США Resource aware scheduling in a distributed computing environment / Meng X., Tan J., Zhang L. 2015.

Поступила 05.10.2018; принята к публикации 26.11.2018

#### Сведения об авторах

**Краснянский Михаил Николаевич** – д-р техн. наук, профессор, ректор, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: [tstu@admin.tstu.ru](mailto:tstu@admin.tstu.ru)

**Матвейкин Валерий Григорьевич** – д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе и инновациям, ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (392000, Россия, г. Тамбов, Моршанское шоссе, 19), e-mail: [mail@roshimzashita.ru](mailto:mail@roshimzashita.ru)

**Алексеев Сергей Юрьевич** – канд. техн. наук, начальник сектора разработки автоматизированных средств и систем, ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (392000, Россия, г. Тамбов, Моршанское шоссе, 19), e-mail: [sergei.alexeev-dt@yandex.ru](mailto:sergei.alexeev-dt@yandex.ru)

**Захаров Александр Юрьевич** – инженер сектора разработки автоматизированных средств и систем, ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (392000, Россия, г. Тамбов, Моршанское шоссе, 19), e-mail: [zasha111@yandex.ru](mailto:zasha111@yandex.ru)

## METHOD OF STRUCTURAL AND PARAMETRICAL SYNTHESIS OF MODELS OF ISOLATING RESPIRATORY DEVICES OF AUGMENTED REALITY

M.N. Krasnyanskiy<sup>1</sup>, V.G. Matveykin<sup>2</sup>, S.Yu. Alekseev<sup>2</sup>, A.U. Zakharov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>PC “Roskhimzashchita Corporation”, Tambov, Russia

**Abstract:** training to use respiratory device and breathing in them is carried out by means of specialized exercise machines. Their basic element is the model of the respiratory device. Now the regenerative trainers are used as models, which are full analogues of respiratory devices, only with the reduced time of protective action. They accurately simulate the full range of apparatus effects on humans, but their use is associated with the need to dispose of the spent chemical regenerative product, the inability of the instructor to intervene in the process of the model and with a reduced, compared with the original apparatus, work time. The task of building models of breathing apparatus based on the technologies of mathematical and computer modeling, mechatronics, registration and assessment of the states of the human cardio and respiratory systems is considered. Compared with the regenerative models, they allow one to obtain additional information about the modes of operation of the device and the state of the user, so they can be considered as models of augmented reality. These models do not use a chemical regenerative product, allow one to simulate a wide range of modes of operation of the breathing apparatus, provide full control by

the instructor over the factors affecting a person at any time. The result of solving the problem is the structure of the model of the breathing apparatus, in which the time to solve the problem of modelling is less than the time of one inhalation-exhalation cycle. The problem is solved with restrictions on the overall dimensions of the model, its mass, power consumption and appearance, which should correspond to the appearance of the breathing apparatus. In this case, the operation of the model can be provided by compact computing systems with low productivity and autonomous batteries. Building models that function as part of stationary training complexes, to which there are no restrictions on computing power and power consumption, is a special case of the problem

**Key words:** training complex, respiratory devices, structural and parametrical synthesis, complex system analyse

**Acknowledgements:** this work was carried out under financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the design part (project 8.2906.2017/DP)

#### References

1. Colton, Craig E. "Classification of respirators Handbook of respiratory protection" ("Klassifikatsiya respiratorov: spravochnik po zashchite organov dykhaniya"), CRC Press, 2017, pp. 47-74.
2. Veshneva I. et al. "Model of the formation of a feedback channel in ergatic systems for monitoring the quality of the processes of forming personnel competences", *International Journal of Quality Research (Mezhdunarodnyy zhurnal issledovaniy kachestva)*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 125-131
3. Ahmed K. et al. "Resource manager for managing the sharing of resources among multiple workloads in a distributed computing environment", patent of the USA no. 9632827, 2017.
4. Belik K., Belik D. "Mechanisms of reaction of the human body to physical effects. Prerequisites to the creation of physiotherapeutic devices" ("Mekhanizmy reagirovaniya organizma cheloveka na fizicheskiye vozdeystviya. Predposylki k sozdaniyu fizioterapevticheskikh apparatov"), Liters, 2018, 153 p.
5. Bocharov M.I. "Thermal control of the body during cold exposure (review). Message II", *Journal of Biomedical Research (Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy)*, 2015, no. 2, p. 16
6. Byalovskiy Yu.Yu., Bulatetskiy S.V. "Systemic organization of the organism's adaptation to additional respiratory resistance", *Central Scientific Herald (Tsentral'nyy nauchnyy vestnik)*, 2017, vol. 2, no. 10, pp. 6-8.
7. Sommerville I. "Software Engineering 10th edition", Pearson, 2015
8. Fujimoto R. "Parallel and distributed simulation", *Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference*, IEEE Press, 2015, pp. 45-59.
9. Li J., Liu Y., Pan J., Zhang P., Chen W., Wang L. "Map-Balance-Reduce: an improved parallel programming model for load balancing of MapReduce", *Future Generation Computer Systems*, 2017, p. 17
10. Meng X., Tan J., Zhang L. "Resource aware scheduling in a distributed computing environment", patent of the USA no. 9201690, 2015.

Submitted 05.10.2018; revised 26.11.2018

#### Information about the authors

**Mikhail N. Krasnyanskiy**, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Rector of Tambov State Technical University (106 Sovetskaya st., Tambov 392000, Russia), e-mail: [tstu@admin.tstu.ru](mailto:tstu@admin.tstu.ru)

**Valeriy G. Matveykin**, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Deputy CEO for scientific work and innovations, PC "Roskhimzashchita Corporation" (19 Morshanskoe shosse, Tambov 392000, Russia), e-mail: [mail@roshimzashita.ru](mailto:mail@roshimzashita.ru)

**Sergey Yu. Alekseev**, Cand. Sc. (Technical), chief of the Sector of development of the automated means and systems, PC "Roskhimzashchita Corporation" (19 Morshanskoe shosse, Tambov 392000, Russia), e-mail: [sergei.alexeev-dt@yandex.ru](mailto:sergei.alexeev-dt@yandex.ru)

**Aleksandr Yu. Zakharov**, Engineer of the Sector of development of the automated means and systems, PC "Roskhimzashchita Corporation" (19 Morshanskoe shosse, Tambov 392000, Russia), e-mail: [zasha111@yandex.ru](mailto:zasha111@yandex.ru)

**РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОВАРИАНТНОЙ ИНТЕГРАЦИИ**Н.А. Рындин<sup>1</sup>, С.В. Сапегин<sup>2</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются особенности задачи проектирования архитектуры мультиагентных систем. Выделяются основные и дополнительные наборы моделей в рамках общего подхода к их проектированию с учетом жизненного цикла этих систем и их компонентов. Формулируется общий вид задачи для совокупности агентов и компонентов мультиагентных систем. С учетом того, что задача синтеза рациональной архитектуры мультиагентных систем является достаточно трудоемкой, связанной с большим количеством вычислений и неопределенностей, рассматривается решение этой задачи с точки зрения аппарата многовариантной интеграции. Изучается процесс нахождения рациональных вариантов на основе сформулированной общей структуры многовариантной оптимизационной модели. В качестве основы численного решения предлагается схема ограничения разнообразия множеств в рамках процесса многовариантной интеграции. Выделяются принципы декомпозиции общего решения для уменьшения сложности задачи по нахождению рациональных вариантов. Помимо этапов логического проектирования приводятся технические этапы проектирования мультиагентных систем. Реализацию архитектур программных подсистем информационной системы в данной парадигме предлагается осуществлять на основе методологии SOA. Подход позволяет достичь повышения эффективности в рамках применяемых методов проектирования

**Ключевые слова:** распределенные корпоративные информационные системы, интеллектуальное проектирование, построение корпоративных информационных систем

**Введение**

Одним из наиболее приоритетных направлений развития экономики Российской Федерации в рамках реализации Стратегии развития информационного общества РФ в период 2017 - 2030 годов является цифровая экономика. Концепция цифровой экономики, направленной на создание и развитие общества знаний, повышение благосостояния жителей РФ, повышения степени информированности и цифровой грамотности участников рынка, позволит России решить вопросы как глобальной конкурентоспособности, так и национальной безопасности.

Ключевой составляющей развития цифровой экономики является существование динамичной цифровой экосистемы, в которой цифровые данные являются ключевым фактором производства в большинстве сфер социально-экономической деятельности, обеспечивая эффективное взаимодействие различных субъектов информационного обмена, включая бизнес, научно-образовательное сообщество, государство и гражданское общество. При этом технологии создания, обработки и использования данных являются одной из важнейших составляющих экосистемы, обеспечивающих ее пользовательские характеристики и конкурентоспо-

собность. Помимо этого, тенденции укрупнения современных цифровых экосистем как за счет расширения области охвата человеческой деятельности, так и за счет объединения отдельных сегментов цифровизации, способствуют появлению все более и более развитых требований к технологиям интеграции отдельных программных компонентов и систем, управления данными, в том числе данными, используемыми в различных информационных системах с различными целями.

Помимо развивающихся требований к интеграции разнородных цифровых сред на основе использования общих данных, существенную роль в развитии инфраструктурных цифровых технологий играет компонента времени. С увеличением размера информационных систем, их сложности, количества обрабатываемых данных и сложности алгоритмов обработки системы перестают быть реактивными, реализующими функцию управления «здесь и сейчас». Все большее распространение получает парадигма активных систем, полностью контролирующих процесс добычи и обработки данных, обслуживания пользовательских запросов и контроля выполняемых бизнес-процессов. В качестве наглядного примера подобных тенденций можно привести развитие концепции RPA, отправной точкой которой является имитация пользователя, сидящего за компьютером. В наше время техно-

логии активных программных систем наиболее популярны в следующих отраслях экономики:

- финансовый сектор и банки;
- фармацевтика;
- складское хозяйство;
- ритейл;
- страхование;
- металлургия;
- e-commerce.

Помимо внедрения одиночных активных систем (программных агентов, роботов и т.д.) все большее значение получает разработка технологий для совместного использования наборов активных программных агентов – мультиагентных систем. Рациональное архитектурное проектирование таких систем из компонентов, предназначенных для решения кардинально различных задач, позволяет не только организовать эффективную работу, но и получить синергетический эффект. Таким образом, разработка методов рационального архитектурного проектирования мультиагентных систем является весьма актуальным направлением с точки зрения современной IT-индустрии.

### Постановка задачи

Рассмотрим особенности задачи проектирования архитектуры мультиагентных систем (МАС). В рамках общего подхода к проектированию МАС можно выделить следующие основные наборы моделей [1]:

1. Набор моделей агентов, задающих их архитектуру и общие свойства. При этом планируемые к использованию в МАС агенты могут весьма серьезно отличаться по строению, активности, интеллектуальности, целям и задачам.

2. Организационная модель, определяющая роли каждого агента (и типа агентов) в МАС, а также базовые взаимосвязи между ними и методы поддержания общей онтологии.

3. Модель взаимодействия – в общем случае описывает процессы коммуникации агентов, их кооперативного и антагонистического поведения, содержит протоколы и регламенты коммуникативных актов.

Помимо этих основных пакетов моделей, для нетривиальных структур МАС необходимо проработать следующие дополнительные модели:

1. Модель кооперации агентов, включающая в себя методы поиска решения нетривиальных задач за счет комбинации нескольких агентов ради достижения единой цели;

2. Модель координации агентов, обеспечивающая единый регламент использования общих ресурсов МАС, а также уникаль-

ных ресурсов, контролируемых различными агентами;

3. Модель эволюции агентов, включающая в себя методы и алгоритмы рационализации структуры агента при развитии его специализации в решении определенных наборов задач [2].

Помимо вышеперечисленных моделей, большое значение при проектировании архитектуры МАС имеет определение жизненного цикла как самой МАС, так и ее различных компонентов. При этом для совокупности агентов и компонентов экосистемы МАС в общем случае необходимо решить задачу вида:

$$\int_{T_0}^{T_0+T} f(S(t); F(t)) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $S(t)$  – набор требований к агенту (компоненту) МАС,  $F(t)$  – функциональность, реализуемая агентом,  $T$  – время присутствия агента в системе,  $T_0$  – момент начала использования компонента,  $f$  – функция, оценивающая соответствие функциональности  $F(t)$  актуальным требованиям  $S(t)$ ,  $f \in [0,1]$ . Функция  $f$  имеет смысл полезности конкретного программного агента и в соответствии со структурой агента может иметь две составляющие –  $f = f_{stat} + f_{dyn}$ , где  $f_{stat}$  – соответствие возможностей агента формализованным пользовательским потребностям (принципиальная возможность решать заранее обозначенный круг проблем), а  $f_{dyn}$  – способность агента в каждый конкретный момент времени обеспечить реализацию возникшей пользовательской потребности с надлежащим уровнем качества за счет своей гибкости, механизмов настройки, эволюции, а также интеллектуальных алгоритмов, связанных как со структурой самого агента, так и с его способами коммуникации и кооперации с другими агентами МАС [3].

В связи с трудоемкостью задачи синтеза рациональной архитектуры МАС, ввиду связанного с ней большого количества вычислений и неопределенностей предлагается рассмотреть её решение с точки зрения аппарата многовариантной интеграции. В общем случае, целью синтеза будет являться выбор варианта  $s \in S$ , где  $S$  – общее множество, которое обладает разнообразием элементов. Выбор  $s$  осуществим поэтапным исключением вариантов, не обеспечивающих выполнения заданных требований.

Для измерения степени разнообразия вариантов, связанных вероятностными соотношениями, наиболее эффективно использовать энтропию, которая, например, для множества вариантов  $\alpha$  имеет вид:

$$H(\alpha) = - \sum_{n=1}^N P_n^\alpha \lg P_n^\alpha \quad (2)$$

и характеризуется рядом свойств:

- симметричность относительно координат вектора  $P^\alpha$ , т.е. независимость от взаимного расположения  $P_n^\alpha$ ;
- достижение максимума на векторе  $P^\alpha$  с координатами  $P_n^\alpha = \frac{1}{N}, \forall n = \overline{1, N}$ , т.е. равнозначность всех вариантов;
- достижение минимума на векторе  $P^\alpha$  с координатами  $p_v^\alpha = 1, p_n^\alpha = 0, \forall n \neq v$ , т.е. единственный вариант интеграции оказывается пригодным для реализации.

Для достижения рационального варианта интеграции необходимо придерживаться следующих принципов:

- локальной и многовариантной интеграции;
- максимальной надежности;
- адекватности.

Принцип локальной и многовариантной интеграции заключается в том, что разнообразие локальных уровней интеграции измеряется энтропией независимых вариантов, а разнообразие многовариантной интеграции измеряется энтропией комбинаций уровней при учете их взаимного влияния. При этом взаимодействие вариантов различных уровней оценивается условной энтропией разнообразия вариантов на  $i$ -м уровне при использовании вариантов  $j$ -го уровня [4].

### Описание алгоритма

Рассмотрим процесс нахождения рациональных вариантов на основе сформулированной общей структуры многовариантной оптимизационной модели. Первым этапом процесса является декомпозиция задачи на основе ее содержательной постановки с формированием локальных моделей, ориентированных на решение следующих видов задач ограничения разнообразия множеств компонентов на различных уровнях интеграции, отбора вариантов оптимального и субоптимальных вариантов интеграции компонентов различных, построения отношения порядка на множестве рассматриваемых вариантов интеграции и группировки элементов множеств вариантов в локальные маршруты проектирования.

Основой численного решения этих задач является схема ограничения разнообразия множеств в рамках процесса многовариантной интеграции. При этом одной из главных стратегических задач в процессе нахождения рациональных

вариантов является уменьшение сложности задачи за счет декомпозиции общего решения. Декомпозиция может осуществляться на основе следующих принципов:

1. Структурная декомпозиция – разбиение системы на отдельные подсистемы за счет анализа общего набора требований, выделение модулей и библиотек, пакетов и схем баз данных. Финальным результатом такого подхода является разработка микросервисной архитектуры;

2. «Конвейерная» декомпозиция – выделение в рамках функциональности системы похожих процессов и выделение их в отдельные параметризуемые сущности: объекты, алгоритмы, модули;

3. «Эволюционная» декомпозиция – разделение проектируемых компонентов системы на группы по принципу прогнозируемой эволюции. Например, такие подсистемы, как пакет методов доступа к БД или пакет интеграционных функций могут отличаться характером своего развития от компонентов, обеспечивающих пользовательский интерфейс;

4. «Интеллектуальная» декомпозиция – разбиение системы на контуры взаимодействия активных и пассивных подсистем, обладающих определенным уровнем интеллектуальности – что зависит от архитектуры подсистем, их поведения и набора решаемых задач.

Помимо вышеперечисленных этапов логического проектирования, на каждой итерации при разработке МАС необходимо реализовывать следующие технические этапы:

- этап реализации и масштабирования подзадач. Связан с техническим анализом структуры программной системы, решением задач по балансировке нагрузки между узлами разрабатываемого приложения, выбора технологии взаимодействия служб с учетом развертывания системы, надежности ее работы, времени отклика на запрос и т.д. Особо следует отметить важность выбора способа обмена сообщениями между взаимодействующими сервисами в случае реализации распределенной системы. При этом в общем виде способ обмена сообщениями будет являться одной из комбинаций вариантов асинхронного и синхронного взаимодействия;

- этап тестирования, доработки и запуска текущих версий подсистем в эксплуатацию. Пропуск этого этапа может серьезно осложнить разработку МАС с технической точки зрения.

Технически для реализации архитектур программных подсистем ИС наиболее подходя-



щей в данной парадигме будет методология SOA, т.к. массовая разработка на её основе стала возможна в результате развития технологии Web-служб [5]. Архитектурные решения на базе методологий и языков описания Web-сервисов, таких как SOAP, WSDL и UDDI, показывают свою жизнеспособность и эффективность, несмотря на свою кажущуюся избыточность.

### Практический пример

Рассмотрим пример построения мультиагентной системы с использованием методов многовариантной интеграции для решения задачи координации деятельности исследовательского центра в направлении инновационных проектов. Целью разрабатываемой МАС является создание экосистемы управления ресурсами в процессе поддержки и развития инноваций. Рассмотрим профили основных пользователей системы:

1. Организаторы и эксперты – сотрудники исследовательского центра ARCPRIIS либо приглашенные эксперты, занимающиеся организацией инновационной деятельности, координирующие использование различного рода проектных ресурсов;

2. Стажеры – студенты и аспиранты высших учебных заведений IT-профиля, желающие пройти стажировку в интересном проекте;

3. Инноваторы – предприниматели и команды предпринимателей из различных сфер экономики, осуществляющие продвижение инновационных идей и продуктов;

4. Инвесторы – лица, способные участвовать в финансировании каких-либо проектов.

При этом для всех вышеперечисленных категорий пользователей необходимо создать максимально широкую среду коммуникации, обмена опытом и иной информацией, создания различного рода консорциумов и соглашений. Также координирующая информационная система должна облегчать доступ к внешним ресурсам различного рода, включая:

1. Специализированные рынки НТИ (EnergyNet, FoodNet, HealthNet, TechNet, NeuroNet и т.д.). При этом необходимый уровень доступа может достигаться за счет сотрудничества самых различных команд внутри координируемого облака инновационных проектов;

2. Источники различного рода специализированной научной информации (издательства, подборки изданий ограниченного доступа и т.д., вплоть до публикации собственных исследований);

3. Бизнес-акселераторы, бизнес-инкубаторы и прочие организации, способствующие продвижению проекта;

4. Биржи инновационных проектов, крупные независимые инвесторы, федеральные и региональные программы и т.п.

Построение единой целостной информационной системы, способной удовлетворить пользовательские потребности на необходимом уровне качества, таким образом, является сложной и высокочувствительной задачей. Альтернативой является создание платформенной экосистемы с последующей разработкой различного рода агентов, выполняющих достаточно узкие наборы задач, связанные с обеспечением взаимодействия пользователей. Для реализации агентов в рамках единого подхода была выбрана среда PADE (Python Agent DEvelopment framework), поддерживающая стандарт агентного взаимодействия FIPA-ACL. Для реализации модульного интерфейса различных видов пользователей был использован фреймворк Flask, работающий под управлением Web-сервера USWGI. При проектировании отдельных агентов, решающих задачи кого-либо из пользователей, широко используются принципы локальной и многовариантной интеграции, максимальной надежности и адекватности.

### Выводы

При проектировании архитектуры МАС, используемых в различных отраслях экономики, следует иметь в виду их гетерогенность с точки зрения активности и характера поведения различных агентов. Существенное значение в процессе проектирования архитектуры МАС имеет анализ предполагаемого жизненного цикла как системы в целом, так и отдельных ее составляющих. Задача рационального проектирования МАС в целом является достаточно сложной и многофакторной, однако использование методов многовариантной интеграции позволяет достичь эффективности в рамках применяемых подходов проектирования.

### Литература

1. Benjamin Hirsch, Thomas Konnerth, and Axel Hessler. Merging Agents and Services — The JIAC Agent Platform, In Multi-Agent Programming (editors: Amal El Fallah Seghrouchni, Jürgen Dix, Mehdi Dastani, and Rafael H. Bordini), Springer 2009.

2. Tristan Behrens, Jürgen Dix, and Koen Hindriks. The Environment Interface Standard for Agent-Oriented Programming — Platform Integration Guide and Interface Implementation Guide, Department of Informatics, Clausthal University of Technology, Technical Report IfI-09-10 2009.

3. Mikko Berggren Ettiienne, Steen Vester, and Jørgen Villadsen. Implementing a Multi-Agent System in Python, In Multi-Agent Programming Contest 2011, Technical Report, to appear.

4. Проектирование корпоративных информационных систем / А.А. Рындин, А.В. Хаустович, Д.В. Долгих,

А.И. Мугалев, С.В. Сапегин; под ред. А.А. Рындины. Воронеж: Изд-во Кварта, 2003. 447 с.

5. Executing SOA: A Practical Guide for the Service-Oriented Architect: Norbert Bieberstein, Robert G. Laird, Keith Jones, Tilak Mitra, IBM Press, 2008, P. 24.

Поступила 28.09.2018; принята к публикации 22.11.2018

#### Информация об авторах

**Рындин Никита Александрович** - канд. техн. наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: hrimfaxi@icloud.com, тел. +7 (960) 126-00-03

**Сапегин Сергей Владимирович** - канд. техн. наук, доцент кафедры программирования и информационных технологий, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: svsapegin@mail.ru

## RATIONALIZATION OF ARCHITECTURAL DESIGNING OF MULTI-AGENT SYSTEMS BASED ON MULTI-VARIANT INTEGRATION

N.A. Ryndin<sup>1</sup>, S.V. Sapegin<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** the article discusses the features of the design problem of multi-agent systems architecture. The main and additional sets of models are identified within the framework of the general approach to their design, taking into account the life cycle of these systems and their components. A general form of the problem is formulated for a set of agents and components of multi-agent systems. Taking into account the fact that the task of synthesizing a rational architecture of multi-agent systems is quite laborious, and is associated with a large number of calculations and uncertainties, the solution of this problem is considered from the point of view of the multivariate integration apparatus. The process of finding rational variants on the basis of the formulated general structure of the multivariate optimization model is considered. As a basis for a numerical solution, we propose a scheme for restricting the diversity of sets in the framework of the multivariate integration process. The principles of decomposition of the general solution are proposed to reduce the complexity of the task of finding rational options. In addition to the stages of logical design, we give the technical stages of the design of multi-agent systems. The implementation of the architecture of the software subsystems of the information system in this paradigm is proposed based on the SOA methodology. The approach allows one to achieve increased efficiency in the framework of the applied design methods

**Key words:** distributed corporate information systems, intelligent design, construction of corporate information systems

#### References

1. Hirsch B., Konnerth T., Hessler A. "Merging agents and services - the JIAC agent platform, in multi-agent programming", Springer, 2009.
2. Behrens T., Dix J., Hindriks K. "The environment interface standard for agent-oriented programming — platform integration guide and interface implementation guide", Department of Informatics, Clausthal University of Technology, *Technical Report IfI-09-10*, 2009.
3. Berggren Ettiienne M., Vester S., and Villadsen J. "Implementing a multi-agent system in python, in multi-agent programming contest 2011", *Technical Report*, 2011
4. Ryndin A.A., Khaustovich A.V., Dolgikh D.V., Mugalev A.I., Sapegin S.V. "Design of corporate information systems" ("Proektirovanie korporativnykh informatsionnykh system"), Voronezh, Kvarта, 200, 447 p.
5. Bieberstein N., Laird R. G., Jones K., Mitra T. "Executing SOA: a practical guide for the service-oriented architect", IBM Press, 2008, 240 p.

Submitted 28.09.2018; revised 22.11.2018

#### Information about the authors

**Nikita A. Ryndin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: hrimfaxi@icloud.com, tel.: + 7 (960) 126-00-03

**Sergey V. Sapegin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: svsapegin@mail.ru

УДК 621.362

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРНОГО  
МОДУЛЯ КОЛЬЦЕВОЙ ГЕОМЕТРИИ****О.В. Калядин, К.Г. Королев****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** разработана универсальная математическая модель для определения эксплуатационных характеристик термоэлектрических генераторных модулей с произвольной геометрией кольцевых термобатарей. В качестве объекта моделирования был использован термоэлектрический модуль, состоящий из 7 генераторных термобатарей кольцевого типа. В качестве материалов для ветвей термоэлементов были использованы сплавы с р-типом проводимости ( $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_{3,2}$  с добавкой 0,06 % (масс.) Pb) и с n-типом проводимости ( $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$  с добавкой 0,24 % (масс.)  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), полученные методом горячего прессования, для которых были известны температурные зависимости термоЭДС, коэффициента теплопроводности и электропроводности. Для математического описания применяется система, включающая балансовые уравнения модуля; уравнения, устанавливающие связь между тепловыми потоками, КПД, электрической мощностью, генерируемым током, напряжением и сопротивлением внешней нагрузки; выражения, определяющие электрическое сопротивление модуля и полную его теплопроводность между горячим и холодным спаями; уравнения теплопроводности для всех вспомогательных слоев батарей. Результаты моделирования приведены в виде графических зависимостей влияния сопротивления внешней нагрузки на тепловые потоки и температуры спаев по горячей и холодной стороне, КПД и вырабатываемую электрическую мощность, рабочий электрический ток и напряжение. Представлена вольт-амперная характеристика модуля и зависимость генерируемой мощности от рабочего тока

**Ключевые слова:** моделирование, термоЭДС, термоэлектрический генератор, термобатарея кольцевой геометрии, стационарный процесс

**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**

Термоэлектричество является достаточно сложным и специфичным направлением в современной науке и технике и в настоящее время имеет большие перспективы развития. Термоэлектрические системы обладают рядом достоинств, однако низкая энергетическая эффективность зачастую не позволяет им конкурировать с традиционными устройствами генерации электрической энергии. Процессы, происходящие в термоэлектрических системах, характеризуются тесной связью тепловых и электрических явлений, наличием множества нелинейных параметров, по-своему влияющих на режимы работы устройств. Поэтому в начале разработки термоэлектрического устройства целесообразно

уделить особое внимание моделированию протекающих в нем физических процессов, поскольку таким образом можно оценить оптимальные геометрические и рабочие характеристики системы.

**Описание объекта моделирования**

В качестве объекта моделирования использовался термоэлектрический генераторный модуль, состоящий из 7 батарей кольцевого типа (рис. 1). Основным несущим элементом отдельной батареи является керамическая внутренняя втулка толщиной 2 мм, выполненная из  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

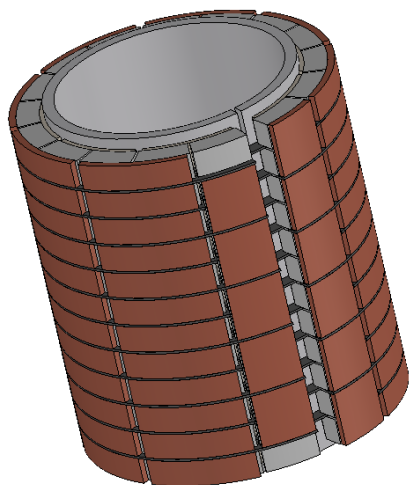


Рис. 1. Термоэлектрическая генераторная батарея

Керамическая втулка размещается на металлической трубе толщиной 3,5 мм, по которой циркулирует горячий теплоноситель. Для улучшения теплового контакта поверхность керамической втулки с обеих сторон покрывается слоем (~ 0,15 мм) кремнийорганической термостойкой эмали марки «Эмаль зеленая КО-89». Для снятия температурных напряжений втулка имеет продольный разрез.

На внутренней втулке снаружи размещаются термоэлементы. Отдельные ветви термоэлементов выполнены в виде чередующихся дугообразно согнутых брусков р- и n-типа высотой по направлению тока 5 мм и толщиной 5,8 мм. Коммутация ветвей осуществляется с помощью бимсовых ребер. Отдельные ветви р- и n-типа с помощью коммутационных шин образуют кольцо радиусом по горячей стороне 28 мм, размещаемое на внутренней втулке. Всего в кольце размещается 16 ветвей на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Также как и втулка, кольцо имеет разрыв для снятия температурных напряжений, ширина которого составляет 5 мм. Соединение ветвей с коммутационными шинами осуществляется с помощью пайки. С внутренней стороны (горячей) коммутационные шины выполнены из никелевых пластин толщиной 1 мм, с внешней (холодной) – из медных толщиной 1,5 мм.

Число ветвей в кольце, внутренний и наружный его диаметры, габаритные размеры ветвей, в принципе, могут быть различными и определяются в ходе проектного расчета. По-

скольку каждый из перечисленных параметров влияет на остальные, наиболее оптимальная конфигурация может быть получена после создания математической модели всей батареи и проведения численного эксперимента с целью определения требуемых энергетических характеристик.

На поверхности ветвей под коммутацию сформирован барьерный защитный слой (~ 0,3 мм), препятствующий диффузии материала шины в материал ветви, а также обеспечивающий высокие адгезионные свойства. Этот слой может формироваться как на этапе прессования ветви, так и на этапе совместного прессования коммутационных шин и ветвей термоэлементов, а также может быть получен путем напыления. Барьерный слой выполняется из таких материалов, как никель и молибден.

Для электроизоляции колец относительно друг друга при сборке батареи между ними устанавливаются прослойки из стеклотекстолита толщиной 0,5 мм.

Количество колец в батарее, в принципе, может быть любым в зависимости от требуемой ее мощности. На рис. 1 показана батарея, состоящая из 12 колец. Электрическое соединение отдельных колец осуществляется с помощью парусообразных пластин, выполненных из того же материала, что и коммутационные шины по холодной стороне, то есть из меди.

Снаружи на батарею надевается внешняя керамическая втулка толщиной 2,5 мм, выполняющая роль изолятора и теплопровода между коммутацией и внешним кожухом холодного теплообменника. Тепловое сопряжение батареи, внешних втулки и кожуха обеспечивается с помощью эласила (толщина слоя ~ 0,15 мм).

Из отдельных батарей, соединенных последовательно по электрическому току и размещенных на одном термосифоне, собирается генераторный модуль. Снаружи батареи закрываются стальным кожухом толщиной 2 мм.

Схема термоэлектрической батареи в поперечном сечении показана на рис. 2. Здесь также приведены обозначения радиусов внутренних и наружных поверхностей отдельных слоев и обозначения температур между ними.

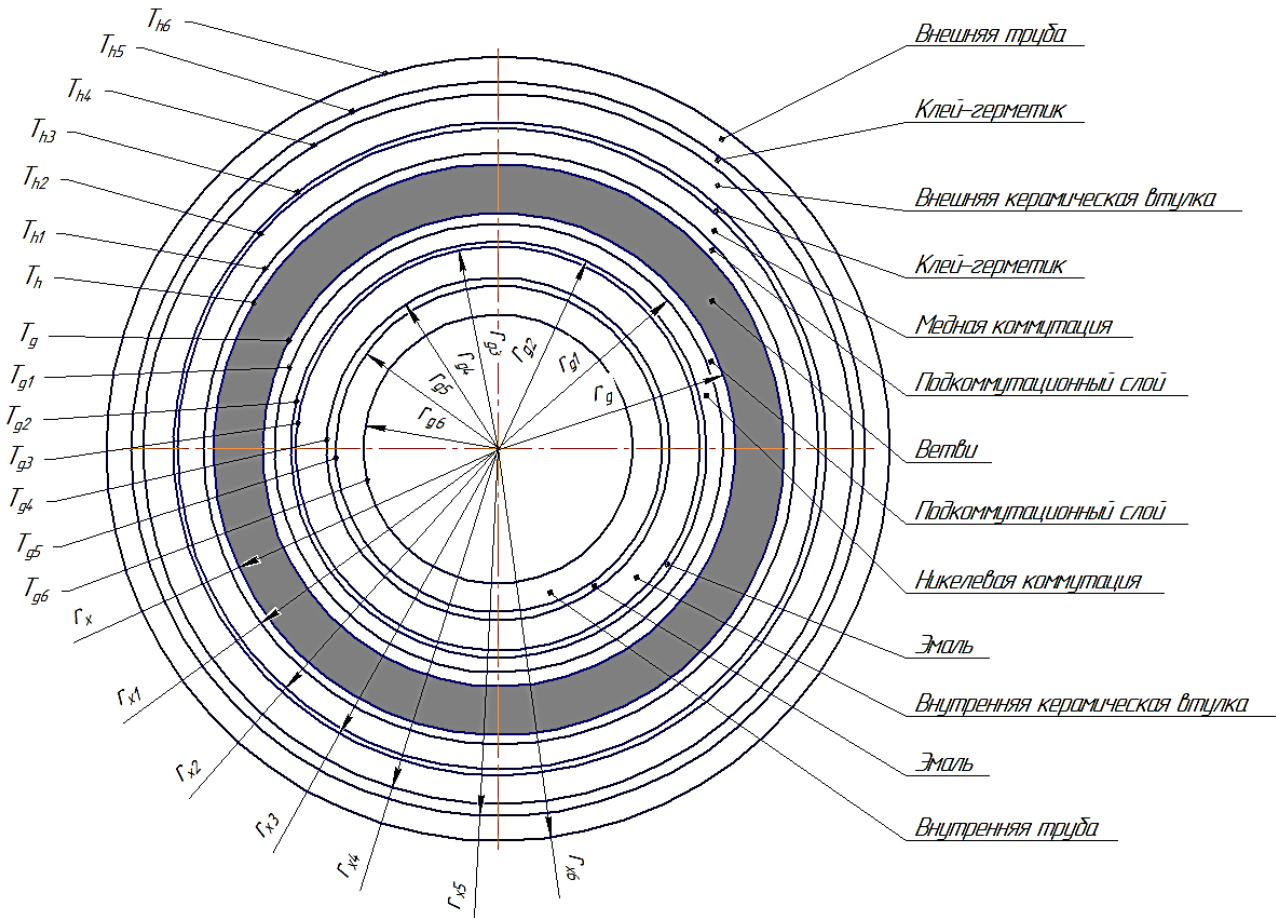


Рис. 2. Схема термоэлектрической батареи

В качестве материалов для ветвей термоэлементов используются сплавы на основе твердых растворов халькогенидов висмута и сурьмы:

- сплав с р-типом проводимости -  $\text{Bi}_{0,5}\text{Sb}_{1,5}\text{Te}_{3,2}$  с добавкой 0,06 % (масс.) Pb, полученный методом горячего прессования;
- сплав с n-типом проводимости -  $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,6}\text{Te}_{2,4}$  с добавкой 0,24 % (масс.)  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , полученный методом горячего прессования.

Температурные зависимости термоэлектрических и теплофизических свойств используемых полупроводниковых материалов были аппроксимированы полиномами третьей и четвертой степени, в результате чего были получены следующие выражения для материалов р- и n-типа, соответственно:

- температурная зависимость термоЭДС:

$$\alpha_p(T) = 1,77 \cdot 10^{-4} - 1,39 \cdot 10^{-6} \cdot T + 6,36 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 - 7,16 \cdot 10^{-12} \cdot T^3, \quad (1)$$

$$\alpha_n(T) = -2,1 \cdot 10^{-4} + 5,06 \cdot 10^{-7} \cdot T - 4,49 \cdot 10^{-10} \cdot T^2 - 2,7 \cdot 10^{-12} \cdot T^3 + 3,89 \cdot 10^{-15} \cdot T^4, \quad (2)$$

- температурная зависимость электропроводности:

$$\sigma_n(T) = 590383,84 - 3176,46 \cdot T + 8,13 \cdot T^2 - 0,01 \cdot T^3 + 5,44 \cdot 10^{-6} \cdot T^4, \quad (3)$$

$$\sigma_p(T) = 470775,89 - 1743,9 \cdot T + 2,32 \cdot T^2 - 0,001 \cdot T^3; \quad (4)$$

- температурная зависимость теплопроводности:

$$\lambda_p(T) = 5,9 - 0,03 \cdot T + 6 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 4,34 \cdot 10^{-8} \cdot T^3, \quad (5)$$

$$\lambda_n(T) = 1,98 - 0,005 \cdot T + 2,41 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 5,05 \cdot 10^{-9} \cdot T^3. \quad (6)$$

### Описание модели

При разработке математической модели генераторного модуля, работающего в стационарном режиме на заданную нагрузку, были приняты некоторые допущения, в частности: не учитывался теплообмен с окружающей сре-

дой, принималось, что градиент температур направлен нормально к поверхности модуля, а также, что джоулево тепло распределяется поровну между холодным и горячим спаями. В основу модели легли следующие соотношения:

- балансовые уравнения спаев модуля;
- уравнения, устанавливающие связь между тепловыми потоками, КПД, электрической мощностью, генерируемым током, напряжением и сопротивлением внешней нагрузки;

- выражения, определяющие электрическое сопротивление модуля и полную его теплопроводность между горячим и холодным спаями;

- уравнения теплопроводности для всех вспомогательных слоев батарей.

Балансовые уравнения спаев модуля с учетом общего количества термоэлементов  $N_e$  имеют вид:

$$Q = \bar{\alpha} \cdot T_g \cdot I \cdot N_e - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_m + K_m \cdot (T_g - T_h), \quad (7)$$

$$Q_0 = \bar{\alpha} \cdot T_h \cdot I \cdot N_e + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_m + K_m \cdot (T_g - T_h), \quad (8)$$

$$\bar{\alpha} = \alpha_n + \alpha_p, \quad (9)$$

где  $Q$  и  $Q_0$  – тепловые потоки по горячей и холодной сторонам, соответственно;  $T_g$  и  $T_h$  – температуры горячего и холодного спая термоэлектрических батарей;  $I$  – сила генерируемого тока;  $R_m$  – электрическое сопротивление модуля;  $K_m$  – полная теплопроводность его ветвей;  $\bar{\alpha}$  – дифференциальная термоЭДС.

Энергетический баланс генераторного модуля в целом можно записать как

$$Q_0 = Q - W. \quad (10)$$

Тогда электрическая мощность модуля, подводимая к внешней нагрузке, сопротивлением  $R_H$  равна

$$W = \bar{\alpha} \cdot (T_g - T_h) \cdot I - I^2 R_m = IU = I^2 R_H, \quad (11)$$

где  $U$  – напряжение, создаваемое на внешней нагрузке.

Основным параметром, характеризующим энергетическую эффективность любого генератора, является КПД.

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (12)$$

Электрическое сопротивление модуля можно представить как сумму из сопротивлений последовательно соединенных ветвей  $R_v$ , коммутационных шин  $R_{sh}$  и контактного сопротивления. Сопротивление одной ветви, имеющей форму сектора кольца, в общем виде запишется как

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \rho \cdot \frac{1}{S(r)} dr, \quad (13)$$

где  $r_1$  – внутренний радиус кольца,  $r_2$  – наружный радиус кольца,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала ветви,  $S(r)$  – площадь поверхности ветви, пронизываемая током, как функция радиуса.

Решая интеграл, получаем окончательное выражение для сопротивления ветви

$$R = \frac{\rho \cdot n}{2\pi \cdot \delta} \cdot \ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}, \quad (14)$$

где  $n$  – число ветвей в кольце,  $\delta$  – толщина ветви,  $f$  – ширина компенсационного шва,  $s$  – шаг между ветвями,  $r_x$  и  $r_g$  – радиус ветви по холодной и горячей сторонам.

В конструкции батарей используются три вида коммутационных шин: никелевые по горячей стороне (тип 1) и медные по холодной стороне (тип 2) для коммутации ветвей в кольцо, а также медные по холодной стороне для коммутации колец (тип 3).

Общее сопротивление коммутационных шин можно записать следующим образом (индекс в обозначениях величин определяется типом ветвей):

$$R_{sh} = \frac{1}{3} \cdot \left[ \rho_{shg} \frac{l_{sh1}}{S_{sh1}} N_{sh1} + \rho_{shx} \frac{l_{sh2}}{S_{sh2}} N_{sh2} + \rho_{shx} \frac{l_{sh3}}{S_{sh3}} N_{sh3} \right], \quad (15)$$

где  $\rho_{shg}$  и  $\rho_{shx}$  – удельное электрическое сопротивление материала шин по горячей и холодной сторонам,  $l_{sh}$  и  $S_{sh}$  – длина и площадь поперечного сечения шин по направлению движения тока,  $N_{sh}$  – число шин соответствующего типа.

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления медной и никелевой коммутации, соответственно, может быть записана в виде

$$\rho_{shx} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot T_g - 293), \quad (16)$$

$$\rho_{shg} = 8,7 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot T_g - 293). \quad (17)$$

В выражении (15) учитывается тот факт, что поскольку коммутационные шины впаяны не в торец, а внахлест относительно ветвей, учитывать полное их сопротивление нельзя. Действительное сопротивление коммутации  $R_{sh}$  будет меньше и в соответствии с [1] составляет 30 % от полного.

Помимо коммутационных шин дополнительное сопротивление вносят контактные площадки, образованные припоем и подкоммутационным слоем. Общее число таких площадок составляет  $4N_e$ . Толщины (по току) таких площадок по горячей стороне составляют  $h_{g1}$ , по холодной -  $h_{x1}$ . Общее контактное сопротивление для контактных площадок термоэлектрических ветвей всего модуля составит

$$R_k = 2\rho_k N_e \cdot \left[ \frac{h_{g1}}{2\pi r_g - (n-1) \cdot s - f} \cdot \frac{1}{n} + \frac{h_{x1}}{2\pi r_x - (n-1) \cdot s - f} \cdot \frac{1}{n} \right], \quad (18)$$

где  $\rho_k$  – удельное электрическое сопротивление контактной площадки.

Учитывая, что в состав модуля входит  $N_e$  ветвей р – типа и столько же ветвей п – типа, полное электрическое сопротивление модуля можно записать следующим образом

$$R_m = \left[ \frac{1}{\sigma_n} \cdot \frac{n}{2\pi \cdot \delta} \cdot \ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g} + \frac{1}{\sigma_p} \cdot \frac{n}{2\pi \cdot \delta} \cdot \ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g} \right] \cdot N_{ee} + R_{sh} + R_k. \quad (19)$$

Теплопроводность модуля (по радиусу) складывается из теплопроводности ветвей  $K_v$  и изоляции между ними  $K_{из}$ . Полная теплопроводность одной ветви имеет вид

$$K = \frac{2\pi \cdot \delta \cdot \lambda}{n} \cdot \frac{1}{\ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}}. \quad (20)$$

Теплопроводность тепловой изоляции, заполняющей пространство между ветвями и имеющей площадь поперечного сечения  $S_{из}$  определяется выражением

$$K_{из} = \frac{\lambda_{из} \cdot S_{из}}{h}, \quad (21)$$

$$S_{из} = [s \cdot (n-1) \cdot \delta + f \cdot \delta] \cdot N_k + \left[ s \cdot (n-1) + f + \frac{n}{2} \cdot a_p + \frac{n}{2} \cdot a_n \right] \cdot \Delta \delta \times (N_k - 1). \quad (22)$$

где  $h$  – высота ветви,  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности изоляции,  $N_k$  – число колец в модуле,  $a_p$  и  $a_n$  – длина ветвей р- и п-типа по среднему радиусу.

Теплопроводность всего модуля с учетом всех ветвей и изоляции между ними

$$K_m = \left[ \frac{2\pi \cdot \lambda_n}{\delta \cdot n} \cdot \frac{1}{\ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}} + \frac{2\pi \cdot \lambda_p}{\delta \cdot n} \times \frac{1}{\ln \frac{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_x}{f+(n-1) \cdot s - 2\pi \cdot r_g}} \right] \cdot N_e + K_{из}. \quad (23)$$

Выражения, определяющие теплопроводность вспомогательных слоев термобатарей, могут быть получены из уравнения теплопроводности цилиндрической стенки, которое в общем виде также может быть получено из закона Фурье. В общем виде с учетом рис. 2 и ранее введенных обозначений уравнения теплопроводности вспомогательных слоев по горячей и холодной сторонам запишутся следующим образом (промежутками между коммутационными шинами и подкоммутационными слоями ввиду их малости пренебрегаем):

$$Q = \frac{2\pi \cdot H \cdot \lambda_{g(i)}}{\ln \frac{r_{g(i)}}{r_{g(i-1)}}} \cdot (T_{g(i)} - T_{g(i-1)}), \quad (24)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot H \cdot \lambda_{x(j)}}{\ln \frac{r_{x(j)}}{r_{x(j-1)}}} \cdot (T_{h(j)} - T_{h(j-1)}), \quad (25)$$

где  $i$  и  $j$  – номера вспомогательных слоев по горячей и холодной сторонам в соответствии с рис. 2.

Среднеинтегральные значения (в общем виде обозначим через  $y$ ) термоэлектрических и теплофизических свойств материалов ветвей  $y(T)$  в интервале температур от  $T_h$  до  $T_g$  можно определить по общей формуле

$$y = \frac{\int_{T_h}^{T_g} y(T) dT}{T_g - T_h}. \quad (26)$$

Таким образом, в основе математической модели, описывающей работу генераторного термоэлектрического модуля в стационарном режиме, лежит система, образованная уравнениями (7-12, 19, 23) и дополненная выражениями вида (24-26).

Величинами, относительно которых при заданном тепловом потоке по горячей стороне будет вестись решение в полученной системе, являются:  $Q_0, I, R_m, K_m, \eta, W, U, R_n, T_g, T_{g1}, T_{g2}, T_{g3}, T_{g4}, T_{g5}, T_h, T_{h1}, T_{h2}, T_{h3}, T_{h4}, T_{h5}, \bar{\alpha}, \alpha_n, \alpha_p, \sigma_n, \sigma_p, \lambda_n, \lambda_p$ . Температуры на внешней и внутренней поверхностях модуля являются величинами заданными, температура греющей среды составляет 573 К, охлаждающей – 343 К. Решение полученной системы проводилось с помощью системы компьютерной алгебры Mathcad.

Для численного решения подобных систем в Mathcad применяется специальный вычислительный блок Given/Find, состоящий из трех частей, идущих последовательно друг за другом:

- блок начальных приближений, в котором всем переменным расчетной системы уравнений присваиваются значения, близкие к ожидаемым в результате точного решения;
- Given - ключевое слово;
- система, записанная логическими операторами в виде равенств;
- Find ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) — встроенная функция для решения системы уравнений относительно независимых переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

В результате решения мы получаем массив, число элементов которого определяется числом независимых переменных. Здесь необходимо отметить, что решение системы возможно также в символьном виде, в случае если значение какой-либо величины из блока исходных данных не задано. Тогда уже после вычислительного блока данная величина может быть определена и как константа, и как массив данных. В последнем случае решением системы будет матрица чисел. Таким образом, мы имеем возможность анализировать влияние изменения какого-либо исходного параметра на расчетные значения и, возможно, определять его оптимальную величину, соответствующую наилучшим рабочим характеристикам модуля.

### Результаты моделирования

Для демонстрации возможностей модели был выполнен анализ влияния сопротивления внешней нагрузки на эксплуатационные характеристики термоэлектрического модуля.

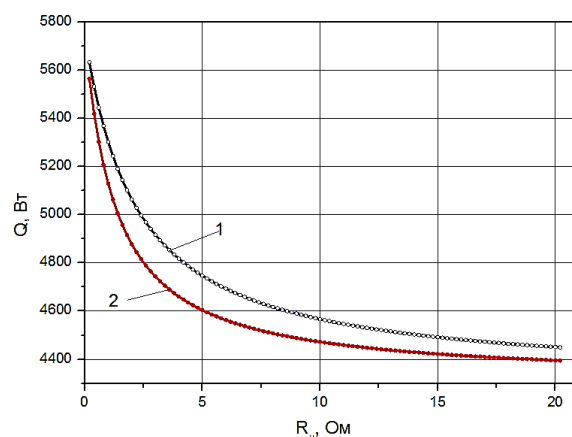


Рис. 3. Влияние сопротивления внешней нагрузки на тепловые потоки модуля (1 – по горячей стороне, 2 – по холодной стороне)

На рис. 3–5 показаны графические зависимости, полученные в результате вычислений по разработанной модели и отражающие зависимость рабочих параметров термоэлектрического модуля (тепловой поток по холодной и по горячей сторонам, рабочий ток и напряжение модуля, КПД, электрическая мощность, а также температуры спаев) от сопротивления внешней нагрузки, которое варьировалось в интервале от 0,2 до 20,2 Ом. На рис. 6 показана вольт-амперная характеристика модуля и зависимость выходной электрической мощности от величины рабочего тока.

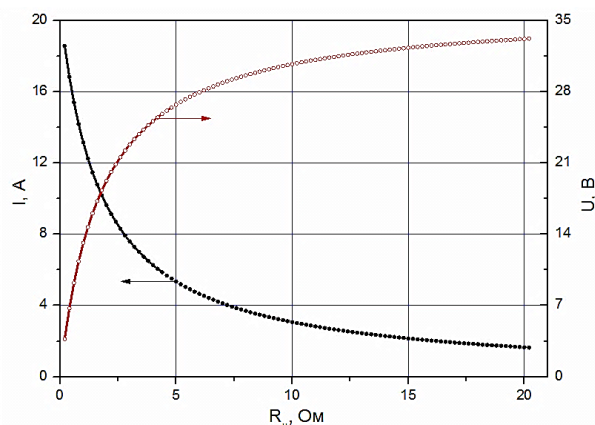


Рис. 4. Влияние сопротивления внешней нагрузки на рабочий ток и напряжение модуля



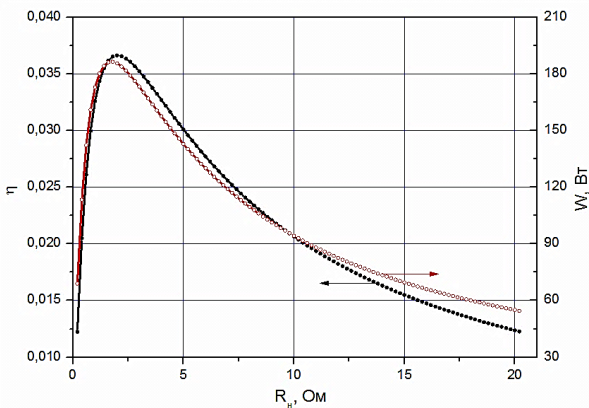


Рис. 5. Влияние сопротивления внешней нагрузки на КПД генераторного модуля и на вырабатываемую электрическую мощность

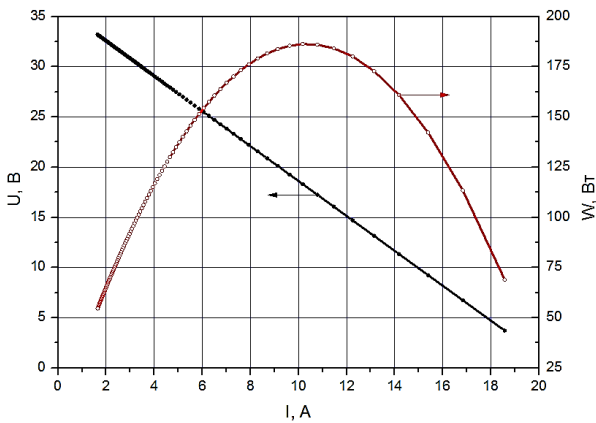


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика термоэлектрического модуля и зависимость генерируемой мощности от рабочего тока

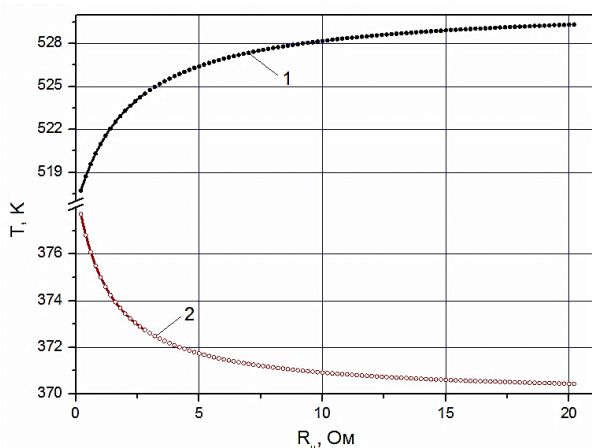


Рис. 7. Влияние сопротивления внешней нагрузки на температуры спаев (1 – горячий спай, 2 – холодный спай)

Из рисунков видно, что тепловые потоки по горячей и холодной сторонам, а также рабочий ток модуля с увеличением сопротивления нагрузки уменьшаются. КПД модуля и вырабатываемая им мощность имеют максимум при определенном значении сопротивления, причем максимальный КПД достигается при работе на нагрузку  $\sim 2$  Ом, а максимальная электрическая мощность при сопротивлении нагрузки  $\sim 1,8$  Ом (рабочий ток, соответственно 9,6 и 10,2 А). Температура горячего спае при увеличении нагрузки в рассмотренном диапазоне возрастает с 517,7 до 529,3 К, тогда как температура холодного снижается с 377,7 до 370,4 К. Данные расчета хорошо согласуются с результатами испытаний генераторного модуля.

### Заключение

Таким образом, на основе инженерно-физических соотношений термоэлектрического анализа была разработана универсальная математическая модель, использование которой позволяет описать установившийся процесс работы и определить эксплуатационные характеристики генераторных модулей любой мощности, состоящих из произвольного количества кольцевых батарей с любой геометрией ветви, а также анализировать влияние изменения внешних условий работы на рабочие параметры модуля. Кроме того, данная модель может быть использована как эффективный инструмент проверочного расчета при проектировании генераторных модулей на основе кольцевых термоэлектрических батарей, также она позволяет определять выходные характеристики разрабатываемого модуля и уточнять температуры спаев, которые на этапе проектного расчета обычно задаются.

### Литература

1. Методы расчета термоэлектрических генераторов / О.В. Марченко, А.П. Кашин, В.И. Лозбин и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 222 с.

Поступила 30.10.2018; принята к публикации 06.11.2018

### Информация об авторах

**Калядин Олег Витальевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kaljadin@gmail.com

**Королев Константин Геннадьевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: korolev.kg@mail.ru

## MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMOELECTRIC GENERATOR MODULE OF ANNULAR GEOMETRY

**O.V. Kalyadin, K.G. Korolev**

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

**Abstract:** a universal mathematical model was developed for determining the performance characteristics of thermoelectric generator modules with an arbitrary geometry of a annular thermopile. A thermoelectric module consisting of 7 generator thermopiles of the annular type was used as an object for modeling. As materials for branches of thermoelements, alloys with p-type conductivity ( $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_{3.2}$  with the addition of 0.06% (mass.) Pb) and with n-type conductivity ( $\text{Bi}_2\text{Se}_{0.6}\text{Te}_{2.4}$  with the addition of 0.24% (mass.)  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), obtained by hot pressing, for which the temperature dependences of thermoEMF, thermal conductivity and electrical conductivity were known. For the mathematical description, a system is used that includes the balance equations of the module; equations that establish a relationship between heat flux, efficiency, electrical power generated by the current, voltage and resistance of an external load; expressions that determine the electrical resistance of the module and its full thermal conductivity between hot and cold junctions; heat conduction equations for all auxiliary layers of batteries. The simulation results are presented in the form of graphical dependencies of the influence of external load resistance on heat fluxes and junction temperatures on the hot and cold side, efficiency and generated electrical power, operating electric current and voltage. The current-voltage characteristic of the module and the dependence of the generated power on the operating current are presented

**Key words:** modeling, thermal emf, thermoelectric generator, thermobattery of annular geometry, stationary process

**Acknowledgements:** the work was done with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the Resolution of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010. No. 218 (Contract No. 03.G25.31.0246)

### References

1. Marchenko O.V., Kashin A.P., Lozbin V.I. et al. "Methods of calculation of thermoelectric generators" ("Metody raschyeta termoelektricheskikh generatorov"), Novosibirsk, Nauka. Siberian book-publishing firm RAS, 1995, 222 p.

Submitted 30.10.2018; revised 06.11.2018

### Information about the authors

**Oleg V. Kalyadin**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kaljadin@gmail.com

**Konstantin G. Korolev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: korolev.kg@mail.ru

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.И. Борисова, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются результаты анализа тепловых процессов для повышения стойкости к спецфакторам и увеличения ресурса электротехнических комплексов, предназначенных для работы в условиях открытого космоса в составе аппаратуры негерметичного исполнения, как основы реализации интерактивных алгоритмов топологического и конструктивно-модульного проектирования такого агрегата. При этом обсуждаются вопросы математического моделирования тепловых процессов интегрированного конструктива при ограниченных объемах конфигурации в объективную среду с оптимизацией массораспределения, тепловых потоков и теплоконструктивных соотношений при его разработке. Определена проблема специфических особенностей тепловых процессов при тепловых потоках в распределенных электротехнических комплексах механотронного исполнения с цифровым управлением, под агрессивию глубокого вакуума и невесомости, при широтно-импульсной модуляции на несущей частоте в контуре «контроллерный электронный преобразователь - исполнительный электромеханический узел – интегрированная конструкция», с учетом того, что их опорная кинематика для условий открытого космоса с вакуумом и солнечным излучением, ограниченной тепловой передачей требует более совершенных конструкций в контексте наиболее сложных разделов теории «прочность-трение» с компромиссом по категориям охлаждения, износостойкости, прочности вибростойкости и др. с обеспечением ресурсной характеристики и долговечности

**Ключевые слова:** тепловые процессы, ресурс, открытый космос, негерметичное исполнение, интегрированная конструкция

### Введение

Современные электротехнические комплексы (ЭК) автоматического управления различными системами передвижных наземных установок, летательных аппаратов и объектов космического базирования, при точности выполнения ими заданных программ, регламентируются уровнями соответствия частоты вращения и качества динамических характеристик параметрам задающего воздействия. Развитие таких систем идет по пути совершенствования исполнительных механизмов, которые тесно увязывают между собой конструктивные приемы, обеспечивающие стойкость к дестабилизирующим факторам (внешнее температурное воздействие, пониженное давление космоса, собственная вибростойкость, радиационная и электрическая мощность и т.д.), и интенсифицируют тепловой обмен.

### Методика исследования

Из литературных источников известно, что количественное значение тепловой постоянной определяется габаритами ЭК и его конструктивным исполнением.

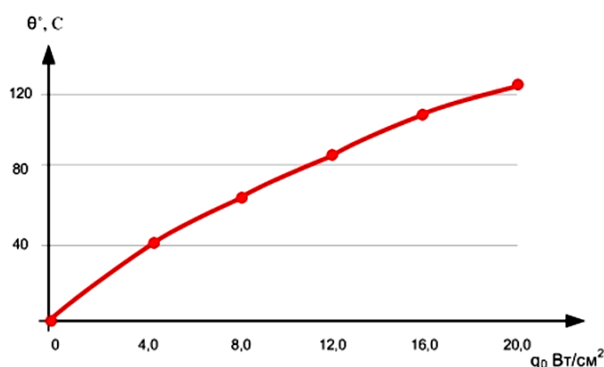


Рис. 1. Зависимость перегрева корпуса от теплового потока внутри изделия

Конвекционное (воздушное) охлаждение потоками сопровождается тепловыми градиентами, при которых, кроме температуры и внутренней архитектуры изделия, его эффективность определяется площадью и качеством поверхности внешних стенок и корпуса с практической зависимостью (рис. 1) (т.е. до 0,25 Вт/см<sup>2</sup>).

Однако разряжение существенно снижает эффект от конвекции согласно зависимости (рис. 2), с доведением до уровня охлаждения измерением  $q_{03} \leq 0,3q_{01}$  с суммарным эффектом теплозащиты конструкции, выраженным соотношением [1]:

$$\sum q_{\theta} = q_{\theta 1} + 0,3q_{\theta 2} + 0,4q_{\theta 3} \quad (1)$$

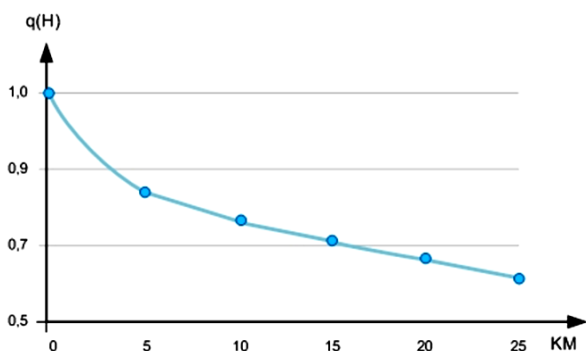


Рис. 2. Зависимость теплопередачи от высоты над уровнем моря

При создании такого ЭК с эксплуатационными условиями глубокого вакуума, невесомости и отсутствием конвекции необходимая эффективность интеллектуальной составляющей интенсифицируется развитием совместимых тепловых методов проектирования, основанных на подходах математического моделирования по всему спектру механотронной системотехники, учитывающей следующее критическое единство:

- гетерогенность в составе интегрированного электромагнитно совместимого конструктива на основе электротехнических представлений совершенствования рациональных приемов матмоделирования с эффективными алгоритмами цифрового (микроконтроллерного) управления по вектору состояния, обеспечивающих решение аналитических и прикладных задач позиционирования и защитных функций на программном уровне;

- резкое (в три раза) повышение гарантийной наработки (срока службы) составных частей комплекса с синергическим эффектом принципов оптимизации по критериям надежности и экстремумом линейных ограничений (в пределах технических нормативов), эксплуатационной стойкости, ресурсу при методологической формализации уровней диагностики и ускоренных испытаний в подтверждение качества ЭК;

- методологическая концепция теплового проектирования на основе «конструктивного-энергетического-теплофизического» балансов, в факторе единства организации теплообмена, при резком снижении возможностей конвекционного охлаждения и развития приемов потокового излучения, с матмоделированием процесса теплопередачи по неоднородной конфигурации (локальным координатам) моноблока. Такое двумерное распределение температурных полей (с алгоритмом расщепления по пространственным координатам неявной разностной схемы) предполагает на финишном этапе проектирова-

ния совмещение в конструктиве стойкости по всем факторам обеспечения надежности.

Проектная организация данного ЭК ориентирована под перспективные особенности их функционально-эксплуатационного роста на основе микросистемных многоядерных конструкций разнофизического плана, совмещенных с блоком источника питания и преобразователя квазисинусоидального сканирования результирующего вектора при концентрации все больших удельных мощностей за счет рациональной системосхемотехники при оптимальном распределении суммарных потерь, компенсируемых методами теплопроводности и теплового излучения, способных в десятки раз интенсифицировать тепловой обмен за счет интеграционно-конструктивных достижений с использованием покрытия из материалов повышенной теплопроводности, эффективность которых подтверждается математическим моделированием тепловых потоков при интерактивном варианте экспериментального подтверждения эксплуатационными условиями вакуума [2].

Улучшение условий отвода тепла в космосе достигается путем увеличения площади и качества отработки излучающей (радиационной) поверхности с покрытиями, выбора теплопроводного материала для корпусов, создания дополнительных теплоотводов, имея в виду, что уже при давлении ниже  $10^{-8}$  кгс/см<sup>2</sup> теплопроводность становится пренебрежительно малой и отвод тепла от ЭМТ в окружающую среду происходит преимущественно излучением.

Для *i*-го нелокализованного источника тепла дифуравнение среднеинтегральной температуры имеет вид:

$$[c \cdot m]_{ЭК} \frac{\partial T_{ЭК}}{\partial t} = Q_{ЭК} + [\alpha \cdot F]_{ЭК} [T_{ЭК} - T_K], \quad (2)$$

где *c* и *m* – удельные теплоемкость и масса составляющих ЭК;

$\alpha$  и *F* – коэффициент теплопередачи от составляющих ЭК, К;

$T_K$  и  $T_{ЭК}$  – температура на корпусе КА и ЭК.

Последнее произведение соотношения определяет суммарное количество тепла, передаваемое излучением сверх температуры корпуса.

Процесс нагревания ЭК можно разделить во времени на две стадии: стадию неупорядоченного процесса и стадию регулярного режима. Первая из них характеризуется сильным влиянием на температурное поле ЭК его начального теплового состояния. Температурное поле ЭК, в том числе и поверхностная температура, зависят от коэффициента теплоотдачи [3].

## Выводы

Анализ таких исследований позволит определить температурное поле ЭК, с учетом детальной информации о конструкции, мощностях тепловыделения и теплоемкости. Это связано с необходимой компенсацией тепловой напряженности, прежде всего, электронной составляющей, ограничиваемой возможностями теплоизлучающих процессов в вакуум-климатических условиях эксплуатации, при учете недопускаемости воздействий этих факторов на проблемное поле такого ЭК с учетом внутреннего энергетического баланса в структурах электромеханика-электроника.

## Литература

1. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Математическая модель процесса взаимного теплообмена в электромеханотронных механизмах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 87-89.
2. Научно технический отчет «Разработка высокоресурсных бесконтактных электродвигателей постоянного тока со встроенным контроллером управления для работы в условиях глубокого вакуума». Шифр ОКР «Привод-13». № госрегистрации У93688. г. Воронеж. 2015. С. 10.
3. Борисова А.И. Теплорациональные режимы ЭМТД типа ДБ КВ Д-21-48 в негерметизированных комплексах КА // Мир механотроники. 2017. № 6. С. 106.

Поступила 24.10.2018; принята к публикации 06.11.2018

## Информация об авторах

**Борисова Алина Игоревна** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alinka\_borisova93@mail.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

## ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES WITHIN ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH THE USE OF MATHEMATICAL MODELLING

A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article discusses the results of the analysis of thermal processes to increase the resistance to special factors and the increase of resource of electrical systems designed for operation in open space as part of the equipment unsealed execution, as the basis for implementing interactive algorithms for topological and structural and modular design of this unit. At the same time it discusses the mathematical modeling of thermal processes of integrated structural elements with limited amounts of configuration in the facility environment with the optimization of mass transfer, heat flow and heat constructive ratios in its development. The article identifies the problem of specific features of thermal processes at heat fluxes in a distributed electrotechnical complexes of vacuum tube performance with digital control, aggression under high vacuum and zero gravity, when the pulse-width modulation at the carrier frequency in the loop "controller electronic converter - the executive electromechanical node - integrated structure", given the fact that their reference kinematics for open space vacuum and solar radiation, limited heat transfer requires more sophisticated designs to the most complicated sections of the theory of "strength - friction" with the compromise category cooling, wear-resisting, strength of vibration qualities, etc. with the provision of resource characteristics and durability

**Key words:** thermal processes, resource, outer space, untight execution, integrated design

## References

1. Borisov A.I., Burkovskiy V.L. "Mathematical model of process of mutual heat exchange in electromechanotronic mechanisms", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 87-89.
2. Scientific technical report "Development of high-resource contactless electric motors of a direct current with the built-in controller for work in the conditions of a deep vacuum", code of ROC "Drive-13", State registration no. U93688, Voronezh, 2015, 10 p.
3. Borisov A.I. "Heatrational modes of EMTD of DB KV D-21-48 type in the KA unpackaged complexes", *The world of a mehanotronics (Mir mekhanotroniki)*, 2017, no. 6, 106 p.

Submitted 24.10.2018; revised 06.11.2018

## Information about the authors

**Alina I. Borisova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alinka\_borisova93@mail.ru

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

## ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

А.Ю. Писаревский, Т.Е. Черных, А.В. Тикунов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** вопрос развития альтернативной электроэнергетики в нашей стране является весьма актуальной задачей. Благодаря географическим особенностям расположения у нас есть условия для использования многих технологий на основе возобновляемых источников энергии (гелиоэнергетика, малая гидроэнергетика, ветроэнергетика). Одной из самых перспективных по энергетическим показателям является ветроэнергетика. Однако на сегодняшний день в российской ветроэнергетике имеется ряд проблем, препятствующих ее развитию. Эти проблемы связаны с тем, что многие десятилетия в нашей стране использование экологически чистых возобновляемых источников энергии считалось экономически нецелесообразным, в связи с чем на начало двухтысячных годов у нас не оказалось конструкций установок, основанных на современных электротехнических устройствах, новых типах ветроколес и т.п. Одной из таких проблем является отсутствие серийных специализированных генераторов для ветроэнергетических установок российского производства, которые обладали бы высокими надежностью и энергетическими показателями, большим сроком эксплуатации, простой конструкцией при низкой себестоимости. На сегодняшний день большинство генераторов, которые разработчики ветроэнергетических установок вынуждены использовать, либо машины общепромышленного назначения, либо иностранного производства. В этой связи предлагается конструкция генератора, который может быть использован в вертикально-осевой ветроэнергетической установке

**Ключевые слова:** синхронный генератор, постоянные магниты, обмотка якоря, магнитная система

### Введение

Повысить показатели надёжности ветроэнергетической установки предполагается посредством использования новой конструкции источника электропитания на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Надёжность генератора определяется, по сути, надёжностью функционирования обмотки якоря, которая должна иметь минимальное число пересечений проводников, что возможно при выполнении фазовой обмотки с одновитковыми секциями. Кроме этого надёжное функционирование опор может быть обеспечено за счёт магнитного подвеса ротора генератора, который позволяет разгрузить применяемые подшипники от осевых усилий. Применение подобных механизмов является идеальным решением, обеспечивающим надёжную и безопасную эксплуатацию технологического оборудования [1]. При эксплуатации автономных систем электроснабжения одной из важных задач является накопление энергии внутри системы, которое обеспечивает работоспособность системы при пиковых нагрузках. Целесообразно совместить в одной машине функции генератора электрической энергии и маховика – механического накопителя энергии.

### Постановка задачи

Задачей разработки нового электрогенератора является исследование электромагнитных процессов, протекающих в электрической машине при большом числе полюсов ( $2p \geq 8$ ) и высокой частоте тока ( $f = 500 \dots 900$  Гц). Применение высококоэрцитивных магнитов на основе композиции Nd Fe В предопределяет рассмотрение генераторов с гладким и полым якорем. Именно в оптимизации активной зоны генератора просматривается основное направление пути достижения высоких технико-экономических показателей.

Поскольку для питания аппаратуры требуется вентильный генератор, позволяющий осуществлять электроснабжение на постоянном токе, то необходимо максимально уменьшить пульсации выпрямленного напряжения и улучшить качество выходной энергии за счёт правильно выбранных параметров генератора. Все основные требования к вентильным генераторам, которые определяют их конструкцию, сводятся к следующим положениям [2].

1. Генератор должен иметь мощную демпферную систему и малое значение индуктивного сопротивления рассеяния.

2. Число витков в фазе должно быть минимальным. В идеале секции должны быть одновитковыми. С уменьшением числа витков уменьшаются значения индуктивных сопротив-

лений, угол коммутации и величина пульсаций напряжения.

3. Генераторы должны быть многополюсными ( $2p \geq 8$ ). Однако выбор большого числа полюсов ограничивается следующими факторами: а) возможностью выполнения магнитной цепи с большим числом полюсов; б) допустимой частотой тока по условию надёжной работы полупроводниковых ключей. Предельная частота тока 1000 Гц, а оптимальная частота тока 500...900 Гц [2, 3].

4. Падение напряжения на полупроводниковом ключе не должно превышать 0.5 В. Большие значения падения напряжения приводят к значительным потерям в электронном блоке, что является ограничивающим фактором при разработке вентильных генераторов повышенной мощности.

Реализуя последовательно данные положения, можно однозначно определить все необходимые размеры генератора. Получение электроэнергии высокого качества на протяжении длительного времени предопределяет беззубчатую конструкцию якоря.

Далее осуществляется следующий алгоритм расчёта: определяется расчётная мощность генератора  $P$ , Вт [2]; определяется фазное значение тока  $I_{\phi}$ , А; сечение проводников  $q_M$  можно определить по допустимой плотности тока и в результате получить величину немагнитного зазора; по величине немагнитного зазора однозначно определяется оптимальная толщина магнита и максимальное значение индукции в воздушном зазоре  $B_m$ ; число полюсов ограничено условием оптимальной частоты тока  $f_{\text{опт}} = 900$  Гц [2, 3]. На основе теоретических и опытных данных установлено [2, 3], что существуют оптимальные значения  $\lambda_1 = L / D$  ( $L$  – активная длина и  $D$  – диаметр якоря) и  $\lambda_2 = L / \tau$  ( $\tau$  – полюсное деление), которые являются функциями числа пар полюсов.

Таким образом, интерес представляет конструкция генератора с гладким якорем. В этой машине (рис. 1) шихтованный сердечник якоря 3 с трёхфазной обмоткой 4, вынесенной в воздушный зазор, закреплён в корпусе машины 5. Сердечник якоря 3 и трёхфазная обмотка 4 закрыты герметично подшипниковыми щитами 11. Ротор 2, установленный на валу 9, вращается в подшипниках 13 и 14.

Подшипники 13 и 14 установлены в подшипниковых щитах 11, которые закреплены в корпусе 5. Ротор 2 состоит из индукторного колеса 20, на ободке которого расположены магни-

ты 8. С внешней стороны магниты закрыты медной оболочкой 6, которая выполняет роль демпферной обмотки. По торцам колеса расположены балансировочные шайбы 7, которые герметично закрывают магниты 8. Таким образом, основные элементы генератора защищены от внешних воздействий окружающей среды.

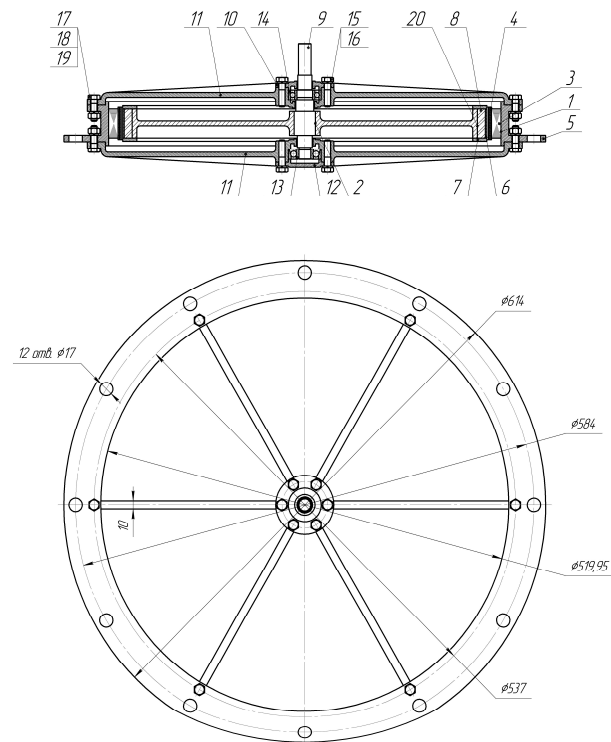


Рис. 1. Внешний вид генератора

### Расчет параметров генератора

Важнейшими специфическими вопросами проектирования вентильных генераторов с постоянными магнитами являются: выбор типа генератора и схемы выпрямления; определение расчетной выпрямленной мощности, фазного тока и напряжения, расчетной мощности генератора, основных размеров генератора; проектирование обмотки якоря; учета реакции якоря; расчет индуктивных сопротивлений, в том числе и индуктивных сопротивлений коммутации; построение векторной диаграммы напряжений и подсчет потерь, расчет характеристик [2].

При определении расчетной выпрямленной мощности необходимо учитывать наличие преобразовательных устройств, имеющих в схеме электроснабжения. В простейшем случае, когда генератор непосредственно питает потребителей, расчетная выпрямленная мощность равняется

$$P'_d = U'_d \cdot I_d, \quad (1)$$

где  $U'_d$  – выпрямленное напряжение с учетом потери напряжения в полупроводниковых ключах, В;  $I_d$  – постоянный ток в А.

$$U'_d = U_d + 2\Delta U_\partial. \quad (2)$$

Расчетная мощность генератора на стороне переменного тока

$$P' = m \cdot k_E \cdot k_n \cdot U'_d \cdot I_d \cdot k_i \cdot k_{U_\phi}, \quad (3)$$

где  $m$  – число фаз;  $k_E$  – коэффициент ЭДС ( $k_E = E_v/U_\phi$ );  $k_n$  – коэффициент, учитывающий дополнительные потери от высших гармонических составляющих магнитного поля;  $k_i$  – коэффициент искажения токов ( $k_i = 0,97 \dots 0,987$ );  $k_{U_\phi}$  – коэффициент искажения напряжений ( $k_{U_\phi} = 0,995 \dots 0,98$ ).

Расчетная мощность позволяет определить величину выпрямленного тока

$$I_d = \frac{P'}{m \cdot k_E \cdot k_n \cdot U'_d \cdot k_i \cdot k_{U_\phi}}. \quad (4)$$

По величине тока  $I_d$  можно определить значение фазного тока

$$I_\phi = I_d \cdot k_i. \quad (5)$$

Ток  $I_d$  позволяет определить сечение провода  $q_M$  и выбрать ближайший стандартный провод ( $a \times b = q_{MCT}$ ).

В свою очередь, ширина провода  $b$  позволяет определить необходимую минимальную длину окружности якоря  $L_{amin}$ .

$$L_{amin} = (b_0 + a_0) \cdot N/n_c, \quad (6)$$

где  $b_0$  – ширина провода, мм;  $a_0$  – расстояние между проводами, мм;  $n_c$  – число слоёв обмотки;  $N$  – число активных проводников обмотки якоря.

$$N = m \cdot 2p. \quad (7)$$

Число активных проводников  $N$  определяется из условия, что число витков в фазе равно числу полюсов генератора. Активные проводники располагаются в два слоя в условных па-

зах статора  $Z_{ya}$  (якорная обмотка вынесена в воздушный зазор и закреплена на поверхности статора)

$$Z_{ya} = 2p \cdot m \cdot q, \quad (8)$$

где  $q$  – число пазов на полюс фазу ( $q = 1$ ).

Таким образом, уравнение (5) позволяет определить минимальный диаметр обмотки якоря, который равен

$$D_{ai} = \frac{(b_0 + a_0) \cdot N/n_c}{\pi}. \quad (9)$$

Размещение якорной обмотки в зазоре позволяет выполнить её различными способами. Секции обмотки одновитковые и могут быть изготовлены из стандартного медного провода путём формовки на специальном шаблоне (рис. 2). Активные проводники обмотки могут быть выполнены штамповкой или выкроены из медной электротехнической фольги.

При размещении проводников шириной  $b_0$  наиболее плотная укладка получается в лобовой части обмотки, а в активной зоне якоря между проводниками появляется зазор  $a_0$ , который зависит от угла наклона проводников  $\alpha$  в лобовой части

$$a_0 = b_0 \cdot \left( \frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right). \quad (10)$$

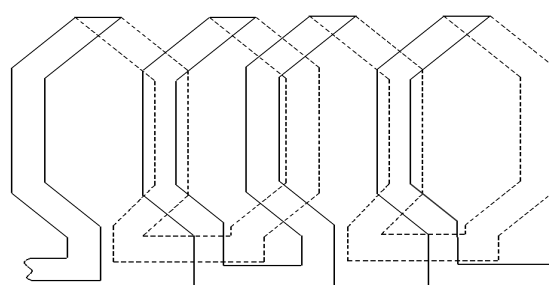


Рис. 2. Схема обмотки якоря

Для определения требуемой длины окружности якоря и соответствующего диаметра удобно определить величину  $H_0 = a_0 + b_0$ .

$$H_0 = a_0 + b_0 = \frac{b_0}{\sin \alpha}. \quad (11)$$

Толщина стандартного провода ( $a_0$ ) позволяет определить величину немагнитного зазора



$$\delta_{\text{нм}} = \delta_{\text{ма}} + 2 \cdot a_0 + \delta_{\text{до}} + \delta, \quad (12)$$

где  $\delta_{\text{та}}$  – немагнитный зазор между проводниками верхнего и нижнего слоя якоря;  $\delta_{\text{до}}$  – толщина демпферной оболочки индуктора;  $\delta$  – воздушный зазор между обмоткой якоря и индуктором.

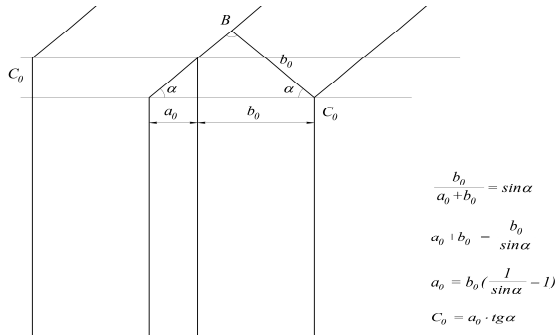


Рис. 3. Фрагмент обмотки якоря

По величине немагнитного зазора можно определить предварительно высоту магнита на основе следующего уравнения [5, 7].

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot H_c \cdot B_r}{\mu_0 \cdot H_c + B_r \cdot \lambda_{\text{нм}}}, \quad (13)$$

где  $B_m$  – индукция в магните, Тл;  $H_c$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;  $B_r$  – остаточная индукция, Тл;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\lambda_{\text{нм}}$  – соотношение между величиной немагнитного зазора  $\delta_{\text{нм}}$  и высотой постоянного магнита ( $\lambda_{\text{нм}} = \delta_{\text{нм}} / h_m$ ).

$$\lambda_{\text{нм}} = \frac{\mu_0 \cdot (B_r - B_m) \cdot H_c}{B_r \cdot B_m} \quad (14)$$

Величину  $\lambda_{\text{нм}}$  можно определить предварительно из условия максимума энергии постоянного магнита. Высота постоянного магнита находится по известной величине немагнитного зазора ( $h_m = \delta_{\text{нм}} / \lambda_{\text{нм}}$ ).

Минимальный диаметр обмотки якоря  $D_{\text{аи}}$  позволяет определить все остальные размеры, связанные с ним.

Расчётное сечение фазного провода

$$q_M = \frac{I_\phi}{J_d}, \quad (15)$$

где  $J_d$  – допустимое значение плотности

тока в проводниках якоря, А/мм<sup>2</sup>.

По расчётному сечению фазного провода необходимо определить ближайшее стандартное сечение провода  $q_{\text{МС}} = a_0 \times b_0$ .

Величина  $b_0$  позволяет определить величину  $H_0$  в соответствии с (11) и число условных пазов генератора, которое при одновитковых секциях будет равно

$$Z_{ya} = \frac{\pi \cdot D_{\text{аи}}}{H_0} \quad (16)$$

Расчётное число пар полюсов должно соответствовать числу условных пазов  $Z$

$$p = \frac{Z_{ya}}{2 \cdot m \cdot q}. \quad (17)$$

Очевидно, что необходимо принять ближайшее целое число  $p$  и уточнить число условных пазов  $Z$  и ширину проводника  $b_0$ .

Число активных проводников якоря при двухслойной обмотке  $N = 2 \cdot Z_{ya}$ , число проводников в фазе  $N_\phi = N / m$  и число витков в фазе  $W_\phi = N_\phi / 2$ .

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{\text{аи}}}{2p} \quad (18)$$

Рабочий магнитный поток

$$\Phi_0 = B_{\text{ср}} \cdot \tau \cdot L_a, \quad (19)$$

где  $B_{\text{ср}}$  – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл;

$L_a$  – активная длина якоря, м.

Среднее значение магнитной индукции связано с максимальным значением  $B_m$  посредством коэффициента полюсного перекрытия  $\alpha$  ( $\alpha = B_{\text{ср}} / B_m$ ). При синусоидальном распределении индукции  $\alpha = 2 / \pi = 0,637$ . Соответственно, получаем

$$\Phi_0 = \alpha \cdot B_m \cdot \tau \cdot L_a, \quad (20)$$

ЭДС фазы

$$E_\phi = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot \Phi_0 \cdot W_1 \cdot k_{\text{об}}, \quad (21)$$

где  $f$  – частота ( $f = n/p/60$ ), Гц;  $\Phi_0$  – рабо-

чий магнитный поток, Вб;  $W_1$  – число последовательно включённых витков фазы;  $k_{об}$  – обмоточный коэффициент. С учётом того, что обмотка имеет одновитковые секции ( $W_1 = 2 \cdot p$ ), получаем

$$E_{\phi} = 4,44 \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot \Phi_0 \cdot 2 \cdot p \cdot k_{об}. \quad (22)$$

После преобразования выражения (22) получаем

$$E_{\phi} = 0,148 \cdot n \cdot p^2 \cdot \Phi_0 \cdot k_{об}. \quad (23)$$

Подставляя в уравнение (23) выражения (18) и (19), получаем

$$E_{\phi} = 0,148 \cdot n \cdot p \cdot \lambda_1 \cdot D_{ai}^2 \cdot B_m \cdot k_{об}, \quad (24)$$

где  $\lambda_1$  – соотношение между активной длиной якоря  $L_a$  и  $D_{ai}$  ( $\lambda_1 = L_a / D_{ai}$ ).

На основе уравнения (24) можно получить требуемое значение  $\lambda_1$

$$\lambda_1 = \frac{E_{\phi}}{0,148 \cdot n \cdot p \cdot D_{ai}^2 \cdot B_m \cdot k_{об}}. \quad (25)$$

Толщина магнитопровода индуктора

$$\Delta_{mni} = \frac{\Phi_0}{2 \cdot L_a \cdot B_{cd1}}, \quad (26)$$

где  $B_{cd1}$  – допустимое значение индукции в стали магнитопровода индуктора.

Толщина шихтованного магнитопровода якоря

$$\Delta_{mni} = \frac{\Phi_0}{2 \cdot L_a \cdot B_{cd2} \cdot k_{эс}}, \quad (27)$$

где  $B_{cd1}$  – допустимое значение индукции в стали магнитопровода индуктора.

Проектирование магнитной системы с постоянными магнитами связано с выбором типа и марки постоянного магнита, а также с определением конфигурации и размеров магнита в магнитной системе. При этом должно обеспечиваться получение заданного по величине магнитного поля в рабочей области магнитной системы при наилучшем использовании материала постоянного магнита [4–7]. Однородно

намагниченный постоянный магнит имеет только одну точку на кривой размагничивания  $B(H)$ , которая соответствует максимуму энергетического произведения  $B_d \cdot H_d$ . Геометрия магнитной системы, обеспечивающая максимум энергетического произведения  $B_d \cdot H_d$ , соответствует оптимальному использованию материала постоянного магнита [7].

Однако в большинстве практических случаев магнит оказывается намагниченным неоднородно и его магнитное состояние не может характеризоваться одной точкой на кривой размагничивания. В любом случае, степень использования материала постоянного магнита можно оценить с помощью коэффициента использования материала  $K_{им}$ , который равен отношению магнитной энергии в рабочем зазоре магнитной системы к максимально возможной магнитной энергии магнита данного объёма [4]

$$K_{им} = \frac{B_p \cdot H_p \cdot V_p}{B_d \cdot H_d \cdot V_M}, \quad (28)$$

где  $B_p$  и  $H_p$  – соответственно, магнитная индукция и напряжённость поля в рабочем (немагнитном) зазоре;  $V_p$  – объём рабочего (немагнитного) зазора;  $V_M$  – объём магнита.

С учётом того, что  $H_p = B_p / \mu_0$ , получаем

$$K_{им} = \frac{B_p^2 \cdot V_p}{\mu_0 \cdot B_d \cdot H_d \cdot V_M} \quad (29)$$

При моделировании магнитного поля в поперечном сечении магнитной энергии (плоский случай 2D) необходимо учитывать, что  $V_p = F_p \cdot L_p$  и  $V_M = F_M \cdot L_M$ , где  $F_p$  и  $F_M$  – соответственно, поперечное сечение рабочего зазора и постоянного магнита, а также  $L_p$  и  $L_M$  – соответственно, длина рабочего зазора и постоянного магнита, которые равны. Таким образом, получаем

$$K_{им} = \frac{B_p^2 \cdot F_p}{\mu_0 \cdot B_d \cdot H_d \cdot F_M}. \quad (30)$$

Из уравнений (28 – 30) следует, что коэффициент использования материала  $K_{им}$  постоянного магнита можно представить как отношение магнитного потока в рабочем зазоре  $\Phi_p$  к магнитному потоку магнита  $\Phi_M$ , работающему в точке с максимальной магнитной энергией [4]. При моделировании магнитного поля в

плоском случае магнитные потоки рассчитывают на единицу длины в виде  $\Phi_{p*}$  (Вб/м) и  $\Phi_{M*}$  (Вб/м), следовательно,

$$K_{им} = \frac{\Phi_{p*}}{\Phi_{M*}}. \quad (31)$$

Очевидно, что для дальнейших исследований целесообразно рассмотреть следующие виды критериев, непосредственно связанные с уравнениями 28 – 31.

Критерий, определяющий максимум момента машины

$$D_1 = \frac{\Phi_{p*} \cdot F_{H3}}{\Phi_{M*} \cdot F_M}, \quad (32)$$

где  $F_{H3}$  – поперечное сечение немагнитного зазора, мм<sup>2</sup>;

$F_M$  – поперечное сечение постоянного магнита, мм<sup>2</sup>.

Критерий, определяющий максимум магнитной энергии в немагнитном зазоре машины,

$$D_2 = \frac{\Phi_{p*}^2 \cdot F_{H3}}{\Phi_{M*}^2 \cdot F_M}. \quad (33)$$

Величина немагнитного зазора генератора складывается из толщины медной оболочки, играющей роль демпферной обмотки, воздушного зазора и толщины обмоточного слоя якоря.

Для определения оптимальной геометрии магнитной системы генератора исследуем поведение критериев  $D_1$  и  $D_2$  в зависимости от соотношения между величиной немагнитного зазора  $\delta_{H3}$  и высотой постоянного магнита  $h_M$

$$\lambda = \frac{\delta_{H3}}{h_M}. \quad (34)$$

Результаты расчётов сведены в таблицу.

Результаты исследований изображены на рис. 4 – 8.

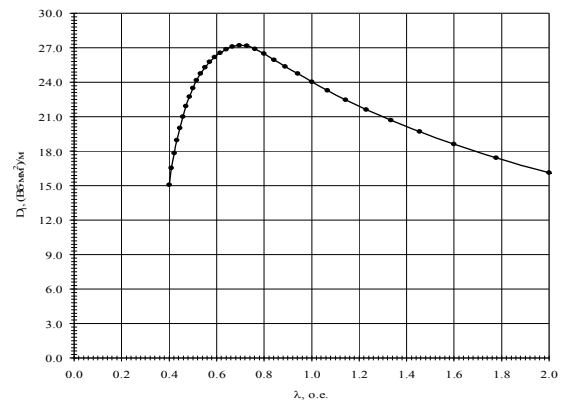


Рис. 4. Изменение критерия  $D_1$  при увеличении  $\lambda$ . Функция достигает максимума при  $\lambda = 0,6957$

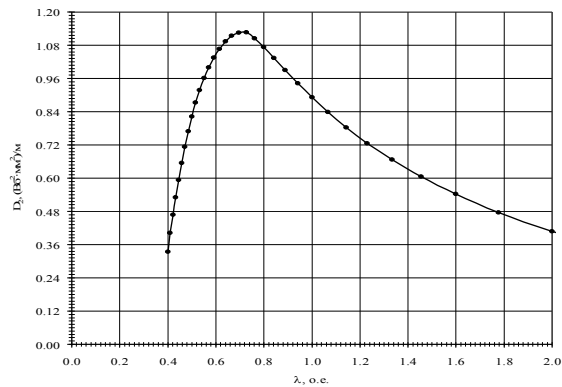


Рис. 5. Изменение критерия  $D_2$  при увеличении  $\lambda$ . Функция достигает максимума при  $\lambda = 0,7273$

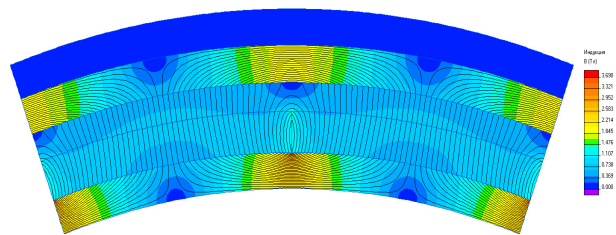


Рис. 6. Распределение магнитного поля фрагмента магнитной системы генератора при максимальном значении критерия  $D_1$  ( $\lambda = 0,6957$ )

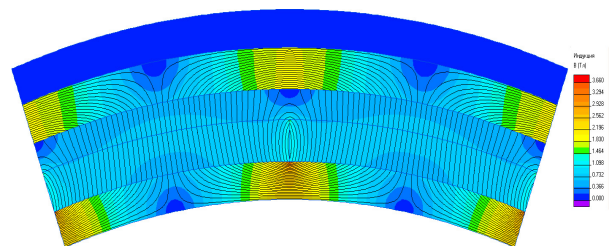


Рис. 7. Распределение магнитного поля фрагмента магнитной системы генератора при максимальном значении критерия  $D_2$  ( $\lambda = 0,7273$ )

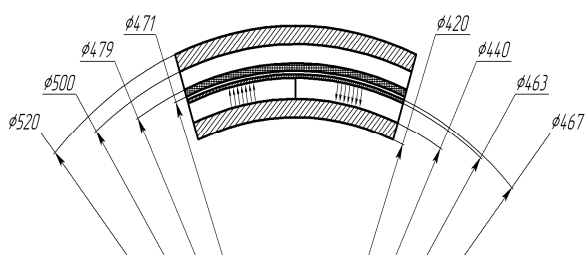


Рис. 8. Фрагмент магнитной системы с оптимальными размерами: высота магнита  $h_M = 11.5$  мм; величина немагнитного зазора  $\delta_{нз} = 8$  мм; толщина внешнего магнитопровода  $\delta_{мпе} = 10.5$  мм; толщина внутреннего магнитопровода  $\delta_{мпв} = 10$  мм

Особенностью работы генератора на выпрямленную нагрузку является периодический несимметричный переходной процесс, связан-

ный с переключением полупроводниковых ключей выпрямителя. Таким образом, генератор находится в некотором квазиустановившемся режиме. Непрерывно повторяющиеся короткие замыкания двух фаз во время коммутации чередуются с несимметричной нагрузкой в межкоммутационном интервале [2]. При этом величина напряжения на выходе генератора не остаётся постоянной. Выпрямленная нагрузка является нелинейной и приводит к возникновению несинусоидальных напряжений и токов якоря. Несинусоидальный ток фаз генератора приводит к специфическому проявлению реакции якоря. В связи с этим возрастает расчётная электромагнитная мощность вентильного генератора, и возникают добавочные потери в роторе и статоре [3].

Определение оптимального соотношения  $\lambda$  (марка магнита НмБ 250/240,  $B_r = 1.2$  Тл,  $H_{св} = 850000$  А/м)

№ п/п	$h_M$ , мм	$F_{M 1/18}$ , мм <sup>2</sup>	$F_{н.з 1/18}$ , мм <sup>2</sup>	$W_{н.з}$ , Дж	$W_M$ , Дж	$\Phi$ , Вб/м	$\Phi \cdot F_{н.з 1/18}$ , (Вб·мм <sup>2</sup> )/м	$\Phi^2 \cdot F_{н.з 1/18}$ , (Вб·мм <sup>2</sup> )/м	$W_{н.з} / W_M$ , о.е.	$\lambda$ , о.е.
1	10.0	785.398	653.451	79.6480	128.2100	0.0405210	26.478488	1.072935	0.621231	0.8000
2	10.5	825.584	654.848	81.9860	138.6100	0.0410710	26.895262	1.104615	0.591487	0.7619
3	11.0	865.858	656.244	83.7790	148.7200	0.0414210	27.182283	1.125917	0.563334	0.7273
4	11.5	906.219	657.640	84.6750	158.0100	0.0413620	27.201306	1.125100	0.535884	0.6957
5	12.0	946.667	659.036	84.9340	166.6400	0.0411130	27.094947	1.113955	0.509686	0.6667
6	12.5	987.202	660.433	84.7760	174.8000	0.0406900	26.873019	1.093463	0.484989	0.6400

Исследования формы кривых напряжений и токов показывают, что в режимах, близких к номинальным, кривые фазных напряжений и токов содержат пятую гармоническую величину порядка 10 – 20% и седьмую гармоническую порядка 7 – 14% [3]. Длительность коммутации нагруженного выпрямителя, выраженную в электрических градусах, называют углом коммутации  $\gamma$ . Значение угла коммутации является функцией тока нагрузки  $I_d$  и параметров генератора в цепи выпрямления [3]

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{m_2}{2\pi} \cdot \frac{x_k \cdot I_d}{U_{d0}} \right), \quad (35)$$

где  $m_2 = 2m$  – для нечётного числа фаз ( $m = 3$ );  $x_k$  – индуктивное сопротивление фазы при коммутации.

Практически значение угла  $\gamma$  определяется выражением [2, 3]

$$\frac{tg^2 \gamma}{2} = \frac{3}{\pi} \cdot x_{d*}'' , \quad (36)$$

где  $x_{d*}''$  – относительное значение сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси ( $x_{d*}'' = x_d'' \cdot I_d / U_d$ ).

В рассматриваемом случае трёхфазный генератор имеет мощный симметричный демпфер в виде сплошной медной трубы, закрывающей магниты индуктора. Поэтому можно принять [3]:

$$x_k = \frac{x_d'' + x_2}{2} \approx x_d'' , \quad (37)$$

где  $x_2$  – индуктивное сопротивление обмотки последовательности

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}, \quad (38)$$

где  $X_d'', X_q''$  – сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной и по поперечной оси соответственно [3].

С увеличением угла  $\gamma$  уменьшается и действующее значение тока в фазе

$$I_\phi = I_d \cdot \sqrt{\frac{2}{m} - \frac{\gamma}{3\pi}} \quad (39)$$

В регулируемом режиме вентили включаются с некоторым запаздыванием на угол  $\alpha$ . Тогда для идеального случая среднее выпрямленное напряжение равняется

$$U_d = (3\sqrt{6}/\pi) \cdot E_\delta \cdot \cos \alpha, \quad (40)$$

где  $\alpha$  – угол зажигания, т.е. угол упреждения входа вентилей в работу [3].

$$\alpha \approx \frac{\arcsin(I_d \cdot r')}{2\sqrt{2} \cdot E_\delta \cdot \sin(\pi/m)} \approx 3 \dots 6^\circ, \quad (41)$$

где  $r'$  – суммарное сопротивление фазы и вентилей, Ом;

$E_\delta$  – действующее значение фазной ЭДС обмотки якоря, определяемое потоком  $\Phi_\delta$  в воздушном зазоре, В.

В реальных условиях, когда угол коммутации  $\gamma > 0$ , за счёт коммутации период включения каждого вентилей увеличивается на угол  $\gamma$  и становится равным

$$\lambda = 2\pi/3 + \gamma, \quad (42)$$

тогда среднее значение выпрямленного напряжения равняется

$$U_d = (3\sqrt{6}/\pi) \cdot E_\delta \cdot \cos \alpha - (3/2\pi) \cdot x_\kappa \cdot I_d, \quad (43)$$

для неявнополюсного генератора

$$E_\delta = E_0 - j(x_c - x_\kappa) \cdot I \quad (44)$$

Соответствующая (44) векторная диаграмма напряжений представлена на рис. 9.

Уравнение (43) для внешней характеристики генератора справедливо лишь при усло-

вии  $\gamma \leq \pi/3$ . Более точным для описания рабочего участка внешней характеристики является выражение (45)

$$U_d = (3\sqrt{6}/\pi) \cdot E_\delta \cdot \cos \alpha - (3/2\pi) \cdot x_\kappa \cdot I_d - (2 - 3\gamma/2\pi) \cdot r_a \cdot I_d - 2 \cdot \Delta U_B \quad (45)$$

где  $r_a$  – активное сопротивление обмотки якоря, Ом;  $\Delta U_B$  – падение напряжения на вентиле.

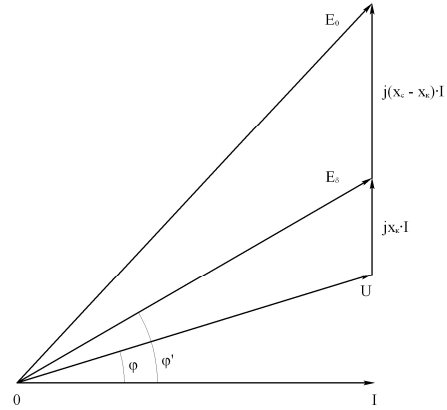


Рис. 9. Векторная диаграмма напряжений неявнополюсного генератора

Выражение (45) позволяет определить расчётное значение  $E_\delta$

$$E_\delta = A(U_d + 2\Delta U_B) + B \cdot x_\kappa \cdot I_d + C \cdot r_a \cdot I_d, \quad (46)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты, которые равны

$$A = \frac{\pi}{3\sqrt{6} \cdot \cos \alpha}, \quad (47)$$

$$B = \frac{1}{2\sqrt{6} \cdot \cos \alpha}, \quad (48)$$

$$C = \frac{4\pi - 3\gamma}{6\sqrt{6} \cdot \cos \alpha}. \quad (49)$$

При разложении кривых тока и напряжения генератора в гармонический ряд (ряд Фурье) для режима  $\gamma < \pi/3$  получаем для первых гармоник тока  $I_{\phi 1}$  и напряжения  $U_{\phi 1}$  [2] следующие уравнения:

$$I_{\phi 1} = (3/2\pi) K_1 \cdot E_\delta / x_\kappa, \quad (50)$$

$$U_{\phi 1} = K_2 \cdot E_\delta, \quad (51)$$

где

$$K_1 = \sqrt{\gamma^2 + \sin^2 \gamma - 2\gamma \cdot \sin \gamma \cdot \cos(2\alpha + \gamma)}, \quad (52)$$

$$K_2 = \sqrt{1 - (3/\pi)[\gamma - \sin \gamma \cdot \cos(2\alpha + \gamma)] + (3K_1/2\pi)^2}. \quad (53)$$

Действующие значения напряжения и тока связаны с выпрямленным напряжением  $U_d$  и током  $I_d$  через коэффициенты преобразования [2]:

$$k_{u\phi} = \frac{U_{\phi 1}}{U_d} = \frac{K_2}{1.17 \cdot [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]}, \quad (54)$$

$$k_{I\phi} = \frac{I_{\phi 1}}{I_d} = \frac{K_1}{2.56 \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha - \gamma)]}. \quad (55)$$

В практических расчётах очень удобно иметь связь между действующими значениями величин напряжения и тока на стороне переменного тока и выпрямленными значениями напряжения и тока на стороне постоянного тока. Коэффициенты преобразования позволяют построить внешнюю характеристику вентильного генератора на стороне постоянного тока  $U_d(I_d)$  по точкам внешней характеристики на стороне переменного тока  $U_{\phi 1}(I_{\phi 1})$ .

Высокий момент инерции тормозит процесс изменения частоты вращения. По сути генератор ещё является и накопителем энергии.

Выражение (45) описывает рабочий участок внешней характеристики трёхфазного вентильного генератора с мостовым выпрямителем (рис. 10) с учётом падения напряжения в активном сопротивлении обмотки якоря и падения напряжения в вентильях.

Рассматриваемый генератор представляет собой многополюсную конструкцию. При этом индуктор имеет неявнополюсную магнитную систему с мощной демпферной оболочкой в виде медной трубы. В связи с этим можно считать, что синхронные индуктивные сопротивления по осям d и q равны ( $x_d = x_q = x_c$ ).

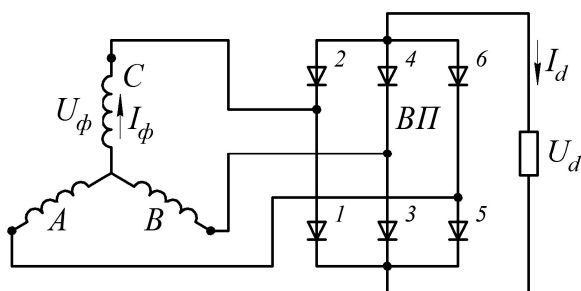


Рис. 10. Схема трёхфазного мостового выпрямителя

Для определения синхронного индуктивного сопротивления  $x_c$  при помощи метода конечных элементов (программа ELCUT) необходимо отключить постоянные магниты, т. е. установить коэрцитивную силу магнитов  $H_{cb} = 0$ . В результате получаем картину магнитного поля, представленную на рис. 11.

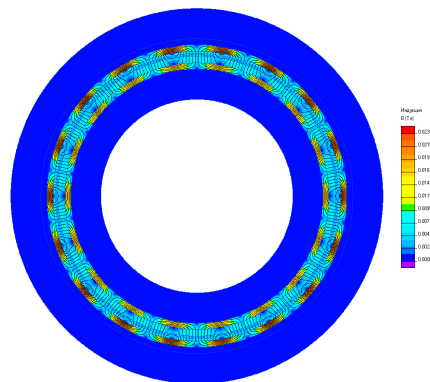


Рис. 11. Магнитное поле фазы обмотки якоря

Для определения индуктивности фазы обмотки якоря выделяем фрагмент магнитного поля (рис. 12) и одну секцию обмотки. Использование численного метода расчёта (программа ELCUT) предполагает, что ток задан только в одной из катушек и выключены все прочие источники поля. Тогда индуктивность отдельной секции будет равна

$$L = 2 \cdot W_{мп} / I^2, \quad (56)$$

где  $W_{мп}$  – энергия магнитного поля, Дж;  $I$  – ток в секции.

В соответствии с картиной магнитного поля, создаваемого фазой обмотки якоря, и в соответствии с уравнением (56) получаем

$$x_c = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot L_{\phi}, \quad (57)$$

где  $n$  – частота вращения генератора, об/мин.;  $L_{\phi}$  – индуктивность фазы, Гн.

Картина магнитного поля, соответствующая сверхпереходному режиму, представлена на рис. 13.

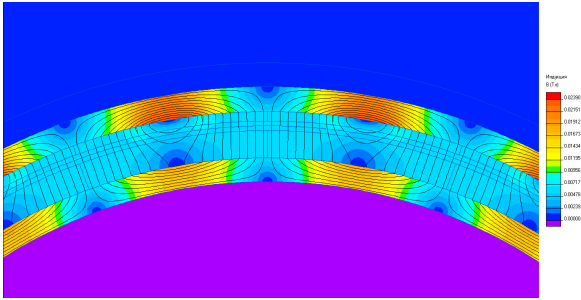


Рис. 12. К определению индуктивного сопротивления фазы

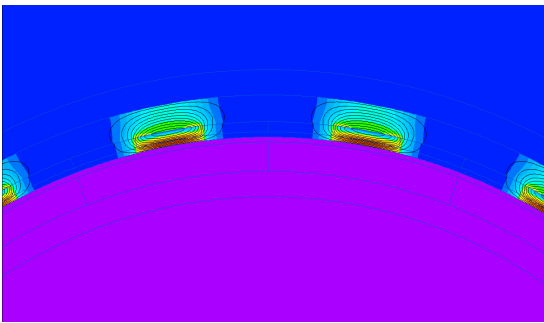


Рис. 13. К определению сверхпереходного индуктивного сопротивления

В данном режиме магнитное поле якоря не проникает через поверхность демпферной обложки, которая имеет толщину 2 мм и расположена на поверхности индуктора. Индуктивность фазы в сверхпереходном режиме также можно определить по уравнению (56), но при условии, что магнитное поле якоря не проникает в ротор (индуктор).

$$x_c'' = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n \cdot p}{60} \cdot L_\Phi'', \quad (58)$$

где  $x_c''$  – сверхпереходное синхронное индуктивное сопротивление, Ом;

$L_\Phi''$  – индуктивность фазы, соответствующая сверхпереходному режиму, Гн.

Принимая во внимание методы проектирования современных электрических машин [2], методика проектирования малогабаритного турбогенератора должна содержать два этапа: предварительный, построенный на аналитических математических моделях, и поверочный, построенный на численном моделировании электромагнитных и тепловых полей. В качестве исходных данных необходимо иметь следующие группы величин:

- параметры турбомеханизма;
- параметры генератора;

- параметры среды;
- характеристики применяемых постоянных магнитов.

Номинальный постоянный ток после выпрямления

$$I_d = \frac{P_d}{U_d}, \quad (59)$$

где  $P_d$  – задаваемая мощность генератора на стороне постоянного тока, Вт;

$U_d$  – задаваемое (номинальное) напряжение постоянного тока, В.

Внутренний диаметр обмотки якоря выбирается равным среднему диаметру генератора, поскольку толщина магнитопровода статора примерно равна толщине магнитопровода ротора (индуктора). Обмотка уложена на внутренней поверхности магнитопровода. Минимальный диаметр обмотки связан с размерами проводников, именно этот размер определяет число проводников, которые можно уложить в обмотке якоря.

Расчётное сечение фазного провода определяется величиной фазного тока и зависит от применяемой схемы выпрямления. Для уменьшения расчётной мощности генератора целесообразно выбирать двухполупериодные схемы выпрямления, обеспечивающие более благоприятное соотношение между мощностями на стороне переменного тока и на стороне выпрямленного тока. Например, схема Ларионова, которая получила наибольшее распространение в отечественных вентильных генераторах. Работа вентильных генераторов характеризуется коэффициентами преобразования: по фазному напряжению  $k_{u\phi} = U_\phi / U_d$ ; по фазному току  $k_I = I_\phi / I_d$ ; по мощности  $k_p = P / P_d$ . Для схемы Ларионова, при идеальной коммутации, имеем  $k_{u\phi} = 0.43$ ;  $k_I = 0.815$ ;  $k_p = 1.45$ .

$$q_M = \frac{k_I \cdot I_d}{J_d}, \quad (60)$$

где  $J_d$  – допустимое значение плотности тока якоря, А / мм<sup>2</sup>.

По величине  $q_M$  можно определить стандартное сечение прямоугольного провода ( $q_{Mc} = a_0 \times b_0$ ), соотношение размеров  $a$  и  $b$  зависит от технологии изготовления обмотки, но не должно быть меньше 2.

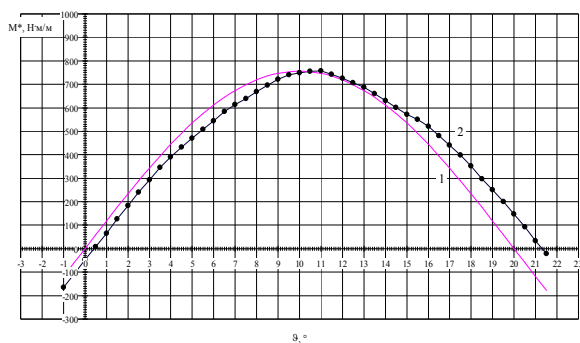


Рис. 14. Угловая характеристика генератора: 1 – теоретическая кривая; 2 – численный эксперимент

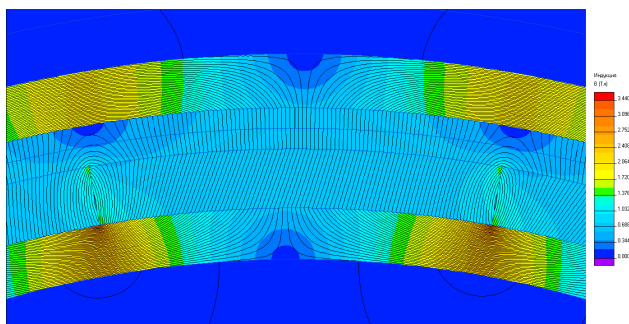


Рис. 15. Угол нагрузки  $\varphi = 0,0^\circ$  (0 эл. гр.)

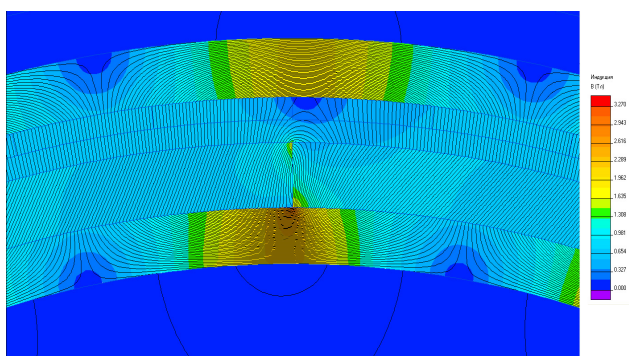


Рис. 16. Угол нагрузки  $\varphi = 10,0^\circ$  (90 эл. гр.)

## Выводы

Таким образом, предлагаемая конструкция синхронного генератора удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к генераторам для автономных источников питания.

Кроме этого, предлагаемая технология изготовления обмотки генератора исключает множественные пересечения проводников, что повышает надежность работы машины в течение срока эксплуатации (примерно 20 лет).

## Литература

1. Кононенко К.Е., Наталич А.В. Автономные генераторы со встроенной турбиной для работы внутри трубы газовой факельной установки // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: тр. Всерос. студенческой науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТУ, 2017. С. 26-27.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1982. 272 с.
3. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
4. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты: энциклопедический справочник. Т.1: Магниты и магнитные системы. СПб.: Информационно-издательское агентство «ЛИК», 2004. 358 с.
5. Постоянные магниты: справочник / А.Б. Альтман, А.Н. Герберг, П.А. Гладышев и др.; под ред. Ю.М. Пятина. 2-е изд.; перераб. и доп. М.: Энергия, 1980. 488 с.
6. Сидоров Е.В. Технические характеристики, эксплуатационные и физические свойства современных магнитных материалов и постоянных магнитов: справочник для потребителей и производителей. Владимир: Транзит – ИКС, 2006. 40 с.

Поступила 12.09.2018; принята к публикации 08.11.2018

## Информация об авторах

**Писаревский Александр Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: 2732558@mail.ru

**Черных Татьяна Евгеньевна** – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tany\_ch@list.ru

**Тикуннов Алексей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tikunov\_av@bk.ru

## THE GENERATOR FOR VERTICAL WIND POWER INSTALLATION

A.Yu. Pisarevskiy, T.E. Chernykh, A.V. Tikunov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia



**Abstract:** the question of the development of alternative power generation in our country is a very urgent task. Due to the geographical features of the location, we have the conditions for the use of many technologies based on renewable energy sources (solar, small hydropower, wind power). One of the most promising in terms of energy indicators is wind power. However, today there are a number of problems in the Russian wind energy industry that impede its development. These problems are related to the fact that for many decades in our country the use of environmentally friendly renewable energy sources was considered to be economically inexpedient, and therefore at the beginning of 2000s we did not have any plant designs based on modern electrical devices, new types of wind wheel, etc. One of these problems is the lack of serial specialized generators for Russian-made wind power plants, which would have high reliability and energy performance, a long service life, a simple design at a low cost. To date, most of the generators that the developers of wind power plants are forced to use machines of general industrial purpose or ones of foreign production. In this regard, design of the generator is proposed, which can be used in a vertical-axial wind power installation

**Key words:** synchronous generator, permanent magnets, anchor winding, magnetic system

### References

1. Kononenko K.E., Natalich A.V. "Autonomous generators with built-in turbine for work inside the gas flare pipe", Proc. of the All-Russian student scientific and technical conference "Applied Problems of Electromechanics, Power, Electronics" (Trudy Vserossiyskoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki»), Voronezh, VSTU, 2017, pp. 26-27.
2. Balagurov V.A. "Design of special electric machines of alternating current: manual" ("Proektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: Ucheb. posobie dlya studentov vuzov"), Moscow, Vysshaya Shkola, 1982, 272 p.
3. Balagurov V.A., Galteev F.F. "Electric generators with permanent magnets" ("Elektricheskie generatory s postoyannymi magnitami"), Moscow, Energoatomizdat, 1988, 280 p.
4. Kunevich A.V., Podol'skiy A.V., Sidorov I.N. "Ferrites: encyclopedic reference book: vol.1. Magnets and magnetic systems", St. Petersburg, Information and publishing agency "LIK", 2004, 358 p.
5. Altman A.B., Gerberg A.N., Gladyshev P.A. et al., ed. Pyatin Yu.M. "Permanent magnets: reference book" ("Postoyannye magnity: spravochnik"), Moscow, Energiya, 1980, 488 p.
6. Sidorov E.V. "Technical characteristics, operational and physical properties of modern magnetic materials and permanent magnets: reference book for consumers and producers" ("Tekhnicheskie kharakteristiki, ekspluatatsionnye i fizicheskie svoystva sovremennykh magnitnykh materialov i postoyannykh magnetov: sprav. dlya potrebiteley i proizvoditeley"), Vladimir, Tranzit – IKS, 2006, 40 p.

Submitted 12.09.2018; revised 08.11.2018

### Information about the authors

**Aleksandr Yu. Pisarevskiy**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: 2732558@mail.ru

**Tat'yana E. Chernykh**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tany\_ch@list.ru

**Aleksey V. Tikunov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tikunov\_av@bk.ru

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА БАЗЕ БАТАРЕЙ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

В.Н. Крысанов, Н.В. Ситников, Н.И. Королев, Д.А. Мамонтов, С.А. Горемыкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** обосновывается необходимость разработки технического комплекса компенсации реактивной мощности в трёхфазных электрических сетях напряжением 6(10) кВ применительно к городским условиям. Коэффициент реактивной мощности  $\text{tg}\varphi$  в городских распределительных сетях определяется значительным числом однофазных потребителей, суточные графики которых в силу очевидной специфики не могут быть строго спрогнозированы. В этой связи при отыскании путей решения проблемы использована статистическая обработка суточных графиков нагрузки значительного числа подстанций мегаполиса. Физически неизбежность передачи по электрическим сетям реактивной мощности оправдана необходимостью создания магнитных полей в асинхронных электроприводах (60 – 65% общего потребления электрической мощности), трансформаторах (20 – 25%), а также существованием магнитных полей в воздушных электрических сетях, реакторах, преобразователях и ряде других электроустановок (около 15%). Реактивная мощность, являющаяся обменной между генератором и нагрузкой и традиционно сопутствующая передаче активной составляющей мощности, не подлежит оплате. Вместе с тем эта мощность в процессе транспортировки по электрическим сетям в той же мере влияет на потери активной мощности, как и транспортировка равного количества активной мощности. Приведена мотивация подготовки вариантов реализации автоматизированных комплексов компенсирующих устройств по числу ступеней и графикам включения в зависимости от суточных графиков получасовой мощности, в которых наблюдалось превышение коэффициента реактивной мощности сверх установленных норм. Разработанный комплекс программно-технических средств содержит методику статистического анализа получасовых данных по потреблению активной и реактивной мощностей на головных питающих фидерах главных понизительных подстанций Воронежской горэлектросети. Приведены результаты реализации пилотного проекта компенсации реактивной мощности на одном распределительном пункте в г. Воронеж

**Ключевые слова:** коэффициент реактивной мощности, тиристорные регуляторы напряжения, регулирование потоков реактивной мощности в системе

### Введение

Организация энергоэффективного электроснабжения невозможна без решения проблемы компенсации реактивной мощности (далее – КРМ). Помимо потребления активной мощности большая часть бытовых и промышленных абонентов потребляют из сети реактивную мощность. Это потребление технологически неизбежно, т.к. помимо преобразования электрической энергии в механическую, световую или тепловую существует необходимость в намагничивании магнитопроводов электрических машин и трансформаторов, ограничении токов короткого замыкания и т.п. Одним из основных направлений сокращения потерь электроэнергии и повышения эффективности ее потребления является КРМ. Чем ниже коэффициент реактивной мощности  $\text{tg}\varphi$ , при одной и той же активной нагрузке электроприемников, тем меньше потери мощности и падения напряжения в элементах систем электроснабжения. Поэтому следует всегда стремиться к получению

наименьшего значения коэффициента реактивной мощности [1, 2].

### Постановка задачи

Основными потребителями реактивной мощности являются асинхронные двигатели (60...65% общего потребления реактивной мощности); трансформаторы (20...25%); воздушные электрические сети, реакторы, преобразователи и другие установки (около 15%) [3].

Величина потребляемой реактивной мощности не фиксируется современными средствами учета электрической энергии, так как, по сути, реактивная энергия является обменной между источником питания (генератором) и нагрузкой. Однако передача реактивной мощности по электрическим сетям приводит к возрастанию потерь активной мощности на передачу реактивной. Эти потери оплачивает в конечном счете потребитель, который часто просто не в состоянии влиять на ситуацию из-за отсутствия в его распоряжении средств и систем компенсации потерь мощности в системе электроснабжения.

С государственной точки зрения, КРМ в электрических сетях всегда выгодна, поскольку уменьшает потребности в первичном топливе для электростанций. Однако в условиях новых рыночных отношений установка КРМ в собственных сетях потребителей не всегда им выгодна, и здесь экономическим стимулом должна быть система оплаты за перетоки реактивной мощности между сетями энергопоставляющей организации и потребителя.

В Советском Союзе проблеме компенсации реактивной мощности уделялось много внимания с момента разработки и реализации плана ГОЭЛРО. Существовали разнообразные механизмы стимулирования потребителей за внедрение технических средств КРМ на базе батарей статических конденсаторов. За реализацию общесистемных мероприятий по поддержанию коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\varphi$  отвечало непосредственно Минэнерго РФ, как оператор Единой энергосистемы. В ходе реализации в России реформы электроэнергетической отрасли и появления многочисленных энергокомпаний-владельцев участков электрических сетей, дифференцированных по уровням напряжения, проблема компенсации реактивной мощности и снижения потерь резко обострилась. По данным [3], в настоящее время ежегодно в энергосистеме России излишне генерируется свыше 50 млрд. кВт·ч электроэнергии, которая оплачивается потребителями по ставке компенсации технологического расхода электроэнергии при передаче по электрическим сетям. Доля потерь активной мощности на передачу реактивной при отсутствии средств и систем компенсации составляет от 25 до 40% от общего уровня потерь и выросла в 2,5-3 раза за последние 20 лет.

К настоящему времени пришло осознание, что без решения проблемы КРМ эффективное развитие энергосистемы России невозможно. Действующий с 2009 г. Приказ Минпромэнерго РФ № 49 определил предельные значения  $\text{tg}\varphi$ , дифференцированные по уровням напряжения. Установлены задания региональным энергосистемам по поддержанию значений  $\text{tg}\varphi$  на уровне 0,35-0,4. Однако проблема далека от решения, прежде всего, из-за отсутствия результатов статистической обработки массивов данных по ежесуточному потреблению реактивной мощности разнообразными потребителями на различных уровнях напряжения.

### Решение сформулированной задачи

Анализ возможности КРМ в электрических сетях 6-10 кВ с целью снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения выполнялся коллективом специалистов кафедр электромеханических систем и электроснабжения и электропривода, автоматизации и управления технологическими процессами ВГТУ в течение 2014-2015 гг. по техническому заданию МУП «Воронежская горэлектросеть» в рамках хозяйственного договора.

Анализу подлежали 82 городских РП и 165 ТП в сетях 6-10 кВ, в которых было обнаружено несоответствие значений  $\text{tg}\varphi$  установленным нормам хотя бы в течение одних суток за год наблюдений. Всего выявлено 86 проблемных участков энергосистемы присоединенной мощностью свыше 29 МВ·А.

Объем работ включал:

- определение перечня объектов (распределительных устройств РП и подстанций ТП), в суточном графике почасовых мощностей которых наблюдалось превышение значений  $\text{tg}\varphi$  установленных норм;
- анализ схем выдачи мощности от главных понизительных подстанций «Воронежэнерго» в электрические сети МУП «Воронежская горэлектросеть» в нормальных и аварийных режимах работы;
- анализ данных по почасовым максимумам потребления активной и реактивной мощности с целью принятия решений по индивидуальной или групповой компенсации;
- статистическую обработку исходных данных и представление итогов обработки средствами графической визуализации;
- подготовку вариантов реализации автоматизированных ККУ по числу ступеней, графику включения и параметрам переходных процессов;
- формирование массива выходных оптимизированных результатов статистической обработки с учетом результатов критериального анализа и экономических факторов;
- разработку комплекта технической документации пилотного проекта автоматизированной ККУ для одного из городских распределительных пунктов 6 кВ;
- техническое сопровождение изготовления и апробацию пилотного проекта с корректировкой документации и внедрением разработанного комплекса оборудования в повседневную практику электросетевого предприятия;

- разработку эксплуатационной документации (инструкции обслуживающему персоналу) предприятия для организации безаварийной работы.

Разработанный комплекс программно-технических средств содержит:

- методику статистического анализа имеющихся получасовых массивов данных по потреблению активной и реактивной мощности на головных питающих фидерах главных понижительных подстанций Воронежской энергосистемы за календарный год;

- программный комплекс для обработки и визуализации результатов статистической обработки массивов данных, реализованный в виде сходящейся процедуры Ньютона - Рафсона;

- эвристический алгоритм принятия решений по мощности и количеству ступеней установки компенсации реактивной мощности, времени включения и отключения отдельных ступеней, а также необходимости ограничения коммутационных перенапряжений, возникающих при переходных процессах;

- материалы рабочего проекта автоматизированной установки компенсации реактивной мощности для электрических сетей 6-10 кВ МУП «Воронежская горэлектросеть»;

- прогнозную модель размещения комплекса автоматизированных установок КРМ сетевой архитектуры различных уровней напряжений, включая технико-экономическое обоснование применения такой системы.

Результаты статистической обработки массивов суточных значений параметров активной мощности (штриховая линия), реактивной мощности (штрихпунктирная линия) и коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\varphi$  (сплошная линия) представлены на рис. 1 и 2. Превышение  $\text{tg}\varphi$  предельного уровня равного 0,35 (штрихпунктирная линия с двумя точками), трактуется, как необходимость принятия решения об установке КРМ.

Анализ всех 86 проблемных участков показал, что вероятность суточных колебаний  $\text{tg}\varphi$  сводится к двум типовым случаям. В случае, показанном на рис. 1, необходима установка нерегулируемой по мощности (одноступенчатой) УКРМ, отключаемой полностью от шин ТП (РП) в часы больших нагрузок в дневное время. В случае, показанном на рис. 2, устанавливается регулируемая по числу ступеней (двух или трехступенчатая) УКРМ, постоянно включенная в электрическую сеть какой-либо одной из своих ступеней.

При использовании как регулируемых, так и нерегулируемых КРМ уменьшение суточных потерь электрической энергии в сети при передаче электрической энергии не должно превышать дополнительных потерь электрической энергии, возникающих в самой УКРМ. По данным [5], потери электроэнергии в УКРМ напряжением 6-10 кВ составляют от 5 до 10 Вт на 1 кВ·Ар мощности УКРМ и зависят от качества изготовления конденсаторов.

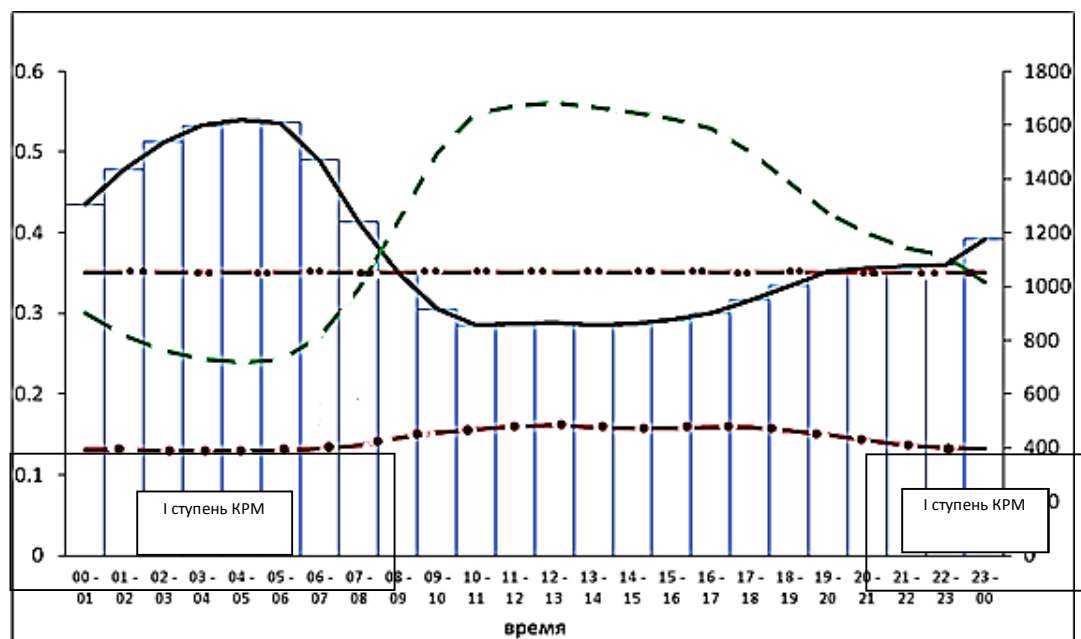


Рис. 1. Результаты статистической обработки  $\text{tg}\varphi$ , требующие периодического отключения КРМ в течение суток

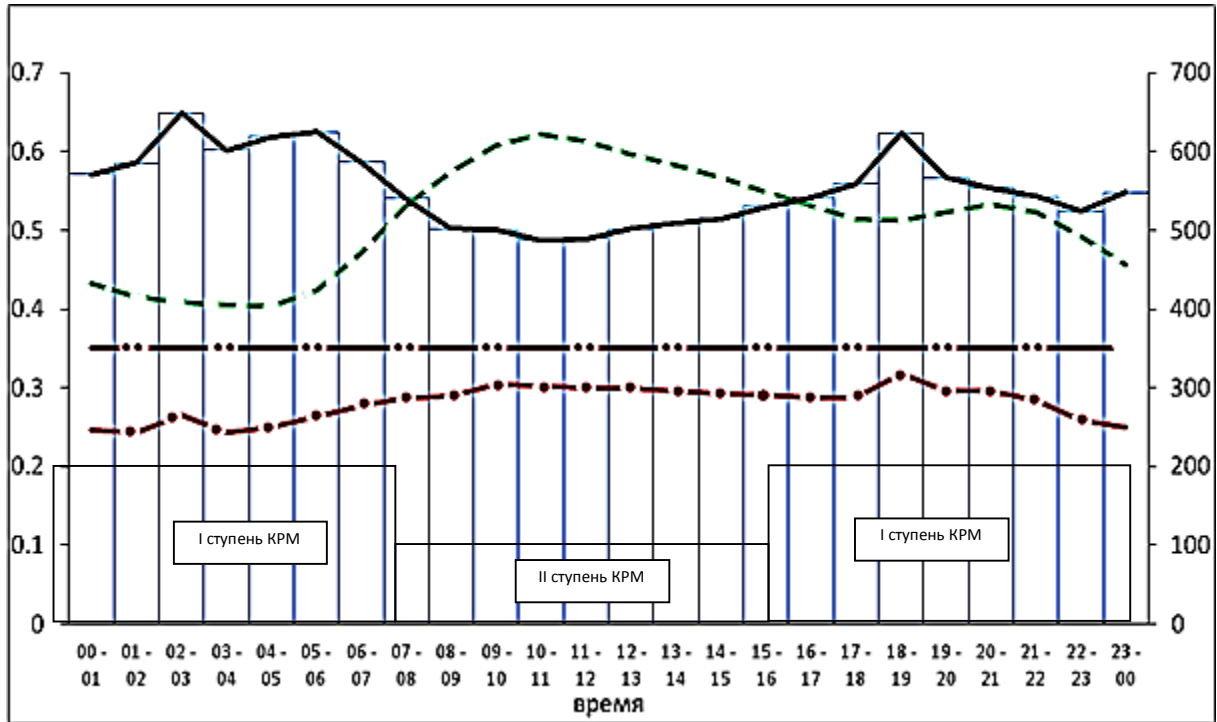


Рис. 2. Результаты статистической обработки tgφ, требующие регулирования мощности КРМ в течение суток

Графики суточного включения конденсаторных установок

Номер рисунка	До компенсации		Установленная мощность УКРМ Q <sub>ку</sub> , кВАр	После компенсации		График работы		ΔΔW, кВт*ч	ΔW <sub>ку</sub> , кВт*ч	ΔΔW <sub>эфф</sub> , кВт*ч	Потери электроэнергии в месяц, тыс. руб.
	tgφ <sub>max</sub> , о.е	tgφ <sub>min</sub> , о.е		tgφ <sub>max</sub> , о.е	tgφ <sub>min</sub> , о.е	ночь	день				
1	0,5446	0,3083	450	0,33	0,14	450	-	-32,88	+48,0	+15,12	+19,541
			450			<b>150</b>	-	<b>-24,66</b>	<b>+16,0</b>	<b>- 8,66</b>	<b>-11,192</b>
			450			300	-	-27,94	+39,4	+11,5	+14,862
			450			225	-	-29,7	+27,7	-2,0	-5,877
2	0,6695	0,3685	450	0,32	0,09	450	150	-28,65	+48	+20,34	+26,287
			450			<b>225</b>	<b>75</b>	<b>-22,94</b>	<b>+14,0</b>	<b>- 8,94</b>	<b>- 11,554</b>
			450			225	225	-24,28	+39,4	+15,12	+19,541
			450			225	150	-17,14	+22,7	+5,56	+ 7,150

ΔΔW- относительное уменьшение потерь активной энергии за сутки в питающих фидерах при установке компенсирующего устройства, рассчитанное по математическому ожиданию; знак «-» соответствует снижению потерь;

ΔW<sub>ку</sub> – относительное увеличение потерь активной энергии в компенсирующем устройстве, рассчитанное по математическому ожиданию; знак «+» соответствует увеличению потерь;

ΔΔW<sub>эфф</sub> – разница между увеличением потерь в компенсирующем устройстве и уменьшением потерь в питающем фидере.

Жирным шрифтом выделен «оптимальный» в смысле потерь вариант разбивки ступеней регулирования

В таблице приведены варианты выбора ступеней регулирования мощности УКРМ для двух фидеров 6 кВ, вероятность почасовых значений tgφ в которых соответствует рис. 1 и 2 соответственно.

Рассмотрение результатов обработки массивов переменных позволяет сделать следующие выводы.

1. Реактивная мощность в течение суток остается практически постоянной. Ее потреб-

ление связано с наличием большого количества несимметрированных по фазам однофазных бытовых нагрузок, которые в свою очередь имеют активно-индуктивный характер.

2. Активная мощность в суточном режиме сильно зависит от часа суток наблюдения. В ночные часы потребление активной мощности минимально, в дневные - максимально. Разница на одной и той же точке учета в сутки может достигать кратности в 1,8 – 2 раза.



собности выполнено сравнение с другими изделиями того же эксплуатационного назначения, функционирующими на рынке. Одновременное улучшение всех перечисленных показателей определяет инновационность разработки.

В нашем случае привлекательность проекта для будущего инвестора определяют следующие показатели: экономическая эффективность проекта -722, 5 тыс. руб. в год при сроке окупаемости дополнительных капитальных вложений около 2,5 млн. руб. на одну установку мощностью не более 450 кВАр в течение не более 2,5 лет.

УКРМ установленной мощностью 450 кВ·Ар внедрена на РП-44 (ул. Кирова, 10) в г. Воронеже в ноябре 2015 г. К январю 2017 г. установка полностью окупилась затраты на ее создание.

### Выводы

Проблема компенсации реактивной мощности в сетях 6 (10) кВ является актуальной для электросетевого хозяйства любого мегаполиса по следующим причинам:

1) в электрических сетях 6(10) кВ несоответствие величины  $\text{tg}\varphi$  нормативным требованиям - есть следствие несимметрии нагрузки в потребительских сетях 0,4 кВ;

2) с ростом энерговооруженности бытовых абонентов, большинство из которых присоединено к сетям МУП «Воронежская горэлектросеть», проблема увеличения  $\text{tg}\varphi$  в энергосистеме в целом и электрических сетях 6(10) кВ будет усугубляться;

3) причины такого явления – появление большого количества регулируемых нагрузок,

в том числе с использованием электронных регуляторов мощности на базе транзисторных или тиристорных преобразователей с резко выраженным скачкообразным изменением мощности потребления в момент коммутации;

4) применение регулируемых конденсаторных батарей является преобладающим, но не единственным техническим решением, позволяющим избежать дальнейшего роста реактивных нагрузок в обозримом будущем.

Накопленный опыт позволяет участникам проекта выполнить аналогичную или более сложную разработку для любого электросетевого хозяйства страны или области.

### Литература

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. “An international survey on failures of large power transformers in service” Final Report of Working Group 05 of Study Committee 12 (Transformers).
3. “Transformer Failures”, Section 7, EEA/EA Technology Travel Award 2000, Ragu Balanathan, Summary Report.
4. “Condition monitoring of high voltage electrical equipment (with an emphasis on transformers)”, Ron Park, Park Consultants Ltd. Paper presented at 3rd AVO New Zealand/LORD Consulting International Technical Conference Methven NZ, October 15-17, 2002.
5. “Analysis of Transformer Failures”, by William H. Bartley (The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company). Paper given to International Association of Engineering Insurers 36th Annual conference – Stockholm, 2003.
6. Порядок расчета и обоснования нормативов технологических потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям. Утверждено приказом Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326.

Поступила 25.09.2018; принята к публикации 30.11.2018

### Информация об авторах

**Крысанов Валерий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sovteh2000@mail.ru, тел. 8920-228-56-06, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Ситников Николай Васильевич** - канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nvs17939@mail.ru, тел. 8919-247-97-08

**Королев Николай Иванович** - канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nikolaj-korolev-38@mail.ru, тел. 8960-113-74-28

**Мамонтов Дмитрий Александрович** - ассистент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: amidm@yandex.ru, тел. 8962-327-04-48

**Горемыкин Сергей Александрович** - канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: goremynsa@yandex.ru, тел. 8908-130-82-45

## REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS OF ALTERNATE CURRENT ON THE BASIS OF STATIC CAPACITORS BATTERIES

**V.N. Krysanov, N.V. Sitnikov, N.I. Korolev, D.A. Mamontov, S.A. Goremykin**

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

**Abstract:** the necessity of developing a technical complex for compensation of reactive power in three-phase electric networks with voltage of 6 (10) kV in relation to urban conditions is substantiated. The reactive power factor  $tg\varphi$  in urban distribution networks is determined by a significant number of single-phase consumers, whose daily schedules, due to their obvious specifics, cannot be strictly predicted. In this regard, when finding solutions to the problem, statistical processing of daily load schedules of a significant number of metropolitan substations was used. Physically, the inevitability of transmitting reactive power over electric grids is justified by the need to create magnetic fields in asynchronous electric drives (60-65% of the total consumption of electrical power); transformers (20–25%) and the existence of magnetic fields in aerial electrical networks, reactors, converters, and a number of other electrical installations (about 15%). Reactive power, which is the exchange between the generator and the load and traditionally concomitant transfer of the active component of power, is not payable. At the same time, this power in the process of transportation over electric networks has the same effect on the loss of active power as the transport of an equal amount of active power. The article presents the motivation for the preparation of options for the implementation of automated complexes of compensating devices according to the number of stages and switching schedules, depending on the daily half-hour power schedules, in which excess reactive power was observed in excess of the established norms. The developed complex of software and hardware contains a method for statistical analysis of half-hour data on the consumption of active and reactive power at the main feeder feeders of the main substations of the Voronezh city electric grid. The results of the implementation of the pilot project of reactive power compensation at one distribution point in the city of Voronezh are presented

**Key words:** reactive power factor, thyristor voltage regulators, regulation of reactive power flows in a system

### References

1. Federal law of the Russian Federation of November 23, 2009, no. 261-FZ "On energy saving and energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation".
2. "An international survey on failures of large power transformers in service", Final Report of Working Group 05 of Study Committee 12 (Transformers).
3. Ragu Balanathan "Transformer Failures", Section 7, EEA/EA Technology Travel Award 2000, Summary Report.
4. Ron Park "Condition monitoring of high voltage electrical equipment (with an emphasis on transformers)", Park Consultants Ltd. Paper presented at 3rd AVO New Zealand/LORD Consulting International Technical Conference Methven NZ, October 15-17, 2002.
5. William H. Bartley "Analysis of Transformer Failures", Paper given to International Association of Engineering Insurers 36th Annual conference, Stockholm, 2003.
6. "The order of calculation and justification of standards of technological losses of electric energy at its transfer on electric networks", approved by the order of the Ministry of energy of the Russian Federation of December 30, 2008, no. 326.

Submitted 25.09.2018; revised 30.11.2018

### 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, tel. 8920-228-56-06, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

**Nikolay V. Sitnikov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nvs17939@mail.ru, tel. 8919-247-97-08

**Nikolay I. Korolev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nikolaj-korolev-38@mail.ru, tel. 8960-113-74-28

**Dmitry A. Mamontov**, assistant, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: amidm@yandex.ru, tel. 8962-327-04-48

**Sergey A. Goremykin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: goremynsa@yandex.ru, tel. 8908-130-82-45



## ОЦЕНКА НЕСИММЕТРИИ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Е.С. Кинев<sup>1</sup>, А.А. Тяпин<sup>1,2</sup>, С.Н. Ефимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Тепловые электрические системы», г. Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

<sup>3</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал  
Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Красноярск, Россия

**Аннотация:** рассмотрены особенности расчета и моделирования индукционного технологического оборудования, предназначенного для перемешивания жидкого алюминия в печах и миксерах. Вместо механического перемешивания на современном производстве широко используют индукционные магнитогидродинамические (МГД) устройства продольного или поперечного магнитного поля. Новые печи непременно оснащают МГД-комплексами, состоящими из индуктора и источника питания. Печи предыдущих поколений подвергают модернизации, в ходе которой оснащают МГД-перемешивателями. Задачу выбора разновидности МГД-машины решают для каждого цеха индивидуально, опираясь на характеристики и цену. Индукторы продольного и поперечного поля отличаются конструкцией, эффективностью, режимами электропитания, себестоимостью. Кроме того, технологические комплексы могут отличаться типом и характеристиками источников питания. При создании индукционных машин применяют комплексные решения для согласования оптимизированной электромагнитной системы индуктора и режима электропитания, допустимого в системе электроснабжения. Энергообеспечение индукторов продольного магнитного поля на печах с алюминием обеспечивают с помощью трёхфазных IGBT-инверторов на частоте около 1 Гц. Приемлемую надёжность и достаточную гибкость управления обеспечивают транзисторные частотные преобразователи с единичными мощностями в сотни кВА. Для линейных индукционных машин характерно наличие разомкнутого магнитопровода, поэтому режим электропитания многофазных обмоток оказывается несимметричным. Несимметрия токов, а также краевые эффекты могут приводить к искажению бегущего магнитного поля и снижать интегральное тяговое усилие индукционной машины. Оценка несимметрии электромагнитного режима для разных схем включения обмоток трёхзонных и четырёхзонных МГД-машин продольного магнитного поля можно выполнять с применением метода симметричных составляющих

**Ключевые слова:** несимметрия, трёхфазная индукционная машина, электромагнитный индуктор, бегущее магнитное поле, электромагнитный перемешиватель, система электроснабжения индукционной машины, метод симметричных составляющих, токи обратной последовательности, частотный инвертор

### Постановка задачи

В системе электроснабжения индукционных машин для перемешивания расплавленного алюминия применяют низкочастотные многофазные преобразователи с модифицированным синусоидальным напряжением [1, 4]. Трёхфазные инверторы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), используемые для установок электромагнитного перемешивания [2], работают на напряжениях до 1000 В, при мощностях менее 1000 кВА. Токи многофазного частотного преобразователя величиной 250-400 ампер несимметричны и имеют реактивный характер [3, 5]. Для создания в расплаве бегущего магнитного поля, применяют двух- и трёхфазные укороченные линейные асинхронные двигатели (ЛАД) с разомкнутым магнитопроводом [3, 6]. Особенностью таких машин является их малополюсность при условии  $2p \leq 2$ . Предварительный расчет электромаг-

нитного режима малополюсных индукционных машин (ИМ) выполняют приближенно, по инженерным методикам, а затем производят численное моделирование на ЭВМ [2, 15]. Нередко результаты численного моделирования значительно отличаются от параметров, заложенных при проектировании. Особенно это касается резкой несимметрии токов по фазам, что может приводить к изменению электромагнитного режима индуктора [3], перераспределению фазовых углов магнитных потоков и ухудшению тяговых характеристик. В этих условиях уже для предварительного расчёта и оценки несимметрии токов в фазах индукционной машины продольного магнитного поля следует проанализировать возможность применения метода симметричных составляющих, с последующей выработкой мер коррекции режима [4].

### Решение

Специфика конструкции укороченных трёхфазных индукционных машин с разомкну-

тым магнитопроводом обуславливает несимметрию токов и магнитных потоков в индукторе [3] комплекса электромагнитного перемешивания (ЭМП) расплава алюминия в печах. При расчёте и проектировании ИМ применяют инженерные методики, в которых затруднительно в полной мере оценить несимметричное распределение токов, с учётом взаимной индуктивности фаз и переноса мощности между близко расположенными обмотками [7]. Кроме того, при разработке частотного преобразователя для индукционной машины в ходе построения транзисторного инвертора и создания алгоритмов управления силовым модулем [2, 8], необходимо предусмотреть все возможные режимы работы. Наиболее существенной особенностью режима индуктора продольного магнитного поля можно считать неравенство фазовых сдвигов между напряжениями и токами в фазах инвертора [7]. Инверсное включение обмоток индукционной машины, несимметрия токов, перенос мощности между обмотками могут приводить не только к смене характера реактивности с индуктивного на ёмкостный, но и к мутации режима, при которой транзисторный инвертор становится электроприёмником. Указанное явление предпочтительно исследовать ещё на этапе анализа схемной конфигурации звена «индуктор – инвертор». Это позволяет оценить пределы изменения режимных характеристик и сформулировать требования к построению алгоритма работы электронных компонентов в системе управления импульсными силовыми ключами [2]. Дело в том, что токи установившегося режима разных фаз могут отличаться вдвое, поэтому предельно допустимые режимные параметры IGBT-транзисторов, особенно с учётом импульсных перегрузок, следует выбирать обоснованно.

Схема силового звена электронного частотного инвертора источника питания, построенная на базе трех полумостов ( $D_1, D_2, D_3$ ), показана на рис. 1.

В алгоритме работы ШИМ-контроллера должны быть предусмотрены состояния, при которых мгновенный ток в обмотке индуктора продолжительное время находится в противофазе с напряжением полумостового модуля.

В системе электроснабжения линейной индукционной машины циркулируют большие реактивные мощности, поскольку режим индуктора близок к холостому ходу.

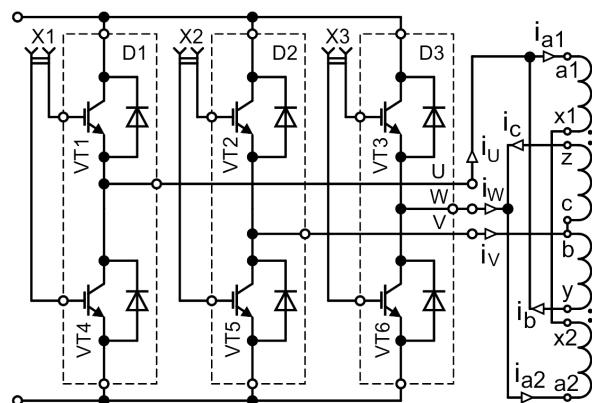


Рис. 1. Четырёхзонная индукционная машина с инвертором при соединении треугольником

Отсутствие вращения в ИМ создаёт определённые особенности управления электронной при аварийной остановке технологического процесса. Такая ситуация возможна не только в случае внезапного прекращения электроснабжения, но также при возникновении аварий (например к.з.) в системе электропитания или в обмотках. Дело в том, что индукционные машины металлургического назначения размещают под электрическими печами или миксерами с расплавом. Нужно понимать, что жидкий алюминий агрессивен и способен разрушать футеровку. Именно по причине возможности аварий при создании систем охлаждения индукторов предпочтение отдают принудительному воздушному охлаждению перед водяным. Алгоритм управления электронными блоками частотного инвертора в режиме внезапного аварийного отключения должен обеспечивать мгновенный сброс огромной реактивной мощности на балласт.

Наиболее часто индукционные машины делают в трёхзонном или четырёхзонном исполнении. Это обусловлено спецификой размещения индуктирующих катушек многофазной обмотки на магнитопроводе [4]. В трёхзонной конструкции индукционная машина имеет три сосредоточенные обмотки из 10-12 катушечных групп, локализованные между четырьмя зубцами. В четырёхзонной индукционной машине сосредоточенные обмотки размещены между пятью зубцами.

В представленной на рис. 1 конфигурации предусмотрено включение трехфазного четырёхзонного индуктора по схеме треугольника с параметрами  $m = 3$ ,  $2p = 4/3$ ,  $Z = 4$ ,  $\alpha = 60$ . Достоинством такого построения индукционной машины является более протяженный сегмент окружности и расширенный сектор дуги, в пределах которого расположены магнитные

потоки, создающие тяговое усилие. Учитывая нелинейные характеристики среды, а также сложную конфигурацию магнитной цепи, аналитический расчет распределения многофазных магнитных потоков крайне затруднителен. На предварительном этапе невозможно точно учесть реальное распределение магнитного поля в индукторе бегущего магнитного поля (рис. 2). Тем не менее задача достоверного определения размера фазных зон и полюсного деления индукционной машины очень важна для оценки её эффективности при воздействии на расплав металла [7]. Поэтому для предварительного анализа применяют идеализированные векторные диаграммы, в которых заданному расположению векторов МДС (тока) соответствует идеальное распределение векторов магнитных потоков в областях магнитопровода непосредственно внутри обмоток. Следует заметить, что значительно больший интерес представляет решение задачи достоверной оценки распределения магнитной индукции в зубцах. Именно зубцы индукционной машины ориентированы непосредственно в расплав металла и выполняют в индукторе роль кон-

центраторов магнитного поля. Однако напрямую по идеализированной картине МДС в обмотках ориентацию векторов поля в зубцах определить не представляется возможным. Уточнённую картину поля получают на последующих этапах путём вычислительного эксперимента [9, 10]. Помимо систем машинного моделирования наподобие Ansys Multyphysics или Comsol Multyphysics [9], в решении таких задач бывает удобно использовать специализированное авторское программное обеспечение (ПО), построенное на основе методов теории цепей [11] или обычное программирование на Фортране [12]. При построении указанного ПО применено программирование методов гибридного анализа [13], расширенных узловых уравнений, метода гармонического баланса с использованием алгоритмов редукции разреженных матриц и численного интегрирования дискретных моделей нелинейностей и реактивностей [11]. Именно применение такого ПО позволило получить представленные далее результаты расчета токов и магнитных потоков для установившегося режима многофазной нелинейной магнитной цепи [14].

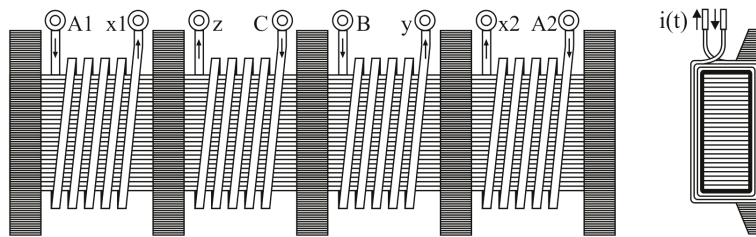


Рис. 2. Упрощенная конструкция четырёхзонной индукционной машины бегущего магнитного поля

Как видно по векторной диаграмме токов в обмотках индуктора, показанной на рис. 3, эффективное тяговое усилие оказывают магнитодвижущие силы (МДС), создаваемые токами  $I_{a1}$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_{a2}$  в растре, величиной  $\pi$ , что составляет половину окружности.

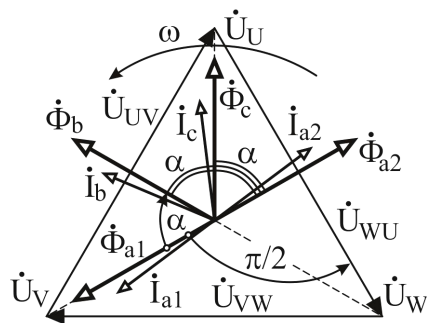


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений индукционной машины

Судя по диаграмме (рис. 3) легко подтвердить, что фазовый сдвиг токов  $I_{a1}$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_{a2}$ , обуславливающих магнитные потоки в яреме  $\Phi_{a1}$ ,  $\Phi_b$ ,  $\Phi_c$ ,  $\Phi_{a2}$ , равен углу  $\alpha = \pi/6$ , что весьма выгодно иметь в пределах столь малого полюсного деления. Вместе с тем индуктор продольного поля с такой схемой соединения становится четырёхзонным (рис. 2) и может оказаться несколько больших габаритов в продольном направлении, что следует конструктивно ограничивать при проектировании.

На следующем этапе расчёта следует оценить особенности сопряжения рассмотренной индукционной машины с частотным инвертором и сформулировать основные требования к режиму электропитания обмоток. В первую очередь это касается соотношения фазовых углов токов,

обеспечивающих заданное чередование полюсов магнитного поля. Для оценки характера распределения токов в линейных проводах источника питания можно записать систему уравнений по законам Кирхгофа. На первоначальном этапе, учитывая разомкнутый характер магнитопровода [3], магнитными связями между фазами следует пренебречь

$$\begin{aligned} \dot{I}_U + \dot{I}_b - \dot{I}_{a1} &= 0, & \dot{I}_U &= \dot{I}_{a1} - \dot{I}_b, \\ \dot{I}_W + \dot{I}_c - \dot{I}_{a2} &= 0, & \dot{I}_W &= \dot{I}_{a2} - \dot{I}_c, \\ \dot{I}_V - \dot{I}_c - \dot{I}_b &= 0, & \dot{I}_V &= \dot{I}_c + \dot{I}_b. \end{aligned} \quad (1)$$

По системе уравнений (1) для установившегося режима трёхфазной индукционной машины строят векторную диаграмму токов, показанную на рис. 4.

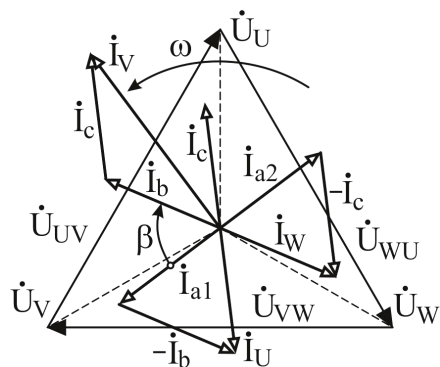


Рис. 4. Векторная диаграмма токов индукционной машины

Приближенное решение выполнено для основной гармоники, без учёта насыщения стали при подключении обмоток ЛАД в обратном порядке чередования фаз, обеспечивающем нужный технологический режим. Полученное распределение токов указывает на крайне существенную несимметрию режима трёхфазного инвертора. Судя по векторной диаграмме сумма токов первой и второй фаз  $I_U$  и  $I_W$  уравновешена током третьей фазы  $I_V$ , при условии приближенного равенства фазовых углов  $\beta \approx \alpha$ . Таким образом, в простом примере анализа могут быть получены важные сведения для проектирования частотного преобразователя, силовое звено которого должно допускать продолжительную работу с несимметрией подобного вида, а электронные компоненты должны быть рассчитаны на перегрузки током, на уровне 1,73 от номинального. При этом защитные модули инвертора должны

отрабатывать несимметричное распределение токов как штатный режим. Еще более существенной может оказаться несимметрия токов частотного преобразователя с учетом магнитных связей между обмотками индуктора и насыщения стали. Близкое расположение обмоток соседних фаз в пределах одного полюсного деления может дополнительно усугублять несимметрию токов на 20-25%. Можно однако заметить, что в данном случае разомкнутая конфигурация магнитопровода в определённой мере демпфирует искажение токов в фазах [3].

По векторной диаграмме токов и напряжений можно оценить наличие переноса мощности между соседними фазами, для этого следует представить на комплексной плоскости одноимённые величины и указать соответствующие фазовые углы между токами и напряжениями, как показано на рис. 5.

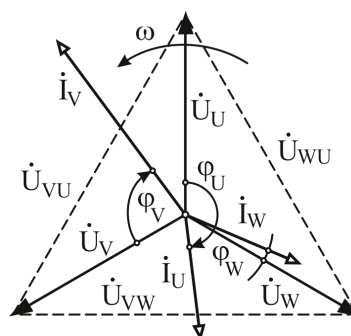


Рис. 5. Векторная диаграмма токов и напряжений индукционной машины

Судя по характеру углов можно заключить, что только в первой фазе ток отстаёт от напряжения на угол  $\phi_V$ , что соответствует индуктивному характеру нагрузки, а фаза инвертора сохранила статус генераторной. В фазе W угол между током и напряжением  $\phi_W$  сравнительно мал, но ток опережает напряжение, что свидетельствует о небольшом, но уже ёмкостном характере нагрузки. Что касается третьей фазы, то напряжение и ток зафиксированы в режиме, весьма близком к противофазе. При этом фазовый сдвиг  $\phi_U$  лишь немного не достигает значения  $\pi$ , что свидетельствует о переносе мощности, а фаза инвертора приобрела характер электроприёмника. Полученные результаты следует учитывать при построении алгоритмов управления импульсными силовыми IGBT-ключами трёхфазного низкочастотного источника питания.

Несимметричные режимы в системах электроснабжения электроустановок нередко исследуют с применением метода симметричных составляющих. Например, в токах индукционной машины продольного магнитного поля для разных схем включения можно выделить составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= (\dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W) / 3, \\ \dot{I}_1 &= (\dot{I}_U + a \cdot \dot{I}_V + a^2 \cdot \dot{I}_W) / 3, \\ \dot{I}_2 &= (\dot{I}_U + a^2 \cdot \dot{I}_V + a \cdot \dot{I}_W) / 3. \end{aligned} \quad (2)$$

Результирующие токи в фазах транзисторного инвертора определяют по взаимным соотношениям, которые и применяют для оценки режима в совокупности комплексных схем замещения системы электроснабжения индукционной машины

$$\begin{aligned} \dot{I}_U &= (\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0), \\ \dot{I}_V &= a^2 \cdot \dot{I}_1 + a \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0, \\ \dot{I}_W &= a \cdot \dot{I}_1 + a^2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая характер несимметрии токов, можно применить к трёхфазной системе векторов метод симметричных составляющих и получить соответствующие схемы замещения прямой и обратной последовательности. Стоит отметить, что поскольку показанное на схеме (рис. 2) включение обмоток индукционной машины даже при расщеплении сохраняет соединение треугольником, постольку в токах инвертора не будет составляющих нулевой последовательности. А это упрощает построение эквивалентной векторной диаграммы. При выборе системы координат для метода симметричных составляющих можно привязать к нулю вектор фазного напряжения  $U_V$ . Тогда систему несимметричных векторов тока (рис. 4) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{I}_V &= I_V \cdot e^{j\varphi}, \\ \dot{I}_W &= I_W \cdot e^{j(\varphi - \pi / 2 - \alpha)}, \\ \dot{I}_U &= I_U \cdot e^{j(\varphi + \pi / 2 + \alpha)}. \end{aligned}$$

По формулам симметричных составляющих можно получить значения токов прямой и обратной последовательности, при

$\dot{I}_0 = 0$ . Следует отметить, что ток обратной последовательности оказался весьма существенным по величине, равным половине тока прямой последовательности  $I_2 = I_1 / 2$ . Это подтверждает высокую степень искажения симметрии системы.

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{(I_V e^{j\varphi} + a I_W e^{j(\varphi - \frac{2\pi}{3})} + a^2 I_U e^{j(\varphi + \frac{2\pi}{3})})}{3} = I_1 e^{j\varphi_1} \\ \dot{I}_2 &= \frac{(I_V e^{j\varphi} + a^2 I_W e^{j(\varphi - \frac{2\pi}{3})} + a I_U e^{j(\varphi + \frac{2\pi}{3})})}{3} = I_2 e^{j\varphi_2}. \end{aligned}$$

Поскольку для индуктора продольного поля расчётным путём удалось получить симметричные составляющие токов (рис. 6), то далее по мере необходимости легко перейти к построению схем замещения индукционной машины для прямой и обратной последовательности, пригодных в анализе режима системы электропитания, методами, хорошо описанными в курсе электроэнергетики.

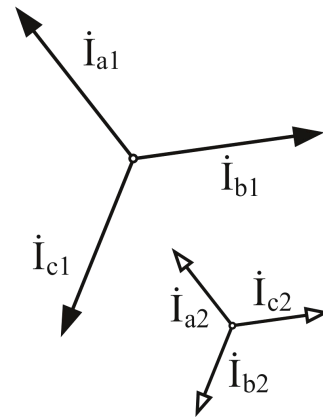


Рис. 6. Векторная диаграмма симметричных составляющих токов в обмотках ИМ

При этом в анализе режима автономной системы электроснабжения традиционно можно уйти от исследования несимметрии по топологическим уравнениям (1) и провести расчет как для симметричного состояния. Рассчитанные приближенно симметричные составляющие напряжений и токов легко собрать в исходную несимметричную систему, как показано на рис. 7. Поскольку разложение на симметричные составляющие применено к обмоткам индуктора, соединённым в треугольник, постольку это несколько

упрощает анализ фазовых соотношений между токами и напряжениями.

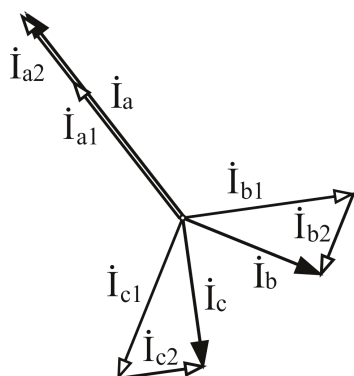


Рис. 7. Эквивалентная векторная диаграмма симметричных составляющих

Надо помнить, что в постановке задачи для первого этапа была задана такая степень идеализации, при которой отсутствует учёт взаимных индуктивностей между фазами. А кроме того, вначале расчёта не было учтено насыщение стали магнитопровода. Поэтому такой расчёт следует считать приближенным. Тем не менее с применением такого подхода совсем не сложно получить представление о характере распределения токов в фазах и потоков в сердечнике. А уже на следующем этапе расчёта можно перейти к оценке режимных параметров с учетом насыщения сердечника. Причём по результатам расчёта, например для метода гармонического баланса и последующего спектрального анализа, нечётные гармоники токов и напряжений можно также сгруппировать по индексам и отнести в прямую или обратную последовательность режимных параметров. Это позволит скорректировать векторные диаграммы симметричных составляющих и провести уточнение токов и напряжений инвертора.

Примечательно, что для классической компоновки трехзонной индукционной машины (рис. 8) с соединением обмоток звездой с инверсией средней фазы так же, как и для четырехзонной при треугольнике, по аналогии можно применить метод симметричных составляющих. Однако для практического применения соединения обмоток индуктора звездой следует преодолеть известные ограничения, связанные с режимом нейтрали и резким искажением симметрии, либо по токам, либо по напряжениям.

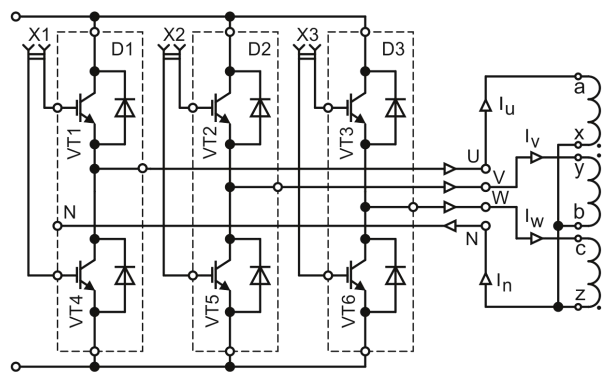


Рис. 8. Трёхзонная ИМ с инвертором, при соединении обмоток звездой

При заданном характере фазовых углов токи в крайних фазах сохраняют индуктивный характер (рис. 9), так как фазовые углы  $\varphi_U > 0$  и  $\varphi_V > 0$ . А поскольку ток инвертированной средней фазы ( $\varphi_W < 0$ ) опережает напряжение на угол более  $\pi/2$ , то возникают два последствия. Во-первых, реактивность тока средней фазы приобретает емкостный характер, а во-вторых, меняется характер генерации. Согласно векторной диаграмме, показанной на рис. 9, инверсия тока средней фазы приводит к переносу мощности, причём средняя фаза инвертора уходит в рекуперацию и по существу становится электроприемником.

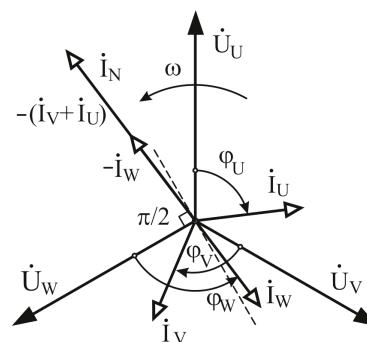


Рис. 9. Векторная диаграмма токов при соединении обмоток ИМ в звезду

Примечательно, что ток в нейтрали линейной индукционной машины оказывается равным двукратному номинальному фазному току инвертора, а модули токов в фазах индукционной машины равны между собой. С учетом магнитной связи между обмотками векторная диаграмма будет существенно искажена, что следует учитывать при выборе комплектующих. К показанному на диаграмме идеализированному распределению токов также применим метод симметричных

составляющих. Для получения симметричных составляющих фазные токи следует записать в комплексной форме и применить систему уравнений (2). Вычисления можно выполнить вручную или применить вычислительную среду, например Mathcad. Рассчитанные по выражениям (2) симметричные составляющие токов показаны на рис. 10.

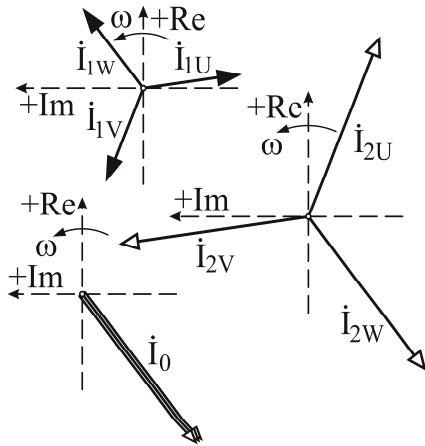


Рис. 10. Векторные диаграммы симметричных составляющих токов

Модули тока обратной и нулевой последовательностей равны друг другу и втрое превосходят ток прямой последовательности  $I_0 = I_2 = 3 I_1$ .

Соотношения модулей симметричных составляющих отражают резкий характер несимметрии. Используя рассчитанные векторы по выражениям (3), получают эквивалентную векторную диаграмму, как показано на рис. 11. Ток каждой фазы получают аналитическим или графическим суммированием симметричных составляющих с применением оператора поворота  $a$ .

По значениям симметричных составляющих легко понять, что ток в нейтральном проводе следует рассматривать как совокупность токов нулевой последовательности всех фаз. Это подтверждает векторная диаграмма (рис. 9). Согласно закону Кирхгофа вектор тока в нейтрали индуктора определяют как сумму токов всех фаз. Схема соединения обмоток звездой с изолированной нейтралью практического применения в индукторах с разомкнутым магнитопроводом не получила, поскольку напряжение смещения нейтрали достигает недопустимых величин, что приводит к ещё большей кривизне токов, потребляемых от трёхфазного инвертора.

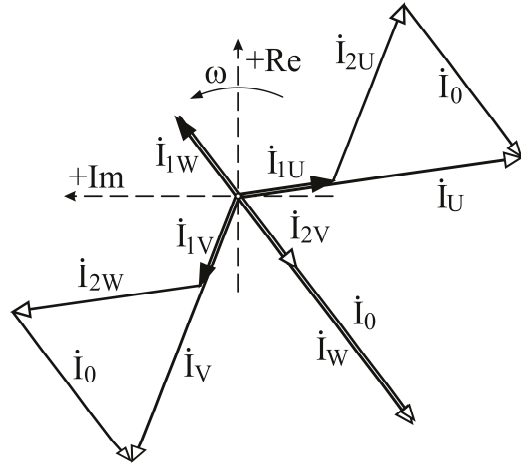


Рис. 11. Эквивалентная векторная диаграмма симметричных составляющих токов

Специфические характеристики рассматриваемого устройства как комплекса ЭМП, содержащего многофазную индукционную машину и электронный инвертор, позволяют использовать наряду с традиционными методами анализа современные вычислительные средства, ориентированные на применение алгоритмов прикладной математики [15]. Для расчёта электромагнитных режимов нередко удобно обратиться к моделированию несимметричных трехфазных систем в специализированном программном обеспечении, например Ansys Multyphysics [9]. Однако построение полномасштабной модели комплекса ЭМП не исключает предварительного анализа режима электропитания по схеме включения обмоток индуктора продольного магнитного поля. Хорошие результаты анализа распределения бегущего магнитного поля даёт применение подсистем CFX и Fluent, позволяющих смоделировать не только систему электроснабжения, но и малополюсную индукционную машину с расплавом алюминия в полнофазном представлении.

Именно на этапе моделирования удаётся выполнить решение задачи учёта несимметричных режимов в системе электроснабжения. Для этого в параметрах модели задают не только характер токов, но и значения взаимных индуктивностей. Их определяют через коэффициент связи обмоток индуктора продольного магнитного поля. Кроме того, при построении численной модели учитывают нелинейный характер индуктивных связей. Для этого задают реальные магнитные характеристики стального сердечника,

оценивают степень насыщения зубцов и магнитопровода в установившемся режиме.

Нужно заметить, что интерфейс программной среды Ansys позволяет создавать математические модели колоссального размера, состоящие из модулей, работающих в разных подсистемах. При этом далеко не всегда оказывается рациональным создавать гибридные модели, учитывающие особенности температурного и магнитного полей индуктора в совокупности с электромагнитными режимами системы электропитания. В большинстве случаев расчёт и моделирование режима системы электроснабжения можно разграничить с моделированием электромагнитного режима индуктора. Но при этом всегда следует вводить соответствующие

граничные условия, позволяющие «сшивать» полученные на границах областей результаты, опираясь на параметры номинального установившегося режима электропитания. Зная величины намагничивающих токов в обмотках, можно рассчитать распределение магнитных потоков в ярме и зубцах.

Ниже на рис. 12 показана упрощенная модель, пригодная для расчета режима электромагнитного индуктора. Описание модели генерируется в автоматизированном режиме с формированием файлов в ASCII-коде, аналогичных описанию моделей в системе Ansys Multyphysics. Решение задачи выполняется итерационно, а результат представляется в табличной форме.

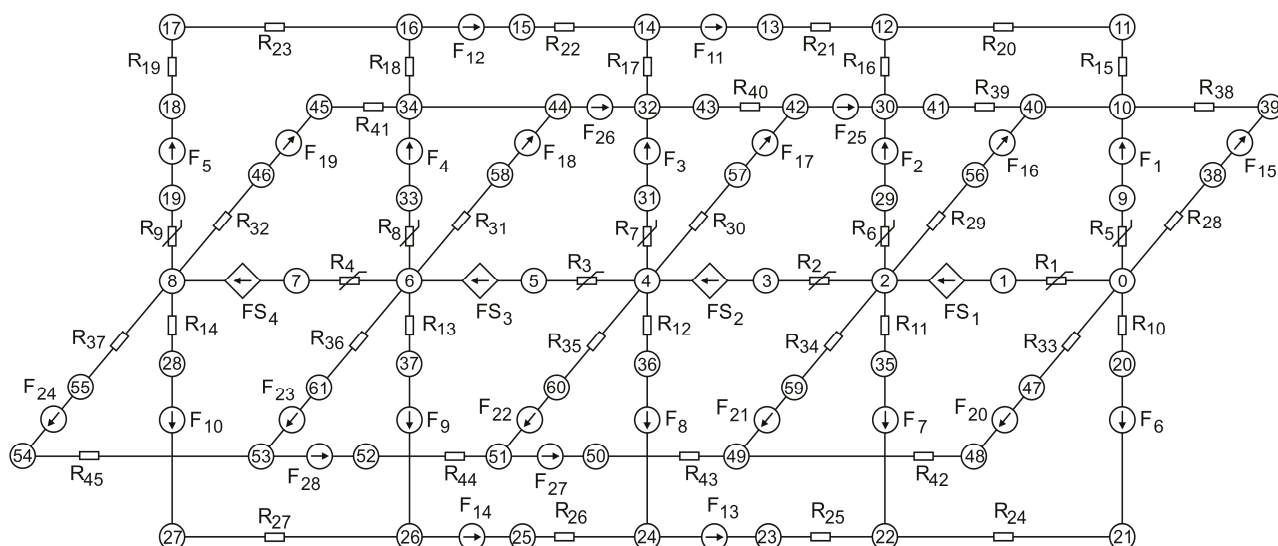


Рис. 12. Эскиз расчетной модели многофазной трёхзонной индукционной машины

В качестве намагничивающих источников в модели применены управляемые источники МДС FS1, FS2, FS3, FS4, режим которых задан эквивалентной синусоидой по набору гармоник, зависящему от степени насыщения стали. Причём эквивалентный вектор МДС FS2, фазы В, инвертирован на угол  $\pi$  для получения заданного фазового сдвига  $+\pi/3$ . Векторные значения МДС FS1 и FS4 получены от расщепления обмотки фазы А, а противофазное к FS1 включение FS4 создает требуемый начальный фазовый угол  $+\pi$ . Комплекс эквивалентной синусоиды FS3 оставлен без изменения с естественной фазой  $+2\pi/3$  в прямой последовательности. Воздушные промежутки и расплав металла в модели заменены неизменными резистивными магнитными сопро-

тивлениями, которые были рассчитаны по реальной геометрии индуктора, предназначенного для печей до 50 т при воздушном зазоре около 600 мм. Участки магнитопровода и зубцы замещены нелинейными резистивными сопротивлениями при табличном описании вебер-амперных характеристик с линейной интерполяцией между однозначно заданными точками.

Векторная диаграмма магнитных потоков в зубцах индукционной машины, полученная по расчетной модели (рис. 12), показана на рис. 13. Векторы потоков совмещены на одной диаграмме с векторами МДС трёхфазной обмотки индуктора. А вот векторы магнитных потоков в ярме целесообразно вынести в отдельную векторную диаграмму, которая станет



уточнением приближенного решения, показанного на рис. 3.

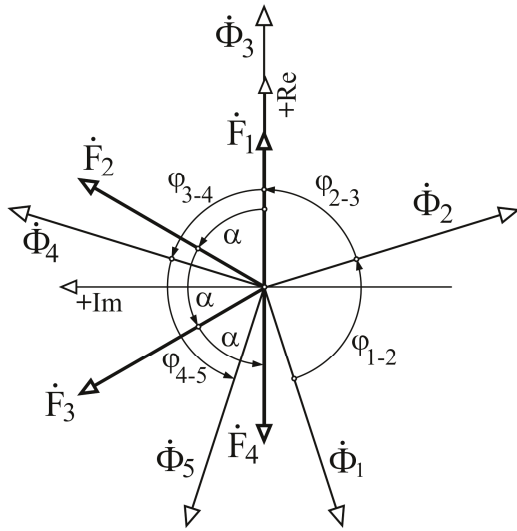


Рис. 13. Векторная диаграмма магнитных потоков зубцов ИМ

При таком характерном распределении МДС трехфазной обмотки, для угла  $\alpha = \pi/3$  получены фазовые сдвиги магнитных потоков в расплаве, обозначенные на диаграмме символами  $\varphi_{1-2}$ ,  $\varphi_{2-3}$ ,  $\varphi_{3-4}$ ,  $\varphi_{4-5}$ , причем для магнитного полюса трёхфазной обмотки в  $3\alpha$  (180 градусов) суммарный угол  $\varphi_{\Sigma}$  охвата магнитными потоками расплава алюминия, приближается к 320 градусам

$$\varphi_{\Sigma} = \varphi_{1-2} + \varphi_{2-3} + \varphi_{3-4} + \varphi_{4-5}.$$

В анализе векторных диаграмм следует понимать, что значения магнитных потоков, полученные по расчетной модели в численном эксперименте, представляют собой эквивалентные амплитуды. Их значения учитывают наличие высших гармоник магнитной индукции, рассчитанные в задаче анализа для основной кривой намагничивания конструкционной стали, заданной таблично. Явление неоднозначности характеристик намагничивания не учитывалось.

Результат вычисления магнитных потоков в магнитопроводе непосредственно в обмотках представлен на рис. 14. Как и предполагалось в начале, уточнённый расчет показал значимое отличие в распределении магнитных потоков, приведенных на рис. 3. Судя по векторной диаграмме фазовый сдвиг токов и потоков второй и третьей обмоток, расположенных в

центре магнитопровода, незначителен. В то же время фазовый сдвиг по краям магнитопровода превышает 12 градусов и обозначен на диаграмме символом  $\delta$ . Причиной тому служат краевые эффекты индуктора.

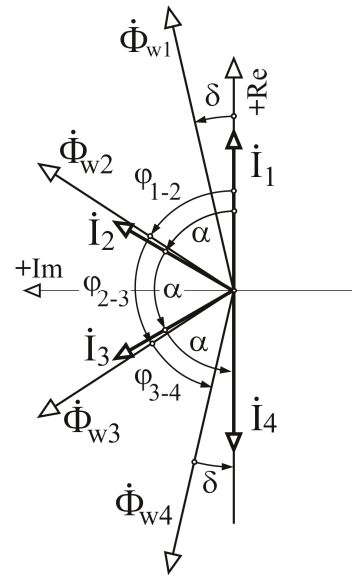


Рис. 14. Векторная диаграмма токов и магнитных потоков ярма ИМ

Таким образом, посредством численного эксперимента на нелинейной модели ИМ (рис. 12) проведено уточнение первоначально заданного распределения магнитных потоков в индукторе. Нужно отметить, что обозначения для фазовых сдвигов  $\varphi_{1-2}$ ,  $\varphi_{2-3}$ ,  $\varphi_{3-4}$ ,  $\varphi_{4-5}$  на рис. 13 характерны для магнитных потоков в зубцах, а  $\varphi_{1-2}$ ,  $\varphi_{2-3}$ ,  $\varphi_{3-4}$  на рис. 14 – для потоков в ярме, и поэтому не совпадают. Для определения интегральных тяговых усилий ИМ используют амплитуды магнитного поля в зубцах, в то время как характеристики магнитного поля в ярме  $\Phi_{w1}$ ,  $\Phi_{w2}$ ,  $\Phi_{w3}$ ,  $\Phi_{w4}$  определяют степень насыщения стали и напрямую в расчете рабочих характеристик не используют.

Практическому применению комплексов ЭМП в металлургическом производстве сопутствует большое число технических задач, для исследования которых можно применить описанные методы и средства. Помимо искажения симметрии напряжений и токов во вторичных цепях системы электропитания электромагнитных перемешивателей, аналогичные проблемы возникают в первичных цепях. Особенности технологического режима индукторов продольного магнитного поля и частотных инверторов обуславливают крайне высокий уровень искажения токов в распределительной

сети предприятия. Массовое применение металлургических ИМ может создать условия, чтобы рассматривать необходимость перевода питания комплексов ЭМП по «короткой сети».

Экспериментальная оценка характера искажений на шинах РП подтвердила, что коэффициент гармоник по токам в номинальном режиме трёхфазного индукционного перемешивателя с частотным инвертором мощностью 400 кВА может достигать значения 65 %. При одновременной работе в цехе нескольких комплексов ЭМП уровень искажения напряжений в сети может превышать 12-15 %. Это значительно превышает установленное ГОСТом ограничение по качеству электроэнергии [16]. Учитывая существенные значения единичных мощностей электропотребления индукционных установок и печей можно рекомендовать применение вместо магистрального питания преимущественно радиальных схем электропитания с подключением каждого ЭМП от отдельного цехового распределительного пункта. Кроме того, представляется целесообразным проведение исследования с оценкой технико-экономической эффективности установки в каждом комплексе ЭМП собственного фильтро-компенсационного устройства [17]. Такие меры позволят локализовать распределение высших гармоник тока и напряжения в цеховой сети и снизить уровень искажения напряжений в распределительной сети металлургического предприятия в целом. Решение проблемы ухудшения качества электроэнергии, обусловленной насыщением стали индукционных машин, несимметрией токов в обмотках и применением частотных инверторов в системе электропитания требует отдельной тщательной проработки, поэтому выделено в отдельный проект.

### Выводы

Индукторы для комплексов электромагнитного перемешивания расплавов создают с применением комплексных решений в системах электроснабжения индукционных машин. При этом необходимо учитывать следующие факты.

1. Применение метода симметричных составляющих на предварительном этапе расчета режима электропитания трёхфазных индукционных машин позволяет определить характер несимметрии электромагнитного режима и сравнительно легко оценить интенсивность

токов обратной и нулевой последовательностей для разных схем включения обмоток.

2. Анализ режима электропитания трёхфазной индукционной машины по упрощенной методике даёт представление о возможных режимах работы ШИМ-инвертора и позволяет на первом этапе сформулировать совокупность требований к источнику питания комплекса электромагнитного перемешивания.

3. Применение упрощенного подхода и использование метода симметричных составляющих не исключает последующих этапов уточнённого расчета и математического моделирования индукционной машины, поскольку не учитывает насыщения магнитопровода.

4. Всё многообразие схем соединения трёхфазных индукционных машин с инвертированными секциями или фазами, в том числе при наличии расщеплённых обмоток, может быть исследовано в упрощенном подходе, причём по методу симметричных составляющих легко показать предпочтительность включения индуктора треугольником.

5. Переход к конструированию двухфазных индукционных машин, обладающих рядом конструктивно-технологических достоинств, можно считать определенным ограничением применения метода симметричных составляющих.

### Литература

1. Вольдек А.И. Индукционные МГД-машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
2. Tyarin A.A. The structure of electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal (Global Science Center LP, Ljubljana). 2018. № 20-1. P. 50-57.
3. Вольдек А.И. Искажение симметрии напряжений и токов в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом // Известия вузов. Электромеханика. 1960. № 5. С. 78.
4. Tyarin A.A. Inductors for electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal (Global Science Center LP, Ljubljana). 2018. № 19-1. P. 64-67.
5. Круминь Ю.И. Взаимодействие бегущего магнитного поля с проводящей средой. Рига: Зинатне, 1969. 259 с.
6. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л.: Энергroatомиздат, 1983. 180 с.
7. Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом / Г.А. Баранов, В.А. Глухих и др. М.: Атомиздат, 1978. 248 с.
8. Формализация задач выбора эффективного варианта распределенных систем управления / С.Н. Ефимов, И.А. Панфилов, Е.С. Семенкин, В.А. Терсков // Вестник СибГАУ: сб. науч. тр. Красноярск: СибГАУ, 2003. Вып. 4. С. 24-31.

9. Морозов, Е.А. ANSYS в руках инженера / Е.А. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. М.: Лепан, 2018. 456 с.

10. Ефимов С.Н., Ереско С.П., Сопов Е.А. Применение метода генетического программирования для задач символьной регрессии при обработке результатов экспериментов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2004. № 2. С. 42-46.

11. Программно-методический комплекс компьютерного моделирования электротехнических систем / Е. С. Кинев и др. // Перспективы и проблемы высшего образования: сб. тез. науч.-метод. конф. Красноярск: КГТУ, 1996. С. 34 – 35.

12. Бартьев О.В. Современный Фортран. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. 449 с.

13. Моделирование динамических систем в ПМК теории цепей / Е.С. Кинев и др. // Оптимизация режимов

систем электроприводов: межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000. С. 210–228.

14. Gryuner A.I., Kinev E.S., Pavlov V.A. Analysis of the electromagnetic field in a rotor represented by a magnetic circuit with distributed constants // Электричество. 1991. № 5. С. 68-70.

15. Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем / Е.С. Кинев и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 12. С. 35-40.

16. Долингер С.Ю. Повышение эффективности технических средств обеспечения качества электроэнергии в распределительных сетях: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2012. 176 с.

17. Розанов Ю.К., Гринберг Р.П. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения // Электротехника. 2006. № 10. С. 55-60.

Поступила 08.10.2018; принята к публикации 30.11.2018

#### Информация об авторах

**Кинев Евгений Сергеевич** – канд. техн. наук, директор ООО «Тепловые электрические системы» (660041, Россия, г. Красноярск, Свободный проспект, 75), e-mail: Kinev\_ES@ontecom.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-3549>

**Тяпин Алексей Андреевич** – инженер-исследователь ООО «Тепловые электрические системы» (660041, Россия, г. Красноярск, Свободный проспект, 75), аспирант, Сибирский федеральный университет (660041, Россия, г. Красноярск, Свободный проспект, 79), e-mail: ceo@tamerlan-krk.ru, тел. 923-354-54-14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3266-5571>

**Ефимов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Эксплуатация железных дорог», Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения) (660028, Россия, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2И), e-mail: efimov@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4506-3510>

### EVALUATION OF THE ASYMMETRY OF AN INDUCTION MACHINE BY THE METHOD OF SYMMETRIC COMPONENTS

E. S. Kinev<sup>1</sup>, A. A. Tyapin<sup>1,2</sup>, S. N. Efimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Co Ltd Thermal electric systems, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, the branch of  
Irkutsk State University of Transport, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract:** the article describes the features of the calculation and simulation of induction technological equipment intended for mixing liquid aluminum in furnaces and mixers. Instead of mechanical mixing in modern production, inductive magnetohydrodynamic (MHD) devices of longitudinal or transverse magnetic field are widely used. New furnaces are certainly equipped with MHD complexes consisting of an inductor and a power source. Furnaces of previous generations are subjected to modernization, during which they are equipped with MHD-agitators. The task of choosing the type of MHD machine is solved for each shop individually, based on the characteristics and price. The inductors of the longitudinal and transverse fields are different in design, efficiency, power supply modes, and cost. In addition, technological systems may differ in the type and characteristics of power sources. When creating induction machines, complex solutions are used to match the optimized electromagnetic system of the inductor and the power supply regime allowed in the power supply system. Power supply of inductors of a longitudinal magnetic field on furnaces with aluminum is provided with the help of three-phase IGBT inverters at a frequency of about 1 Hz. Acceptable reliability and sufficient control flexibility provide transistor frequency converters with single capacity of hundreds of kVA. For linear induction machines, the presence of an open magnetic circuit is characteristic; therefore, the power supply of multiphase windings turns out to be asymmetric. Asymmetry of the currents, as well as edge effects, can lead to a distortion of the traveling magnetic field and reduce the integral tractive force of the induction machine. The article shows that the evaluation of the asymmetry of the electromagnetic mode for different switching circuits of the windings of three-zone and four-zone MHD machines of the longitudinal magnetic field can be performed using the method of symmetrical components

**Key words:** asymmetry of the three-phase induction machine, electromagnetic inductor, traveling magnetic field, electromagnetic stirrer, power supply system of the induction machine, the method of symmetrical components, negative sequence currents, frequency inverter

References

1. Voldek A.I. "Induction MHD machines with liquid metal working body" ("Induktsionnye MGD-mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom"), Leningrad, Energiya, 1970, 272 p.
2. Tyapin A.A. "The structure of electromagnetic stirrers", *Znanstvena Misel Journal*, Global Science Center LP, Lubljana, 2018, no. 20-1, pp. 50-57.
3. Voldek A.I. "Distortion of the symmetry of voltages and currents in induction machines with an open magnetic circuit", *Proceedings of universities, Electromechanics (Izvestiya vuzov, Elektromekhanika)*, 1960, no. 5, 78 p.
4. Tyapin A.A. "Inductors for electromagnetic stirrers", *Znanstvena Misel Journal*, Global Science Center LP, Lubljana, 2018, no. 19-1, pp. 64-67.
5. Krumin' Yu.I. "Interaction of a traveling magnetic field with a conducting medium" ("Vzaimodeystvie begushchego magnitnogo polya s provodyashchey sredoy"), Riga, Zinatne, 1969, 259 p.
6. Yamamura S. "Theory of linear asynchronous motors" ("Teoriya lineynykh asinkhronnykh dvigateley"), Leningrad, Energoatomizdat, 1983, 180 p.
7. Baranov G.A., Glukhikh V.A., et al. "Calculation and design of induction MHD-machines with liquid metal working body" ("Raschet i proektirovaniye induktsionnykh MGD-mashin s zhidkometallicheskim rabochim telom"), Moscow, Atomizdat, 1978, 248 p.
8. Efimov S.N., Panfilov I.A., Semenkin E.S., Terskov V.A. "Formalization of the problems of choosing an effective variant of distributed control systems", *Vestnik SibSAU, Sci. papers*, Krasnoyarsk, 2003, no. 4, pp. 24-31.
9. Morozov E.A., Muzemnek A.Yu., Shadskiy A.S. "ANSYS in the hands of an engineer" ("ANSYS v rukakh inzhenera"), Moscow, Lenand, 2018, 456 p.
10. Efimov S.N., Eresko S.P., Sopov E.A. "Application of the method of genetic programming for problems of symbolic regression in processing the results of experiments", *Information technologies in design and production (Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve)*, 2004, no. 2, pp. 42-46.
11. Kinev E.S. et al. "Software and methodological complex of computer simulation of electrical systems", *Coll. papers sci.-method. conf.: Prospects and problems of higher education (Perspektivy i problemy vysshego obrazovaniya: Sb. tezisov nauch.-metod. konf.)*, Krasnoyarsk, KSTU, 1996, pp. 34-35.
12. Barten'yev O.V. "Modern Fortran" ("Sovremennyy Fortran"), Moscow, DIALOG-MIFI, 2000, 449 p.
13. Kinev E.S. et al. "Modeling of dynamic systems in the PMC of the theory of circuits", *Coll. sci. papers: Optimization of modes of electric drive systems (Optimizatsiya rezhimov sistem elektroprivodov. mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Krasnoyarsk, IPTS KSTU, 2000, pp. 210-228.
14. Gryuner A.I., Kinev E.S., Pavlov V.A. "Analysis of the electromagnetic field in a rotor represented by a magnetic circuit with distributed constants", *Electricity*, 1991, no. 5, pp. 68-70.
15. Kinev E.S. et al. "Parametric optimization of multiphase induction systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 12, pp. 35-40.
16. Dolinger S.Yu. "Improving the efficiency of technical means to ensure the quality of electricity in distribution networks: Cand. tech. sci. diss." ("Povyshenie effektivnosti tekhnicheskikh sredstv obespecheniya kachestva elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh. diss. uch. st. kand. tekhn. nauk"), Omsk, OmSTU, 2012, 176 p.
17. Rozanov Yu. K., Grinberg R.P. "Hybrid filters for reducing the non-sinusoidal current and voltage in power supply systems", *Electrical Engineering (Elektrotehnika)*, 2006, no. 10, pp. 55-60.

Submitted 08.10.2018; revised 30.11.2018

Information about the authors

**Evgeniy S Kinev**, Cand. Sc. (Technical), Director of Co Ltd "Thermal Electric Systems" (75 Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk 660041, Russia), e-mail: Kinev ES@ontecom.com, tel. 962-077-95-18, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3658-3549>

**Aleksey A. Tyapin**, Research Engineer of Co Ltd "Thermal Electric Systems" (75 Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk 660041, Russia), Graduate Student of Krasnoyarsk State Technical University (79 Svobodnyy prospekt, Krasnoyarsk 660041, Russia), e-mail: ceo@tamerlan-krk.ru, tel. 923-354-54-14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3266-5571>

**Sergey N. Efimov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, the branch of Irkutsk State University of Transport (2I Novaya Zarya str., Krasnoyarsk 660028, Russia), e-mail: efimov@bk.ru, tel. 913-550-37-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4506-3510>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, Н.Н. Кожухов, Д.А. Прутских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** на нужды вентиляции и кондиционирования воздуха предприятиями различных отраслей промышленности, а также жилыми и общественными помещениями расходуется значительное количество тепловой энергии. Проектирование современных тепловых энергоустановок может дать значительный экономический эффект при их эксплуатации. Одним из основных резервов энергосбережения в системах вентиляции и кондиционирования в жилых и производственных помещениях является использование водоиспарительного охлаждения воздуха. Наибольший эффект достигается путем применения воздухоохладителя с «кипящим» центробежным слоем. Насадкой для такого слоя служат мелкие частицы материала, которые являются теплоносителем для регенеративной передачи тепловой энергии. Такие технико-экономические параметры, как стоимость изготовления аппарата, коррозионная стойкость, смачиваемость материала, удельная площадь поверхности контакта фаз являются ключевыми при определении эффективности работы воздухоохладителя. На основе теоретических и экспериментальных разработок проведены оценка принципиальной возможности работы аппарата с «кипящим» слоем и расчет его тепловой эффективности. Результаты исследований представлены аналитическими и эмпирическими уравнениями. В ходе их решения оказалось возможным получить значения основных параметров воздухоохладителя. Результаты исследования подтвердили высокую эффективность аппарата и могут быть использованы для его расчета

**Ключевые слова:** водоиспарительное охлаждение, математическая модель, псевдооживленный слой, экспериментальная установка, коэффициент тепловой эффективности

### Введение

Для предприятий практически всех отраслей промышленности, а также помещений общественного назначения требуется значительное количество тепловой энергии для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Заметному росту экономического эффекта способствует грамотное проектирование теплоснабжения для установок входящих в состав таких систем [1-3].

С целью снижения энергетических затрат возможно использование ветровой, солнечной, геотермальной энергии и других нетрадиционных источников. Применение природных градиентов температур также относится к одному из способов энергосбережения. Водоиспарительное охлаждение, основу которого составляет термодинамическая неравномерность воздуха окружающей среды, является возобновляемым источником энергии. Это физическое явление с успехом можно использовать для систем кондиционирования и вентиляции помещений различного назначения [4, 5]. Конечные технические решения заключаются в применении специальных аппаратов и устройств, к которым относится и рассматриваемый в данной работе воздухоохладитель.

Приведем технико-экономические параметры насадки, которые являются ключевыми при определении эффективности работы воздухоохладителя испарительного типа: коррозионная стойкость, смачиваемость материала, удельная площадь поверхности контакта фаз, интенсивность тепломассообмена, стоимость. Указанным требованиям и достижению требуемых значений приведенных характеристик отвечает насадка в виде «кипящего» (псевдооживленного) слоя, которая используется в качестве теплоносителя для регенеративной передачи тепловой энергии [6-8].

Принципиальная схема рассматриваемого воздухоохладителя представлена на рис. 1 [9]. Здесь в корпусе 1 размещена решетка 2 с лопатками 3, расположенными под углом к решетке. Корпус включает в себе сухую и влажную 4, 5 камеры. Конус 6 располагается в центральной части аппарата и крепится с помощью перегородок 7, в которых имеются окна 8 (совпадают с контуром «кипящего» слоя) для транспортировки теплоносителя. В нижней части воздухоохладителя расположена водяная форсунка 9.

Принцип действия устройства. Основной поток воздуха, предназначенного для помещений, проходит через сухую камеру 4 аппарата. Вспомогательный поток – через камеру 5, в которой насадка увлажняется с помощью воды из форсунки 9. За счет подачи вспомогательного потока воздуха дисперсный материал преобра-

зуется в так называемый «кипящий» слой, а благодаря решетке 2 он перемещается вдоль нее. В «кипящем» слое во влажной камере происходит полное испарение воды с поверхности частиц, за счет чего они охлаждаются. После транспортировки дисперсного охлажденного материала в сухую камеру 4 основной поток воздуха, имеющий более высокую температуру (по сравнению с температурой частиц дисперсного материала), охлаждается и направляется к потребителю.

### Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена

Определим время полного испарения воды с поверхности частицы в камере 5, применяя уравнение теплового баланса. Для определения времени высыхания частицы во «влажной» камере запишем уравнение теплового баланса, полагая, что за время  $dt$  объем воды на поверхности частицы уменьшится на величину  $dv$

$$qf_q d\tau = -\rho_{ж} [c_{ж}(t_{нас} - t_{ж}) + r_n] dv, \quad (1)$$

где  $q$  - удельная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $dv$  - единичный объем испаренной воды, м<sup>3</sup>;  $f_q$  - площадь поверхности одной частицы дисперсного материала, м<sup>2</sup>;  $d\tau$  - время испарения воды объемом  $dv$ ;  $\rho_{ж}$  - плотность воды;  $c_{ж}$  - теплоемкость воды, Дж/(кг·К);  $t_{нас}$  - температура насыщения, К;  $t_{ж}$  - температура воды, К;  $r_n$  - скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

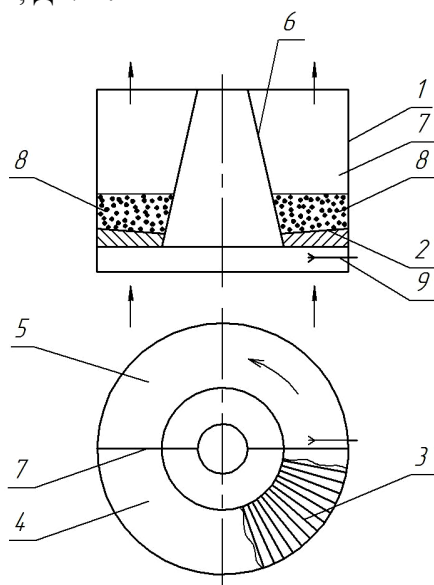


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата

Учитывая, что  $dv = f_q dr$ , получим

$$\tau = -\int_{r+\delta}^r \frac{\rho_{ж} [c_{ж}(t_{нас} - t_{ж}) + r_n]}{q} dr, \quad (2)$$

где  $r$  - диаметр частицы, м;  $\delta$  - толщина водяной плёнки на поверхности одной частицы дисперсного материала.

Конвективный процесс переноса тепловой энергии между поверхностью частицы и потоком воздуха приводит к следующему выражению для определения плотности теплового потока, основанного на законе Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha(t_b - t_{нас}), \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи между дисперсным материалом и потоком воздуха в камере 5;  $t_b$  - температура вспомогательного потока.

Исходя из предположения о малом влиянии водяной пленки на поверхности дисперсного материала на интенсивность теплообмена между различными фазами в аппарате (твердые частицы и поток воздуха), определим коэффициент теплоотдачи по формуле [10-12]:

$$Nu = 0,51 Re^{0,65}, \quad (4)$$

где

$$Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda_b}, \quad Re = \frac{w_b d_3}{\nu_b}.$$

Здесь  $\lambda_b$  - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/м<sup>2</sup>;  $\nu_b$  - кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $d_3$  - эквивалентный диаметр частицы дисперсного материала, м;  $w_b$  - скорость воздуха, м.

Решая совместно (2), (3) и (4), после интегрирования получим

$$\tau = \frac{\rho_{ж} [c_{ж}(t_{нас} - t_{ж}) + r_n]}{0,42 \lambda_b w_b^{0,65} \nu_b^{-0,65} (t_b - t_{нас})} \times [(r + \delta)^{0,65} - r^{0,65}]. \quad (5)$$

Рассматривая элементарный объем «кипящего» слоя дисперсного материала, определено температурное поле в камере 4 воздухоохладителя путем составления и решения системы дифференциальных уравнений теплового баланса и уравнения (3) [13]. В результате для температуры воздуха в зависимости от высоты слоя насадки получено следующее выражение

$$t_b = t_n + (t'_b + t'_n) \exp\left(-\frac{\alpha(1-\varepsilon)f_v}{c_b w_b \rho_b} y\right), \quad (6)$$

где  $t_n$  – температура насадки, К;  $t'_b, t'_n$  – температура воздуха и насадки на входе в камеру 4, К;  $\varepsilon$  – порозность слоя насадки;  $f_v$  – удельная поверхность слоя насадки,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $\rho_b$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_b$  – теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $y$  – высота, м.

Особенности «кипящего», или, другими словами, псевдооживленного слоя указывают на независимость температуры частиц дисперсного материала от координаты  $y$ , следовательно, для координаты  $x$ , можно получить следующее выражение [13]:

$$t_n = t'_n + (t'_b - t'_n) \exp \left\{ - \frac{c_b w_b \rho_b x}{c_n w_n (1 - \varepsilon) \rho_n h} \times \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\alpha f_v h (1 - \varepsilon)}{c_b \rho_b} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $\rho_n$  – плотность насадки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c_n$  – теплоемкость насадки,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $w_n$  – скорость движения насадки,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $h$  – высота насадки, м;  $x$  – координата, м.

### Описание экспериментальной установки

Для оценки адекватности разработанной математической модели и получения значений технических параметров воздухоохладителя в рамках работы произведены экспериментальные исследования на стенде, фото которого представлено на рис. 2.

Составной частью указанного стенда являлся основной элемент воздухоохладителя, представленный в виде двух соосных цилиндрических обечаек, диаметры которых составляли 0,20 м и 0,38 м соответственно. Высота корпуса аппарата равнялась 0,50 м. Дисперсный материал в виде твердых частиц находится на решетке, расположенной в нижней части основного элемента. Движение потоков воздуха и насадки соответствовало принципу действия устройства, описанному выше. Для изменения скорости насадки и изучения различных режимов работы воздухоохладителя было использовано несколько решеток с различными геометрическими характеристиками. Так, высота лопаток составила 20, 30 и 40 мм, а угол расположения лопаток – 0,55, 1,00 и 1,25 градуса. С целью визуализации «кипящего» слоя и наблюдения за поведением дисперсного материала цилиндрическая обечайка диаметром 0,38 м выполнена из термопластичного прозрачного пластика (plexiglas).

Действие центробежной силы на дисперсный материал в аппарате приводило к возникновению зон, в которых отсутствовали частицы дисперсного материала. В частности, вблизи поверхности обечайки диаметром 0,20 м основной и вспомогательный потоки воздуха не взаимодействовали с дисперсной насадкой. Поэтому для предотвращения этого явления несколько вариантов решетки конструктивно были исполнены в виде усеченного конуса, напоминающего велосипедный трек. Диапазон значений угла такого конуса составлял от 1,05 до 1,57 радиан.

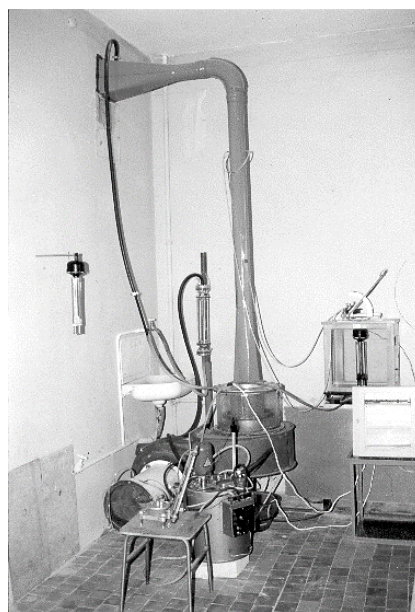


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Для моделирования работы воздухоохладителя в составе вентиляционной системы или системы кондиционирования основной и вспомогательный потоки воздуха подавались в соответствующие камеры 4 и 5 вентиляторами ВЦ 10-28 № 3 максимальной производительностью  $3500 \text{ м}^3/\text{ч}$  и напором 4500 Па. Для регулирования расхода воздуха использовался подключенный к вентиляторам трехфазный частотный преобразователь DELTA 15 кВт. Для имитации воздуха, поступающего из помещения общественного типа, использовалась электрокалориферная установка ЭКО-100 совместно с автотрансформатором РНО-50-5 для плавного регулирования температуры воздуха. Расход воздуха в подводящем канале определялся расчетом, включающим скорость воздуха, измеренную анемометром ТТМ-2/4-06. Разность давлений в камерах 4 и 5 аппарата измерялась микро-

манометром высокой точности ММН-240. Определение полей температур в камерах воздухоохладителя осуществлялось термопарами хромель-копелевого типа ТП-0188. Температура частиц дисперсного материала измерялась инфракрасным бесконтактным термометром с токовым выходом 4-20 мА. Материалом частиц являлись алюмоцинковый сплав плотностью 2850 кг/м<sup>3</sup> и песок плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>. Диаметр частиц выбирался из ряда  $d_3 = 2,6; 2,9; 4,6$  и  $5,0$  мм и  $d_3 = 2,7$  и  $3,2$  мм соответственно. Общая масса всей насадки находилась в диапазоне от 0,5 до 3,5 кг. Для смачивания частиц использовалась форсунка, регулирующая расход в пределах 0,0004..0,0024 кг/с.

Для автоматического сбора данных измеряемых параметров и их архивирования сигналы с первичных датчиков поступали в программируемый логический контроллер ТРМ148 фирмы ОВЕН. Для удобства все параметры можно было анализировать на ноутбуке в системе SCADA Owen Process Manager и Owen Report Viewer. Персональный компьютер присоединялся к ТРМ148 с помощью преобразователя интерфейсов RS448-RS232 АС4, имеющим выход USB.

### Результаты экспериментальных исследований

Для проведения эксперимента разработана следующая методика. На первом этапе материал массой от 0,5 до 3,5 кг размещался на поверхности газораспределительной решётки аппарата. После включения вентиляторов посредством частотного регулятора настраивался расход воздуха для каждой из камер таким образом, чтобы «кипящий» слой оказывался устойчиво циркулируемым в камерах аппарата. Для увлажнения частиц дисперсного материала использовалась вода, которая поступала в механическую форсунку для распыления во влажной камере. После наступления квазистационарного режима течения циркулирующего слоя из архива экспериментальных данных извлекалась информация о расходах в двух камерах аппарата и температурных полях этих же камер. Температурные поля основного и вспомогательного потоков оценивались 12 термопарами. Кроме того, фиксировалось гидравлическое сопротивление каждой из камер. Путём изменения массы насадки, расхода и температуры

воздуха исследовано более 50 режимов работы экспериментальной установки.

Коэффициент эффективности определим по формуле

$$\eta = \frac{t'_B - \bar{t}''_B}{t'_B - t_M} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $\bar{t}'_B$  – среднеинтегральная температура воздуха на выходе из камеры 4, К;  $t_M$  – температура «мокрого» термометра, К [8].

В результате аппроксимации экспериментальных данных для определения коэффициента тепловой эффективности воздухоохладителя и его гидравлического сопротивления были получены следующие эмпирические соотношения

$$\eta = 3,17 \left( \frac{w_B}{w_B^{\min}} \right)^{1,02} \left( \frac{h_0}{d_3} \right)^{0,94}; \quad (9)$$

$$Eu = 0,07 Re^{-0,19} \left( \frac{h_0}{d_3} \right)^{0,68} \left( \frac{\rho_H}{\rho_B} \right)^{0,69}, \quad (10)$$

где  $w_B^{\min}$  - минимальная скорость воздуха, м/с;  $h_0$  - «насыпная» высота слоя насадки, м;

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho_B w^2}$  - критерий Эйлера.

Минимальная скорость воздуха, соответствующая критической скорости псевдооживления дисперсного материала насадки, определялась как [17, 18]

$$w_B^{\min} = \sqrt{\frac{4\varepsilon^2 \rho_H g d_3}{3c_d \rho_B}}, \quad (11)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $c_d$  - коэффициент лобового сопротивления частиц дисперсного материала насадки.

### Оптимизация воздухоохладителя

Для повышения технико-экономических показателей исследуемого аппарата следует более углубленно рассмотреть его конструктивные и рабочие характеристики. Наиболее универсальными критериями оптимизации теплоэнергетического оборудования являются экономический эффект или удельные приведённые затраты. Но указанные критерии удобно использовать на стадии промышленных испытаний или в процессе эксплуатации на предприятии, когда известна вся технологическая схема, включающая исследуемое оборудование. К тому же учёт стоимости тепловой и электрической энергии, технологической об-



вязки воздухоохладителя, цен на материалы для его изготовления вносят значимые погрешности в результаты расчёта таких критериев из-за их ежегодного изменения в силу экономической ситуации и расширяющихся санкций. Поэтому требуется найти такой критерий оптимизации, который не зависел бы от указанных факторов. Нами предлагается использовать теплогидродинамический показатель с учётом КПД оборудования, в котором производится тепловая и электрическая энергии. В результате критерий оптимизации, согласно которому необходимо оценивать аппарат, представляет собой следующее соотношение:

$$E = \frac{Q\eta_0}{N\eta_x}, \quad (12)$$

где  $Q$  - количество тепловой энергии, отводимое от основного потока воздуха в камере 4, Вт;  $N$  - электрическая мощность, расходуемая для привода вентиляторов, Вт;  $\eta_0$ ,  $\eta_x$  - КПД электрической станции и холодильной установки соответственно.

Тепловой поток в камере 4 определим по формуле

$$Q = V_B \rho_B c_B (t_B - t_M) \eta. \quad (13)$$

А электрическую мощность для привода вентиляторов определим следующим образом

$$N = \frac{V_B \Delta P}{\eta_B}, \quad (14)$$

где  $\Delta P$  - гидравлическое сопротивление аппарата, Па;  $V_B$  - расход основного потока воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $t_B$ ,  $t_M$  - температуры атмосферного воздуха по сухому и мокрому термометру, К;  $\eta$  - коэффициент тепловой эффективности воздухоохладителя;  $\eta_B$  - КПД вентилятора.

Результаты расчёта показали, что такие параметры как скорость воздуха во влажной и сухой камерах аппарата и относительная высота слоя дисперсного материала максимально влияют на поиск оптимального технического решения при проектировании воздухоохладителя. Графики зависимости теплогидродинамического показателя от двух параметров приведены на рис. 3 и 4.

На рис. 3 видно, что оптимальное значение скорости воздуха в камерах аппарата соответствует ее минимальному значению. Однако для устойчивой циркуляции насадки окончательно можно рекомендовать следующее соотношение для ее определения

$$w_B = (1,3 \div 1,4) w_B^{\text{мин}}. \quad (15)$$

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4, показывает, что наибольшая эффективность воздухоохладителя может быть достигнута при использовании тонких слоев насадки, когда «насыпная» высота дисперсного материала находится в следующих пределах

$$h_0 = (15 \div 25) d_s. \quad (16)$$

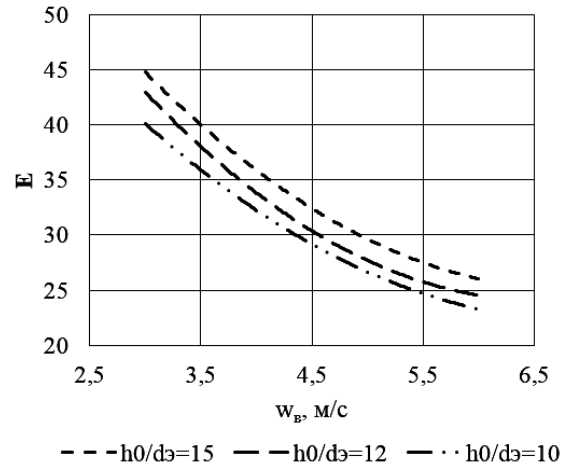


Рис. 3. График зависимости коэффициента тепловой эффективности от скорости оживающего газа

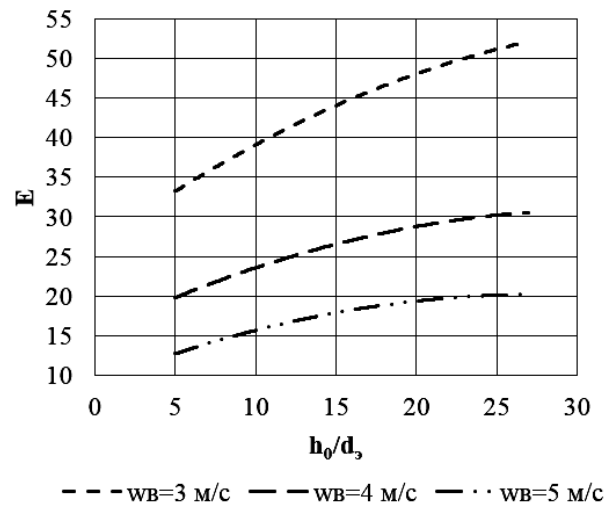


Рис. 4. График зависимости коэффициента тепловой эффективности от относительной высоты слоя

Полученные соотношения и рекомендации могут быть использованы для расчета воздухоохладителя данного типа.

### Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили работо-

способность и высокую тепловую эффективность воздухоохладителя с «кипящим» слоем. Результаты проведенных исследований следует использовать при проектировании аппаратов подобного типа.

#### Литература

1. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. М.: Стройиздат, 1983. 416 с.
2. Богуславский Л.Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции. М.: Стройиздат, 1985. 336 с.
3. Comino, F., Ruiz de Adana, M., Peci, F. Energy saving potential of a hybrid HVAC system with a desiccant wheel activated at low temperatures and an indirect evaporative cooler in handling air in buildings with high latent loads // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 131. P. 412-427.
4. Кокорин О.Я. Испарительное охлаждение для целей кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1965. 159 с.
5. Performance improvement of a hybrid air conditioning system using the indirect evaporative cooler with internal baffles as a pre-cooling unit / А.Е. Kabeel, М. Abdelgaied, R. Sathyamurthy, Т. Arunkumar // Alexandria Engineering Journal. 2017. 56 (4). P. 395-403.
6. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.В. Основы техники псевдооживления. М.: Химия, 1967. 664 с.
7. Бараков А.В. Процессы и аппараты с перемещающимся псевдооживленным слоем. Воронеж: ВГТУ, 2004. 115 с.
8. Моделирование тепломассообмена в воздухоохладителе косвенно-испарительного типа / А.В. Бараков, Н.Н. Кожухов, Д.А. Прутских, В.Ю. Дубанин // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2015. № 4 (40). С. 28-33.

9. Пат. 59786 Российская Федерация F28D 15/00. Воздухоохладитель / Агапов Ю.Н., Бараков А.В., Наумов А.М. № 200611488/22; Бюл. № 36. 3 с.

10. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 496 с.

11. Исследование воздухоохладителя косвенно-испарительного типа с дисперсной насадкой / А.В. Бараков, В.Ю. Дубанин, Д.А. Прутских, А.М. Наумов // Промышленная энергетика. 2010. № 11. С. 37-40.

12. Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Прутских Д.А. Исследование теплообмена в регенераторе с дисперсной насадкой // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 4 (48). С. 45-46.

13. Прутских Д.А. Гидродинамика и теплообмен в регенераторе с дисперсной насадкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04: защищена 26.02.09 / Прутских Дмитрий Александрович. Воронеж, 2009. 108 с.

14. Cooling performance measurement of two cross-flow indirect evaporative coolers in general and regenerative operation modes / H.-J. Kim, S.-W. Ham, D.-S. Yoon, J.-W. Jeong // Applied Energy. 2017. Vol. 195. P. 268-277.

15. Фалеев В.В., Бараков Р.А. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в перемещающемся псевдооживленном слое // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Серия «Энергетика». 2001. Вып. 1. С. 28-31.

16. Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Прутских Д.А. Исследование гидродинамики регенератора с дисперсной насадкой // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 1. С. 47-48.

17. Оценка гидравлического сопротивления и межфазного теплообмена в центробежном псевдооживленном слое / Ю.Н. Агапов, А.В. Бараков, А.В. Жучков, А.В. Санников // Химическая промышленность. 1986. № 4. С. 61.

18. Агапов Ю.Н. К определению скорости движения центробежного псевдооживленного слоя // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 6. С. 46-48.

Поступила 20.09.2018; принята к публикации 30.11.2018

#### Информация об авторах

**Бараков Александр Валентинович** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pt\_vstu@mail.ru

**Дубанин Владимир Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: shadow842003@mail.ru

**Кожухов Николай Николаевич** - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: k0zhukhov@yandex.ru

**Прутских Дмитрий Александрович** - канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: \_dap\_@rambler.ru

## VENTILATION SYSTEMS ENERGY EFFICIENCY INCREASING IN LIVING QUARTERS AND INDUSTRIAL PREMISES

**A.V. Barakov, V.Yu. Dubanin, N.N. Kozhukhov, D.A. Prutskikh**

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

**Abstract:** a significant amount of thermal energy is consumed by enterprises of various industries, as well as residential and public premises for the needs of ventilation and air conditioning. Designing modern thermal power plants can provide a significant economic effect during their operation. One of the main reserves of energy saving in the systems of ventilation and air conditioning in residential and industrial premises is the use of water evaporative air cooling. The greatest effect is achieved

through the use of an air cooler with a "boiling" centrifugal layer. The nozzle for such a layer is represented by small particles of material that serve as a coolant for the regenerative transfer of thermal energy. Such technical and economic parameters as the cost of manufacture of the apparatus, corrosion resistance, wettability of the material, the specific surface area of the contact of the phases are key factors in determining the efficiency of the air cooler. On the basis of theoretical and experimental developments, an assessment was made of the fundamental possibility of operating a fluidized bed apparatus and calculating its thermal efficiency. The research results are presented by analytical and empirical equations. As a result of their solution, it was possible to obtain the values of the basic parameters of the air cooler. The results of the study confirmed the high efficiency of the device and can be used to calculate it

**Key words:** water- evaporative cooling, mathematical model, fluidized bed, experimental plant, coefficient of thermal efficiency

### References

1. Peregudov V.V., Rogovoy M.I. "Thermal processes and apparatus in the technology of building products and parts" ("Teplovye protsessy i ustanovki v tekhnologii stroitel'nykh izdeliy i detaley"), Moscow, Stroyizdat, 1983, 416 p.
2. Boguslavskiy L.D. "Reduction of energy consumption during operation of heating and ventilation systems" ("Snizhenie raskhoda energii pri rabote sistem otopeniya i ventilyatsii"), Moscow, Stroyizdat, 1985, 336 p.
3. Comino F., Ruiz de Adana M., Peci F. "Energy saving potential of a hybrid HVAC system with a desiccant wheel activated at low temperatures and an indirect evaporative cooler in handling air in buildings with high latent loads", *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 131, pp. 412-427.
4. Kokorin O.Ya. "Evaporative cooling for air conditioning purposes" ("Isparitel'noe okhlazhdenie dlya tseley konditsionirovaniya vozdukh"), Moscow, Stroyizdat, 1965, 159 p.
5. Kabeel A.E., Abdelgaied M., Sathyamurthy R., Arunkumar T. "Performance improvement of a hybrid air conditioning system using the indirect evaporative cooler with internal baffles as a pre-cooling unit", *Alexandria Engineering Journal*, 2017, vol. 56 (4), pp. 395-403.
6. Gelperin N.I., Einshtein V.G., Kvasha V.V. "Basic techniques of fluidization" ("Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya"), Moscow, Khimiya, 1967, 664 p.
7. Barakov A.V. "Processes and apparatus with fluidized bed" ("Protsessy i apparaty s peremeshchayushchimsya psevdoozhizhennym sloem"), Voronezh State Technical University, 2004, 115 p.
8. Barakov A.V., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Dubanin V.Yu. "Modelling of heat and mass transfer in the indirect evaporative air cooler", *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture (Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura)*, 2015, no. 4 (40), pp. 28-33.
9. Agapov Yu.N., Barakov A.V., Naumov A.M. "Air cooler", patent RF no. 59786 F28D 15/00, no. 200611488/22, bul. 36, 3 p.
10. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. "Technical thermodynamics" ("Tekhnicheskaya termodinamika"), Moscow, MEI, 2008, 496 p.
11. Barakov A.V., Dubanin V.Yu., Prutskikh D.A., Naumov A.M. "Investigation of an air cooler of indirect evaporative type with a dispersed packing", *Industrial Energy (Promyshlennaya energetika)*, 2010, no. 11, pp.37-40.
12. Barakov A.V., Dubanin V.Yu., Prutskikh D.A. "Investigation of heat transfer in a regenerator with a dispersed checker", *Energy Saving and Water Treatment (Energoberezhenie i vodopodgotovka)*, 2007, no. 4 (48), pp.45-46.
13. Prutskikh D.A. "Hydrodynamics and heat transfer in a regenerator with a dispersed checker: Cand. tech. sci. diss." ("Gidrodinamika i teploobmen v regeneratore s dispersnoy nasadkoy: dis. kand. tekhn. nauk"), Voronezh, 2009, 108 p.
14. Kim H.-J., Ham S.-W., Yoon D.-S., Jeong J.-W. "Cooling performance measurement of two cross-flow indirect evaporative coolers in general and regenerative operation modes", *Applied Energy*, 2017, vol. 195, pp. 268-277.
15. Faleev V.V., Barakov R.A. "Experimental study of fluid flow and heat transfer in a moving fluidized bed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2001, vol. 1, pp. 28-31.
16. Barakov A.V., Dubanin V.Yu., Prutskikh D.A. "Research of hydrodynamics in the regenerator with fluidized bed", *Energy Saving and Water Treatment (Energoberezhenie i vodopodgotovka)*, 2009, no. 1, pp. 47-48.
17. Agapov Yu.N., Barakov A.V., Zhuchkov A.V., Sannikov A.V. "Evaluation of the hydraulic resistance and interphase heat transfer in a centrifugal fluidized bed", *Chemical Industry (Khimicheskaya promyshlennost')*, 1986, no. 4, p. 61.
18. Agapov Yu.N. "To the determination of the velocity of motion of a centrifugal fluidized bed", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2005, vol. 1, no. 6, pp. 46-48.

Submitted 20.09.2018; revised 30.11.2018

### Information about the authors

**Aleksandr V. Barakov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pt\_vstu@mail.ru  
**Vladimir Yu. Dubanin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: shadow842003@mail.ru  
**Nikolay N. Kozhukhov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: k0zhukhov@yandex.ru  
**Dmitriy A. Prutskikh**, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: \_dap\_@rambler.ru

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ОРЕБРЕНИЯ ПРИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ

С.В. Дахин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрен вариант термостатирования теплообменной поверхности при конвективной теплоотдаче. Поверхность теплообмена разбивается на участки с заданным тепловым потоком. На каждом участке условие постоянства температуры стенки предполагается реализовать путём управления термическим сопротивлением, применяя рёбра переменной высоты, изменяя их количество и условия теплоотдачи на оребрённой поверхности. Увеличение теплоотдачи может быть осуществлено любым подходящим способом за счёт применения интенсификаторов различного вида. Одновременно должно выполняться условие равенства температуры стенки в поперечном сечении потока между температурой под ребром и в середине межреберного пространства за счёт изменения расстояния между рёбрами и их толщины. Таким образом, температура стенки в пределах рассматриваемого участка регулируется в продольном (по ходу потока) и в поперечном направлениях с учётом заданной и допустимой для данного технологического процесса температурной невязки. Проведена оценка влияния параметров на изменение отношения безразмерной температуры оребрённой стенки, которая показала, что максимальное влияние оказывают толщина ребра и число Био, а высота ребра - минимальное. Увеличение расстояния между рёбрами приводит к уменьшению этого отношения, причём с небольшим темпом

**Ключевые слова:** ребро переменной высоты, термосопротивление, термостабилизация

### Введение

В ряде областей пищевой, химической и нефтяной промышленности используются теплообменные аппараты с постоянной температурой теплообменной поверхности. В первую очередь это относится к процессам испарения, конденсации, полимеризации и др. или к технологиям обработки термолабильных продуктов. Причём чем точнее поддерживается температура поверхности теплообмена, тем более качественно протекает технологический процесс.

Для полупроводниковых термоэлектрических охлаждающих и нагревательных устройств обеспечение и поддержание постоянной температуры на спаях существенно влияет на их энергетические показатели. Так в [1] теоретически показано, что если обеспечить постоянство температуры спаев термоэлектрических охладителей или нагревателей, то при достаточно большой мощности устройства значение удельной холодопроизводительности может быть увеличено более чем в три раза, по сравнению с работой таких устройств в условиях переменной температуры.

На практике поддерживать постоянство температуры стенки относительно просто удаётся только при фазовых превращениях. Однако применение фазовых переходов при тепло-

обмене сопряжено с наличием высокой температуры, повышенного давления, необходимостью поддержания герметичности и другими техническими трудностями.

Но если по обе стороны разделительной стенки движутся обменивающиеся теплоносители, то задача существенно осложняется. Проиллюстрируем это на примере теплопередачи через плоскую стенку.

Пусть горячий и холодный теплоносители омывают одну стенку с разных сторон. Записав тепловой баланс для выделенного элемента поверхности  $dF$  при стационарном режиме

$$dQ_1 = dQ_2 \Rightarrow \alpha_1(t_1 - t_c)dF_1 = \alpha_2(t_c - t_2)dF_2, \quad (1)$$

при  $dF_1 = dF_2$ , получим

$$t_c = \frac{\alpha_1 t_1 + \alpha_2 t_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha_{1,2}$  - коэффициент теплоотдачи;  $t_{1,2}$ ,  $t_c$  - температура теплоносителей и стенки; индекс 1 относится к греющему теплоносителю, индекс 2 - к нагреваемому.

Таким образом, выполнение условия  $t_c = const$  на выделенном участке возможно только при определённом соотношении физических параметров теплоносителей.

**Постановка и решение задачи**

Если положить, что с одной стороны теплообменной стенки известна величина теплового потока как функция продольной координаты, что может быть реализовано при фазовом превращении (например, конденсации), то в этом случае температура теплоносителя является постоянной и определяется параметрами насыщения, а коэффициент теплоотдачи есть известная функция координаты. Тогда для обеспечения постоянства средней температуры стенки необходимо обеспечивать строгую зависимость между изменяющейся температурой и коэффициентом теплоотдачи другого теплоносителя.

Принимая, что в обычных условиях при течении теплоносителя по гладкому каналу коэффициент теплоотдачи изменяется незначительно, то при изменении разности температуры между теплоносителем и стенкой соответственно будет изменяться тепловой поток. Отсюда следует один из способов регулирования теплового потока за счёт изменения площади теплообменной поверхности путём применения оребрения различного вида, в том числе с рёбрами переменной высоты (рис. 1).

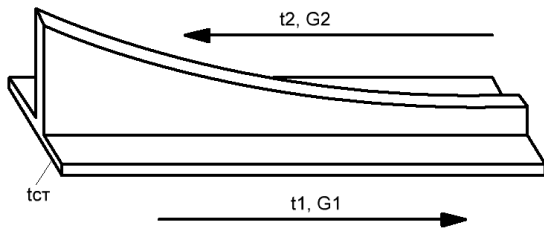


Рис. 1. Поверхность теплообмена с ребром переменной высоты

В данной постановке в [2] рассмотрен метод осуществления условия  $t_c = const$  с помощью продольного оребрения поверхности теплообмена со стороны нагреваемого теплоносителя. Суть метода заключается в том, что регулирование отбираемой теплоты при этом происходит не только изменением высоты ребра (так как в силу сдерживающего влияния теплопроводности материала ребра нельзя, увеличивая высоту ребра, беспредельно увеличивать теплосъём с него), но и числа рёбер по периметру канала. Так, если на первом участке регулирования вплоть до некоторой координаты  $x = A_1$  может быть осуществлено изменением до рациональных пределов высоты ребра по

длине  $x$  (до  $h = h_{omm}$ ) при заданном количестве рёбер, то на последующих участках необходимо введение дополнительных рёбер также с переменной в каждом случае высотой до значения  $h = h_{omm}$ . При этом высота ранее введённых рёбер остаётся постоянной и равной  $h_{omm}$ .

В результате решения задачи получена зависимость гиперболического тангенса  $th(mh)$  как функции координаты длины  $x$ :

$$th(mh) = \frac{P_1}{n\lambda m\delta} \times \left\{ \frac{\alpha_1}{t_1 - t_c - \frac{P_1 \int_0^x \alpha_1 (t_1 - t_c) dx}{c_2 G_2 (t_1 - t_c)}} - \frac{-\alpha_2 \frac{P_2 - P_p}{P_2} - (k-1)n \frac{th(mh_{omm})}{P_2}}{t_c - t_{20}} \right\}, \quad (3)$$

где  $m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda\delta}}$ ;  $\alpha_p, \lambda, \delta$  - коэффициенты

теплоотдачи от поверхности ребра, теплопроводности и толщина ребра соответственно;  $P_1, P_2$  - полный периметр теплообменной поверхности со стороны соответственно греющего и нагреваемого теплоносителей;  $P_p$  - часть периметра несущей оребрение поверхности занятой рёбрами толщиной  $\delta$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи со стороны реющего и нагреваемого теплоносителей;  $c_2, G_2$  - удельная изобарная теплоёмкость и массовый расход греющего теплоносителя;  $n$  - число рёбер;  $k$  - номер участка с нерегулируемыми рёбрами постоянной высоты.

Вычислив по формуле (3) значение гиперболического тангенса по таблицам гиперболических функций, определяем высоту ребра  $h$ .

Однако современное развитие техники и технологии в частности в области интенсификации теплоотдачи, позволяет не исключать коэффициент теплоотдачи из способов регулирования теплового потока.

Предлагается для термостатирования поверхности в случае конвективной теплоотдачи регулировать тепловой поток не только изменением площади поверхности  $F$  за счёт оребрения переменной высоты, но и в результате интенсификации теплоотдачи  $\alpha$  за счёт специальных приёмов: применения разрезных рёбер; устройства на поверхности рёбер интенсифика-

торов различного вида (выступы, канавки, лунки и др.), например как в [3], [4].

В случае совместного изменения  $\alpha$  и  $F$  удобно перейти к рассмотрению удельного термического сопротивления

$$R = \frac{1}{\alpha F}. \quad (4)$$

Тогда уравнение теплового баланса (1) запишется в виде

$$dQ_1 = dQ_2 \Rightarrow \frac{t_1 - t_c}{R_1} = \frac{t_c - t_2}{R_2}. \quad (5)$$

Если разбить теплообменную поверхность на  $n$  участков с одинаковым тепловым потоком через стенку так, что  $Q = nQ_i$ , то для каждого участка получим

$$Q_i = \frac{t - t_c}{R_i}, \quad (6)$$

где  $t$  - средняя температура теплоносителя на участке.

При  $Q_i = const$  и  $t_c = const$  термосопротивление на участке будет определяться изменением температуры теплоносителя. И, например (как один из возможных вариантов), если количество рёбер на участке будет максимально возможным по условиям теплообмена или технологии изготовления, а их высота равна  $h_{opt}$ , то увеличение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_i$  позволит уменьшить высоту рёбер или их количество при заданном численном значении термосопротивления  $R_i$ .

В инженерной практике широко применяется метод теплового расчёта оребрённой поверхности по одномерной модели, который основан на уравнениях теплового баланса тепловых потоков, передаваемых через оребрённую стенку. Одним из основных допущений данного метода является равенство температуры стенки под рёбрами и в межрёберных зазорах.

Для двухмерного температурного поля оребрённой стенки с рёбрами прямоугольного профиля в [5] приводятся выражения для расчёта максимальной температуры под ребром  $t_0$  и на поверхности стенки в середине расстояния между рёбрами  $t_c$  при  $t_{c1} = const$  (рис. 2). При этом считалось, что переток теплоты по стенке из межрёберного зазора под ребро отсутствует.

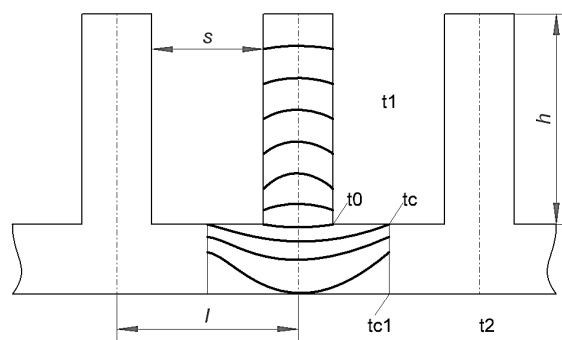


Рис. 2. К расчёту температурного поля в ребристой стенке

$$\Theta_0^* = \frac{t_0 - t_1}{t_{c1} - t_1} = \Theta_0 \Lambda_0, \quad (7)$$

$$\Theta_c^* = \frac{t_c - t_1}{t_{c1} - t_1} = \Theta_c \Lambda_c, \quad (8)$$

$$\Theta_0 = \left[ 1 + \sqrt{\frac{2Bi_c}{\tilde{\delta}}} th \left( \tilde{h} \sqrt{\frac{2Bi_c}{\tilde{\delta}}} \right) \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$\Theta_c = (1 + Bi_c)^{-1}, \quad (10)$$

$$\Lambda_0 = 1,289 Bi_c^{0,06} \tilde{s}^{-0,05}, \quad (11)$$

$$\Lambda_c = 0,891 \tilde{s}^{-0,12}. \quad (12)$$

Здесь  $\Theta_0^*$ ,  $\Theta_c^*$  - максимальная безразмерная избыточная температура под ребром и в середине межрёберного зазора;  $Bi_c = \frac{\alpha \delta_c}{\lambda}$ ;  $\delta_c$  - толщина стенки теплообменной поверхности;  $\tilde{h} = \frac{h}{\delta_c}$ ;  $\tilde{\delta} = \frac{\delta}{\delta_c}$ ;  $\tilde{s} = \frac{s}{\delta_c}$ ;  $h, \delta$  - высота и толщина ребра;  $s$  - расстояние между рёбрами.

Выражения (7) - (12) справедливы в диапазоне изменения параметров:  $Bi_c = 0,05 \div 5$ ;  $\tilde{h} = 1,5 \div 10$ ;  $\tilde{s} = 0,2 \div 5$ ;  $\tilde{\delta} = 0,2 \div 2$ .

Проанализируем влияние неравномерности температуры основания оребрённой стенки на возможность её термостабилизации.

Точное поддержание заданной температуры стенки возможно только на очень ограниченной поверхности и требует серьёзных технических усилий. В реальных условиях стабильной считается температура в диапазоне  $t_c = t_c' \pm \Delta t$  или в безразмерной форме  $\Theta_c^* = \Theta_c^{*'} \pm \Delta \Theta$ . Здесь  $t_c'$  - точное значение температуры стенки;  $\Delta t$  - допустимая температур-

ная невязка для данного технологического процесса;  $\Delta\Theta = \frac{\Delta t}{t_{c1} - t_1}$ .

Из выражений (8) и (10) видно, что влияние величины межрёберного зазора  $\tilde{s}$  на температуру стенки происходит через поправку (12). Численный анализ этого влияния в заданном диапазоне показывает, что при  $\tilde{s} > 2,6$  поправка  $\Lambda_c = 1$ , и при дальнейшем увеличении расстояния между рёбрами  $t_c$  изменяется мало.

Для оценки влияния параметров на изменение температуры оребрённой стенки воспользуемся приёмом, применённым в [6]. Результаты сравнения представим графически в безразмерном виде, причём не сами функции, а линии их тренда (рис. 3). По оси ординат отложим отношение безразмерной температуры стенки  $Y = \Theta_0^*/\Theta_c^*$ , по оси абсцисс изменяемые параметры, где

$$X = \begin{cases} f_1(Bi_c); \\ f_2(\tilde{h}); \\ f_3(\tilde{s}); \\ f_4(\tilde{\delta}). \end{cases} \quad (13)$$

За базовый вариант принимаем минимальные значения параметров. Нумерация линий на рисунке соответствует номеру в (13).

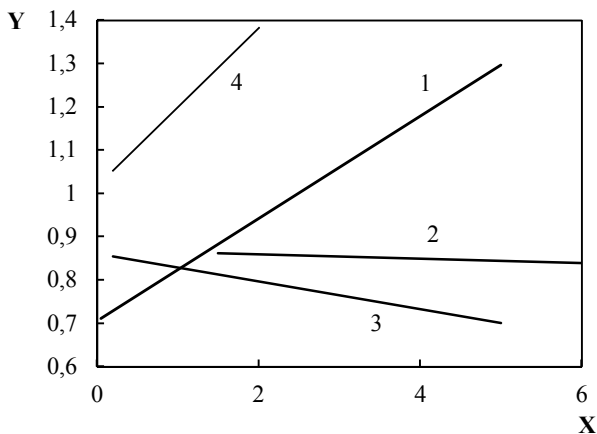


Рис. 3. Линии тренда зависимости  $\Theta_0^*/\Theta_c^*$  от параметров

Из рисунка видно, что наибольшее влияние на отношение температуры оказывает изменение толщины ребра  $\tilde{\delta}$ . Рост  $Bi_c$  почти для всех значений приводит к монотонному росту отношения температуры. Увеличение расстояния между рёбрами  $\tilde{s}$  ожидаемо приводит к

уменьшению  $\Theta_0^*/\Theta_c^*$ , причём с небольшим темпом. А высота ребра  $\tilde{h}$  практически не оказывает влияния на изменение температуры.

Следует отметить, что отношение температуры  $\Theta_0^*/\Theta_c^*$  определяет направление поперечной составляющей теплового потока в межрёберном зазоре. Если  $\Theta_0^*/\Theta_c^* < 1$ , то составляющая теплового потока направлена к ребру и ребро увеличивает передаваемый тепловой поток. А если  $\Theta_0^*/\Theta_c^* > 1$ , то поперечная составляющая направлена от ребра и ребро частично изолирует стенку, снижая теплопередачу.

Согласно рис. 3, на тепловое "запирание" стенки оказывают влияние достаточно большие числа  $Bi_c$ , а толщина ребра практически сразу изменяет направление поперечной составляющей теплового потока.

Отсюда следует важный для термостатирования стенки вывод: совместно с термическим сопротивлением толщина ребра является важным фактором регулирования температуры.

### Заключение

Таким образом, для выполнения условия  $t_c = const$  при конвективной теплоотдаче предлагается управление внешним термическим сопротивлением при изменении высоты рёбер и/или их количества совместно с применением интенсификаторов различного вида для увеличения коэффициента теплоотдачи при одновременном выполнении условия  $\Theta_c^* - \Theta_0^* \leq \Delta\Theta$  через изменение расстояния между рёбрами и их толщины на каждом участке теплообменной поверхности.

### Литература

1. Каганов М.А., Привин М.Р. Термоэлектрические тепловые насосы. Л.: Энергия, 1970. 176 с.
2. Зозуля Н.В., Карху В.А. Определение параметров оребрения теплообменной поверхности, обеспечивающих постоянство его температуры // Теплофизика и теплотехника. 1970. Вып. 18. С. 57-61.
3. Дахин С.В. Влияние рельефа поверхности тонкого прямого ребра на изменение его температуры // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 68-70.
4. Дахин С.В., Палихов Н.А. Экспериментальное исследование температурного поля плоской профилированной пластины // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 7-1. С. 98-101.
5. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчёт оребренных поверхностей. М.: Энергия, 1977. 256 с.
6. Дахин С.В., Дроздов И.Г., Рязских В.И. Влияние геометрических характеристик трубного пучка на основ-

ные параметры воздухоохлаждаемых теплообменников с учётом нестационарных режимов их работы // Вестник

Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 50-56.

Поступила 01.10.2018; принята к публикации 30.11.2018

#### 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

## TO DETERMINATION OF THE RIBBING PARAMETERS IN THERMOSTATING OF THE SURFACE OF HEAT EXCHANGE IN CONDITIONS OF CONVECTIVE HEAT RELEASE

S.V. Dakhin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** an option of temperature control of a heat exchange surface during convective heat transfer is considered. The heat exchange surface is divided into areas with a given heat flow. In each section, the condition of constancy of the wall temperature is supposed to be realized by controlling the thermal resistance by applying ribs of variable height, changing their number and the conditions of heat transfer on the ribbed surface. The increase in heat transfer can be carried out in any suitable way through the use of intensifiers of various types. At the same time, the condition of equality of wall temperature in the cross section of the flow between the temperature under the rib and in the middle of the intercostal space due to the change in the distance between the ribs and their thickness should be satisfied. Thus, the temperature of the wall within the considered section is regulated in the longitudinal (downstream) and in the transverse directions, taking into account the temperature discrepancy that is specified for the technological process. An assessment was made of the effect of the parameters on the change in the ratio of the dimensionless temperature of the ribbed wall, which showed that the edge thickness and the Biot number had the maximum effect, and the rib height was minimal. Increasing the distance between the ribs leads to a decrease in this ratio at a small rate

**Key words:** rib of variable height, thermoresistance, thermostabilization

#### References

1. Kaganov M.A., Privin M.R. "Thermoelectric heat pumps" ("Termoelektricheskie teplovye nasosy"), Leningrad, Energiya, 1970, 176 p.
2. Zozulya N.V., Karhu V.A. "Determination of the parameters of heat-exchange surface ribbing, ensuring the constancy of its temperature", *Thermal Physics and Heat Engineering (Teplofizika i teplotekhnika)*, 1970, vol. 18, pp. 57-61.
3. Dakhin S.V. "The influence of the relief of the surface of a thin straight rib on the change in its temperature", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 68-70.
4. Dakhin S.V., Palikhov N.A. "Experimental study of the temperature field of a flat profiled plate", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 7-1, pp. 98-101.
5. Royzen L.I., Dul'kin I.N. "Thermal calculation of finned surfaces" ("Teplovoy raschet orebryennykh poverhnostey"), Moscow, Energiya, 1977, 256 p.
6. Dakhin S.V., Drozdov I.G., Ryazhskikh V.I. "Influence of the geometrical characteristics of the tube bundle on the main parameters of air-cooled heat exchangers taking into account the non-stationary modes of their operation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 50-56.

Submitted 01.10.2018; revised 30.11.2018

#### Information about the author

**Sergey V. Dakhin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: svdakhin@ya.ru



**ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

**А.Л. Руцков<sup>1</sup>, А.В. Бурковский<sup>2</sup>, О.Г. Яскевич<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> **Филиал ПАО «МРСК Центра» – «Воронежэнерго», г. Воронеж, Россия**

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

**Аннотация:** одна из актуальных проблем развития систем диспетчерского управления связана с разработкой средств оптимизации электроэнергетических систем на основе моделей управления динамикой перетоков энергоресурсов. При этом целью является минимизация потерь активной мощности. Проведен сравнительный анализ двух альтернативных методов решения задачи оптимизации электроэнергетических систем по критерию минимума потерь активной мощности. Описан обобщенный алгоритм реализации метода Лагранжа при независимых начальных условиях, а также алгоритм оптимизации электроэнергетической системы с использованием модифицированного метода Ньютона–Рафсона, дополненного нечеткой нейронной сетью. За счет применения нечетких нейронных сетей осуществляется учет слабоформализуемых факторов, обусловленных неравномерностью потребительской нагрузки и оказывающих влияние на энергораспределение в электроэнергетической системе. Приведены результаты численного моделирования с целью оптимизации узла электроэнергетической системы Воронежской энергозоны на основе двух описанных алгоритмов. Показано, что использование нечетких нейронных сетей управления динамикой перетоков мощности в рамках оптимизационной модели позволяет существенно снизить ее погрешность

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, минимизация потерь активной мощности, динамика перетоков, управление, оптимизационная модель

**Постановка задачи**

Оптимизация электроэнергетических систем (ЭЭС) по критерию минимума потерь активной мощности осуществляется посредством применения различных реализаций моделей управления динамикой перетоков энергоресурсов. В качестве практического приложения принципов регулирования для описания локальных структур, включающих неоднородную потребительскую нагрузку, применяют такой инструмент, как статические характеристики нагрузки (СХН) в конкретные временные «срезы» непрерывного процесса транспорта электроэнергии:

$$\begin{cases} P(U) = P_{ном}(U)[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + a_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2 + \dots + a_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^n + \xi_P(U)]; \\ Q(U) = Q_{ном}(U)[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right) + b_2 \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^2 + \dots + b_n \cdot \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)^n + \xi_Q(U)]; \end{cases} \quad (1)$$

где  $P(U), Q(U)$  – фактические значения перетоков активной и реактивной мощности;  $P_{ном}(U), Q_{ном}(U), U_{ном}$  – номинальные значения активной и реактивной мощности;  $\xi_P(U), \xi_Q(U)$  – зависимость распределения активной и реактивной составляющих мощности от неопределённых факторов (обусловленных фактором неравномерности потребительской нагрузки);  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  – параметры процесса перераспределения энергоресурсов;  $U$  – напряжения питания (которое может варьироваться в определённых пределах по модулю и по фазе).

В наиболее общем виде модель оптимизации по критерию минимума потерь мощности в ЭЭС может быть реализована с помощью целевой функции:

$$F_J = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k \left[ \frac{\left(\sqrt{P_i(U)^2 + Q_i(U)^2}\right) \cdot R_{Эи}}{U_i^2} \cdot \left( \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta U_{\%dl}}{100}\right)^2} - 1 \right) + \Delta P_{xci} \cdot T_{pi} \cdot \left(\frac{U_i}{U_{номи}}\right)^2 + \Delta \varphi_{kopi} \cdot L_i \cdot k_{Ukopi} \right] \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $W$  – потери активной мощности в ЭЭС;  $R_{\Sigma}, L$  – эквивалентные активное сопротивление и длина структурных узлов ЭЭС;  $\Delta U_{\%}$  – изменение величины питающего напряжения в процентном выражении от номинального значения;  $\Delta P_{xxi}$  – мощность потерь холостого хода структурных узлов ЭЭС;  $T_{pi}$  – время наличия перетока мощности в рассматриваемой подсистеме;  $\Delta p_{kopi}$  – средние удельные потери на корону;  $k_{Ukopi}$  – коэффициент потерь на корону.

Граничные условия при этом имеют вид:

$$\begin{cases} |P_{vni} + P_{ci}| > 0; \\ |Q_{vni} + Q_{ci}| > 0; \\ i = 1, \dots, k; \end{cases} \quad (3)$$

$$L_I = \sum_I F_J(P_b) + \lambda_i g_i(x_i, x_{b_i}, u_i, p_i) + \lambda_{b_i} g_{b_i}(x_i, x_{b_i}, u_i, p_i, P_{b_i}). \quad (4)$$

где  $\lambda_i$  – вектор множителей Лагранжа для внутренних узлов ЭЭС;  $\lambda_{b_i}$  – вектор множителей Лагранжа для граничных узлов ЭЭС;  $P_{b_i}$  – перетоки активной мощности через граничные узлы рассматриваемой подсистемы.

Тогда обобщённый алгоритм функционирования классического метода оптимизации ЭЭС по критерию минимума потерь активной мощности может быть представлен в виде рис. 1.

Коротко опишем приведённые этапы:

- 1,2 – задание начальных условий, формализация целевой функции;
- 3 – нахождение уравнения оптимальности для граничных условий;
- 4 – формализация системы уравнений, описывающих ЭЭС;
- 5 – определение функциональных характеристик подсистем;
- 6 – вычисление приращений для оптимизации параметров перетоков в структурных элементах;

где  $P_{vni}, Q_{vni}$  – значения внутренних, а  $P_{ci}, Q_{ci}$  – внешних перетоков активной и реактивной мощностей структурных узлов ЭЭС.

Оптимизация целевой функции (2) при ограничениях (3) с практической точки зрения позволяет повысить энергоэффективность ЭЭС. Рассмотрим две возможные реализации – с помощью метода Лагранжа при независимых начальных условиях (применяется в большинстве существующих программных комплексах) и с использованием модифицированного алгоритма Ньютона–Рафсона, дополненного нечёткой нейронной сетью (ННС).

### Реализация метода Лагранжа

Функция Лагранжа для ЭЭС может быть записана в виде:

7 – проверка условия окончания функционирования алгоритма (по оценке полученных фактических ошибок с эталонными значениями);

8 – корректировочный алгоритм в случае неудовлетворительных результатов на шаге «7»;

9,10 – вывод управляющих воздействий, оптимизация режима ЭЭС по критерию минимума потерь активной мощности.

Результаты численного моделирования [1–3] с целью оптимизации узла ЭЭС, запитанного от АТ-1 ПС 220 кВ «Южная» в Воронежской энергозоне, сведены в табл. 1.

Существенным недостатком моделей на основе метода Лагранжа для оптимизации ЭЭС по критерию минимума потерь энергоресурсов является слабый учёт (или полное его отсутствие) неопределённых составляющих, а следовательно, и их влияния на изменение динамики рассматриваемого процесса передачи и потребления [4, 5].

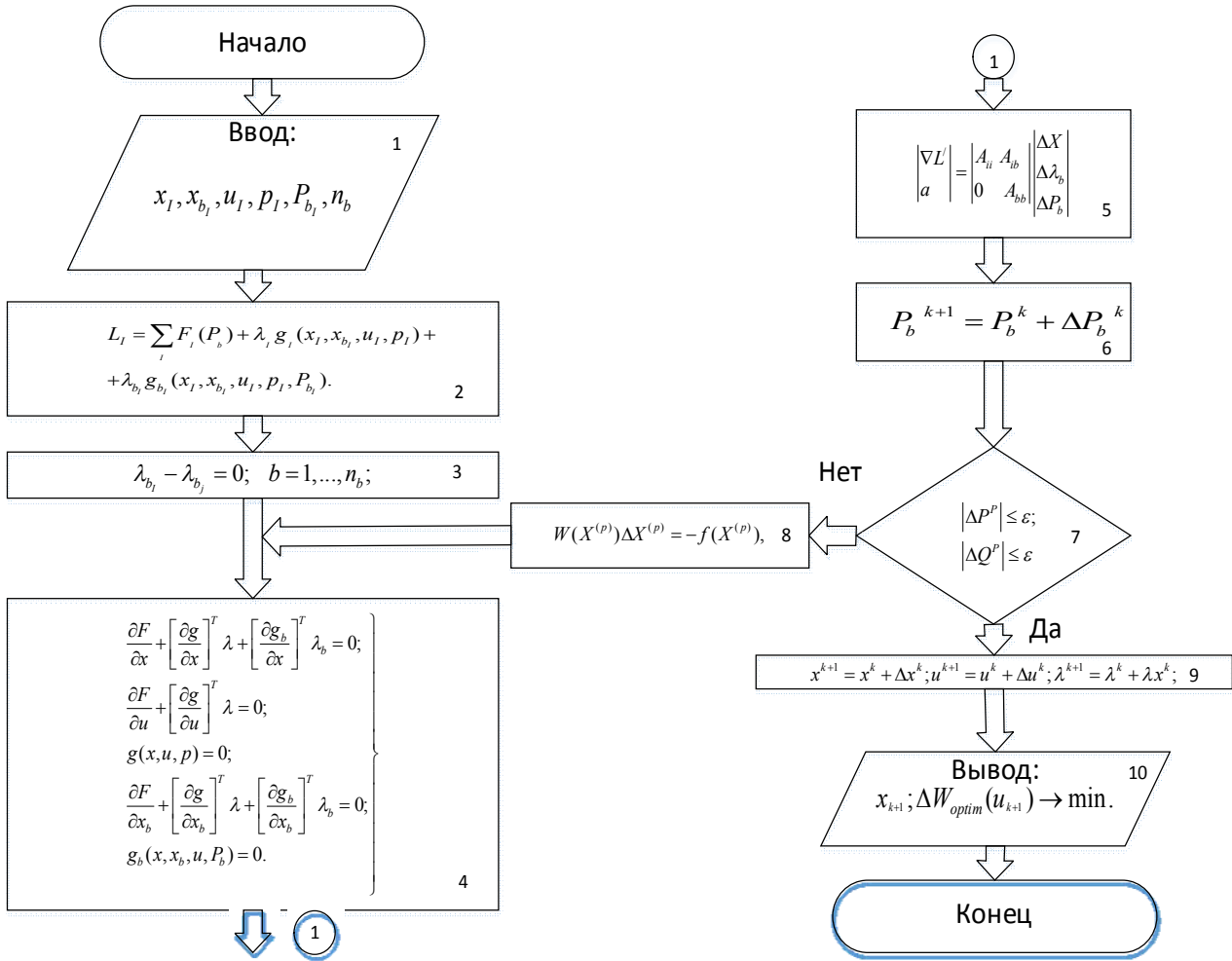


Рис. 1. Алгоритм минимизации потерь мощности ЭЭС при независимых начальных условиях по методу Лагранжа

Таблица 1

Результаты численного моделирования, проведённого по методу Лагранжа при независимых начальных условиях

Входные данные	$x_I : U_I = 112,2 \text{ кВ}; \theta_I = 53,9^\circ$	$x_{bI} : U_{bI} = 241,8 \text{ кВ}; \theta_{bI} = 32,0^\circ$
	$n_b = 1$	$P_{bI} = 161,8 \text{ МВт}$
	$u_I \left(  \Delta P^P ,  \Delta Q^P  \right) :  \Delta P^P  = 5,61 \text{ МВт};  \Delta Q^P  = 5,84 \text{ МВар}$	
	$p_I : r_{m.B} = 0,241 \text{ Ом}; x_{m.B} = 0,160 \text{ Ом}; r_{m.C} = 0,068 \text{ Ом}; x_{m.C} = 0 \text{ Ом};$ $r_{m.H} = 0,0005 \text{ Ом}; x_{m.H} = 0,0006 \text{ Ом};$ $g_m = 12 \cdot 10^{-7} \text{ См}; R_m = 0,83 \cdot 10^6 \text{ Ом}; b_m = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ См}; L_m = 1678,16 \text{ Гн}$	
Выходные данные	$x_{I(k+1)} : U_{I(k+1)} = 112,6 \text{ кВ};$ $\theta_{I(k+1)} = 55,1^\circ$	$x_{bI(k+1)} : U_{bI(k+1)} = 240,7 \text{ кВ};$ $\theta_{bI(k+1)} = 33,2^\circ$
	$\Delta W_{optim}(u_{I(k+1)}) :  \Delta P^P  = 4,51 \text{ МВт};  \Delta Q^P  = 4,66 \text{ МВар}$	

### Реализация модернизированного метода Ньютона–Рафсона с применением ННС

В качестве альтернативы алгоритму, представленному на рис. 1, следует отметить градиентные методы (к примеру, Ньютона–Рафсона), дополненные нечёткими нейронными сетями (ННС), позволяющими повысить их точност-

ные свойства и уменьшить число итераций. При этом осуществляется нахождение локального экстремума выражения (2).

На рис. 2 представлен модернизированный алгоритм метода Ньютона–Рафсона для оптимизации ЭЭС по критерию минимума потерь мощности с применением ННС со следующей последовательностью шагов.

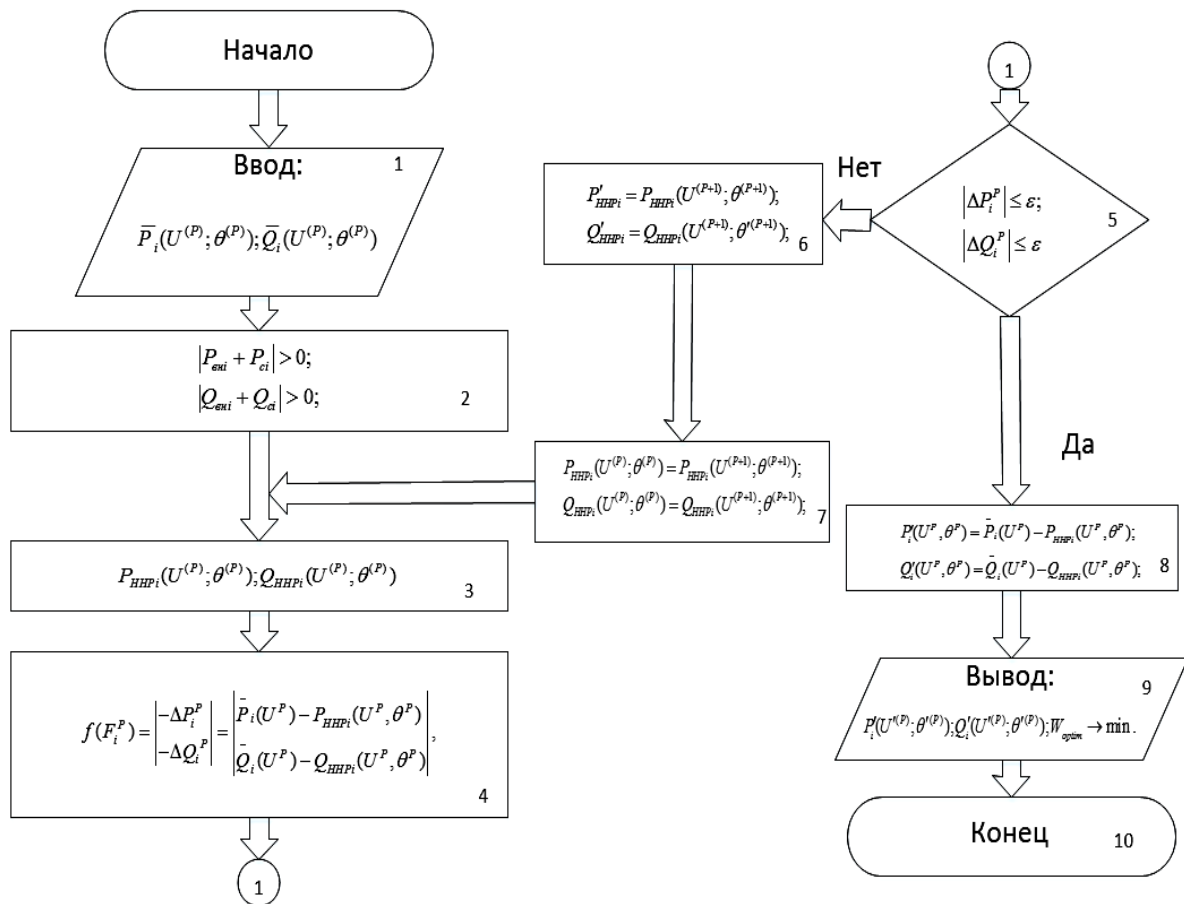


Рис. 2. Алгоритм оптимизации ЭЭС (модификация метода Ньютона–Рафсона)

Шаг 1. Задание первоначального вектора определяемых переменных в предыдущих дискретах времени (значения перетоков активной и реактивной мощности как функция от модуля и фазы напряжения) для последующего процесса оптимизации в соответствии с целевой функцией (2) с учётом выражений для СХН (1). На данном этапе осуществляется ввод исходных СХН элементов ЭЭС до решения задачи оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности.

Шаг 2. Проверка выполнения граничных условий (3).

Шаг 3. Определение перетоков активной –  $P_{ННРi}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$  и реактивной –

$Q_{ННРi}(U^{(P)}; \theta^{(P)})$  мощностей в последующих периодах посредством ННС, подробная структура и настройка которых рассматривается в [2,4].

Шаг 4. Определение вектора невязки мощностей в узлах, определяемые исходя из управления процессами перетоков мощности в предыдущих периодах:

$$f(F^P) = \begin{bmatrix} -\Delta P^P \\ -\Delta Q^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{P}(U^P) - P(U^P, \theta^P) \\ \bar{Q}(U^P) - Q(U^P, \theta^P) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $f(F^P)$  – вектор небалансов на  $n$ -й итерации;  $\bar{P}(U^P)$ ,  $\bar{Q}(U^P)$  – заданные значения

активной и реактивной мощностей в узле;  $\Delta P^P$  – невязка по активной мощности;  $\Delta Q^P$  – невязка по реактивной мощности.

Шаг 5. Анализ достижения заданной погрешности решения:  $|\Delta P^P| \leq \varepsilon$ ;  $|\Delta Q^P| \leq \varepsilon$ . При выполнении этого условия расчёт оканчивается выводом результатов расчёта оптимизированных параметров – 8,9; в противном случае осуществляется переход к следующему шагу – 6.

Шаг 6. Вычисление корректирующих значений вектора активной и реактивной мощности посредством применения ННС:

$$\begin{cases} P'_{ННРi} = P_{ННР}(U^{(P+1)}; \theta^{(P+1)}); \\ Q'_{ННРi} = Q_{ННР}(U^{(P+1)}; \theta^{(P+1)}), \end{cases} \quad (6)$$

где  $P'_{ННРi}, Q'_{ННРi}$  – скорректированные векторы активной и реактивной мощностей;  $U^{(P+1)}, \theta^{(P+1)}$  – амплитуда напряжения и сдвиг по фазе в процессе этапа корректировки.

Шаг 7. Задание скорректированного значения вектора активной и реактивной мощностей, полученных посредством повторного функционирования ННС, и последующий переход.

Варьируемыми параметрами при этом являются модуль и амплитуда напряжения в расчётных узлах, а также настройки ННС, входящих в состав подсистем управления перетоками мощности в ЭЭС.

Результаты численного расчёта оптимизации ЭЭС (на примере АТ-1 ПС 220 кВ «Южная») [1-3] при функционировании алгоритма, приведённого на рис. 2, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты численного расчёта оптимизации АТ-1 ПС 220 кВ «Южная» по критерию минимума потерь (модификация метода Ньютона–Рафсона)

Входные данные	$\bar{P}_i(U^{(p)}; \theta^{(p)}): U^{(p)} = 241,8 \text{ кВ}; \theta^{(p)} = 32,0^\circ;  \Delta P^P  = 5,61 \text{ МВт}$
	$\bar{Q}_i(U^{(p)}; \theta^{(p)}): U^{(p)} = 241,8 \text{ кВ}; \theta^{(p)} = 32,0^\circ;  \Delta Q^P  = 5,84 \text{ МВар}$
Выходные данные	$\Delta W_{\text{optim}}(\bar{P}'_i(U'^{(p)}; \theta'^{(p)}); \bar{Q}'_i(U'^{(p)}; \theta'^{(p)})):  \Delta P'^P  = 4,41 \text{ МВт};$ $ \Delta Q'^P  = 4,57 \text{ МВар};$ $U'^{(p)} = 202,5 \text{ кВ}; \theta'^{(p)} = 29,6^\circ.$

Отметим, что реализация блоков 3, 6, 7 алгоритма минимизации ЭЭС (с использованием ННС) позволяет произвести учёт влияния неопределённых факторов на данном шаге итерации, кроме того, осуществляется анализ структуры элементов ЭЭС (относительно метода Лагранжа) посредством применения модели на базе ННС.

Полученные результаты указывают на возможности повышения качества функционирования оптимизационной модели по критерию (2) при ограничениях (3) за счёт применения модели управления динамикой перетоков мощности с применением ННС. При этом осуществляется учёт слабоформализуемых факторов, влияющих на энергораспределение в рамках ЭЭС.

### Заключение

Применение ННС управления динамикой перетоков мощности в оптимизационной модели, функционирующей по критерию минимума потерь мощности в элементах ЭЭС, позволило

снизить её погрешность до величины порядка 1,5-3 % [5], что является стимулом для дальнейших практических исследований в части развития систем диспетчерского управления.

### Литература

1. Крысанов В.Н., Шарапов Ю.В., Руцков А.Л. Анализ программно-аппаратного обеспечения сетей SmartGrid // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 97-101.
2. Крысанов В.Н., Гагаринов Н.В., Руцков А.Л. Повышение эффективности управления параметрами подстанции 220 кВ // Энергобезопасность и энергосбережение. 2015. № 1(61). С. 48-54.
3. Крысанов В.Н., Руцков А.Л., Шукур Омар Шукур Махмуд. Системная оптимизация экономических показателей функционирования системного оператора в Воронежской энергосистеме // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 3. С. 62-67.
4. Крысанов В.Н., Гамбург К.С., Руцков А.Л. Прогнозирование потребления электроэнергии территориальными сетевыми организациями с использованием методов нейро-нечётких сетей // Электротехнические комплексы и системы управления. 2014. № 2. С. 40-46.
5. Модель прогнозирования регионального энергопотребления на базе нечёткой нейронной сети / В.Л. Бур-

ковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Рудков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного

технического университета. 2015. Т. 11. № 5. С. 41-46.

Поступила 18.10.2018; принята к публикации 15.11.2018

#### Информация об авторах

**Рудков Алексей Леонидович** – канд. техн. наук, начальник отдела, филиал ПАО «МРСК Центра» – «Воронежэнерго» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Арзамасская, д.2), e-mail: alex\_8\_90@mail.ru

**Бурковский Александр Викторович** – канд. техн. наук, декан факультета энергетики и систем управления, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bav@vorstu.ru

**Яскевич Ольга Георгиевна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: jaskevich@mail.ru

### OPTIMIZATION MODELS OF POWER FLOW DYNAMICS CONTROL IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

A.L. Rutskov<sup>1</sup>, A.V. Burkovskiy<sup>2</sup>, O.G. Yaskevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The branch of «MRSK Tsentra» – «Voronezhenergo», Voronezh, Russia

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

**Abstract:** one of the urgent problems of the development of dispatch control systems is associated with the development of tools for optimizing electric power systems based on models for controlling the dynamics of the flow of energy resources. The goal is to minimize the loss of active power. A comparative analysis of two alternative methods for solving the problem of optimization of electric power systems by the criterion of the minimum of active power losses was carried out. A generalized algorithm for the implementation of the Lagrange method under independent initial conditions is described, as well as an algorithm for optimizing an electric power system using the modified Newton–Raphson method, supplemented by a fuzzy neural network. Due to the use of fuzzy neural networks, weakly formalized factors are taken into account, due to the unevenness of the consumer's load and affecting the distribution of energy in the power system. The results of numerical simulation with the aim of optimizing the node of the electric power system of the Voronezh energy zone based on the two algorithms described. It is shown that the use of fuzzy neural networks to control the power flow dynamics within an optimization model can significantly reduce its error

**Key words:** electric power systems, minimization of active power loss, power flow dynamics, control, optimization model

#### References

1. Krysanov V.N., Sharapov Yu.V., Rutskov A.L. “Analysis of hardware-software supply of SmartGrid networks”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 97-101.
2. Krysanov V.N., Gagarinov N.V., Rutskov A.L. “Improving the efficiency of controlling the parameters of a 220 kV substation”, *Energy Security and Energy Saving (Energobezопасnost' i energosberezhenie)*, 2015, no. 1(61), pp. 48-54.
3. Krysanov V.N., Rutskov A.L., Shukur Omar Shukur Mahmoud “System optimization of economic indicators of the functioning of the system operator in the Voronezh energy system”, *Electrotechnical Complexes and Control Systems (Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya)*, 2015, no. 3, pp. 62- 67.
4. Krysanov V.N., Gamburg K.S., Rutskov A.L. “Prediction of electricity consumption by territorial network organizations with the use of methods of neuro-indistinct networks”, *Electrotechnical Complexes and Control Systems (Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya)*, 2014, no. 2, pp. 40-46.
5. Burkovskiy V.L., Krysanov V.N., Rutskov A.L., Shukur Omar Shukur Mahmoud “Model of forecasting of regional energy consumption on the basis of the indistinct neural network”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 5, pp. 41-46.

Submitted 18.10.2018; revised 15.11.2018

#### Information about the authors

**Aleksey L. Rutskov**, Cand. Sc. (Technical), Division Head, the branch of «MRKS Tsentra» – «Voronezhenergo» (2 Arzamasskaya st., Voronezh 394033, Russia), e-mail: alex\_8\_90@mail.ru

**Aleksandr V. Burkovskiy**, Cand. Sc. (Technical), Dean of the Faculty of Energetics and Control Systems, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bav@vorstu.ru

**Ol'ga G. Yaskevich**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: jaskevich@mail.ru

УДК 621-311-9

## ЛИНЕЙНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПЯЖЕНИЯ СО СВЕРХМАЛЫМ ПАДЕНИЕМ НАПЯЖЕНИЯ

А.С. Шайкин<sup>1</sup>, И.А. Суров<sup>2</sup>, Е.Д. Алперин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматривается разработка принципиальной схемы линейного стабилизатора напряжения с падением напряжения менее 200 мВ (Ultra LDO) и током нагрузки 100 мА. Предложена его структурная схема, в которую входят три основных блока: источник опорного напряжения (ИОН), усилитель сигнала ошибки (УСО) и регулирующий элемент (РЭ). В качестве усилителя сигнала ошибки используется операционный усилитель с компенсацией Миллера с конденсатором в цепи обратной связи, выполненный по МОП – технологии. В качестве источника опорного напряжения выбран bandgap core, величина напряжения на выходе которого определяется величиной ширины запрещенной зоны используемого полупроводника. Для работы УСО и ИОН требуется стабильный ток. Для его реализации используется схема термостабильного источника тока, ток на выходе которого остается стабильным в широком диапазоне температур. В качестве регулирующего элемента стабилизатора напряжения используется р-канальный МОП-транзистор, сопротивление которого изменяется таким образом, чтобы уровень выходного напряжения оставался практически постоянным, компенсируя флуктуации тока нагрузки и входного напряжения. С помощью имитационного моделирования в системе Cadence Virtuoso Schematic проверяется работоспособность стабилизатора напряжения, исследуются его температурная нестабильность, нестабильность по напряжению питания, минимальное падение напряжения, коэффициент подавления пульсаций напряжения питания. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности использования данного стабилизатора в источниках для питания процессоров и ПЛИС

**Ключевые слова:** стабильное напряжение, источник опорного напряжения, термостабильный источник тока, усилитель сигнала ошибки, минимальное падение напряжения

### Введение

В настоящее время в портативных приборах с батарейным питанием и во вторичных источниках для питания процессоров и ПЛИС широко используются линейные стабилизаторы напряжения со сверхмалым падением напряжения.

Современной промышленностью выпускаются LDO в широком диапазоне напряжений, например, такие, как LM2995, LM2931, LP2966, LP3984 компании Texas Instruments, L4805 компании STMicroelectronics. Но по своим параметрам во многих случаях они не подходят для применения в процессорах и ПЛИС [1]. Поэтому целью данной работы являются разработка принципиальной схемы линейного стабилизатора напряжения с падением напряжения менее 200 мВ (Ultra LDO) и током нагрузки 100 мА и исследование его особенностей.

### Структурная схема LDO

Структурная схема линейного стабилизатора напряжения представлена на рис. 1.

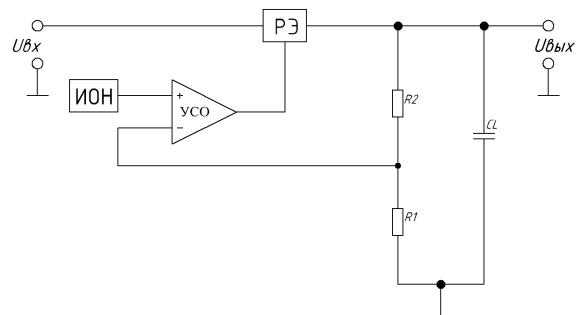


Рис. 1

Структуру данного стабилизатора составляют три основных блока: источник опорного напряжения (ИОН), усилитель сигнала ошибки (УСО) и регулирующий элемент (РЭ) [2].

Опорное напряжение подается на неинвертирующий вход усилителя ошибки и сравнивается с частью выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ , которое снимается с делителя  $R_1$ - $R_2$ . Разность напряжений усиливается усилителем сигнала ошибки, выход которого подключен к последовательному регулирующему элементу, сопротивление которого изменяется таким образом, чтобы уровень выходного напряжения оставался практически постоянным, компенсируя флуктуации тока нагрузки и входного

напряжения. Для предотвращения самовозбуждения стабилизатора к его выходу подключается конденсатор  $CL$  с определенной емкостью.

Расчет и моделирование данного стабилизатора проводились с использованием технологии ХН035 (0.35 мкм) [3].

### Усилитель сигнала ошибки

Усилитель сигнала ошибки выполнен по МОП - технологии (рис. 2) [4]. Его преимущества — это простота, технологичность и малая площадь, занимаемая на кристалле. В качестве цепи компенсации УСО используется компенсация Миллера с конденсатором в цепи обратной связи. Она используется для оптимизации переходных процессов и частотной характеристики усилителя.

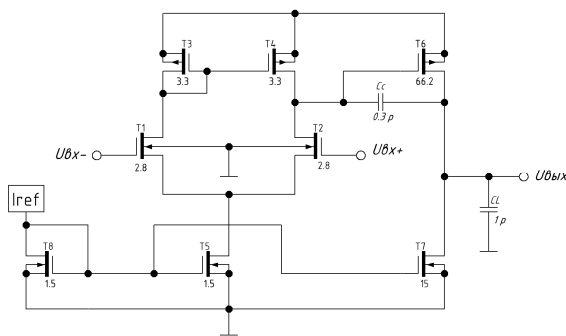


Рис. 2

Дифференциальный каскад реализован на двух идентичных n-канальных МОП транзисторах T1 и T2. Два p-канальных МОП транзистора T3 и T4 образуют токовое зеркало, которое является динамической нагрузкой дифференциального каскада. Два n-канальных МОП транзистора T5 и T8 являются токовыми зеркалами, задающими ток смещения дифференциального каскада. Транзисторы T7 и T6 образуют выходной каскад.

Краткие характеристики УСО представлены в таблице.

Характеристика	Значение
Коэффициент усиления, дБ	76
Скорость нарастания, в/мкс	35
Запас по фазе, °	60
ICMR, В	от 0.8 до 3

### Источник опорного напряжения

Для получения опорного напряжения выбрана схема источника на основе ширины запрещенной зоны используемого полупроводника (рис. 3) [5].

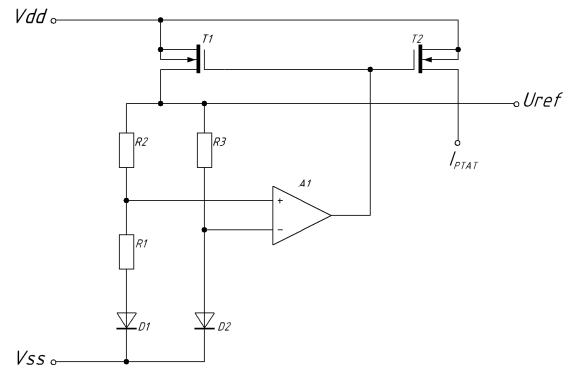


Рис. 3

Он представляет собой bandgap core, состоящий из операционного усилителя A1, двух p-n-р транзисторов D1 и D2 в диодном включении, имеющих разную площадь, p-канальных МОП транзисторов T1 и T2 и резисторов R1–R3. Напряжение на выходе такого источника определяется следующим выражением:

$$U_{ref} = U_{BE1} + (1 + R_1/R_2) \Delta U_{BE1,2},$$

$$\Delta U_{BE1,2} = U_{BE2} - U_{BE1},$$

где  $U_{BE1}$ ,  $U_{BE2}$  – падение напряжений на переходе база-эмиттер транзисторов D1 и D2 в диодном включении. Значение опорного напряжения составляет 1.2 В. Температурная нестабильность опорного напряжения равна 0.5% (рис. 4), а нестабильность по напряжению питания – 0.0006% (рис. 5).

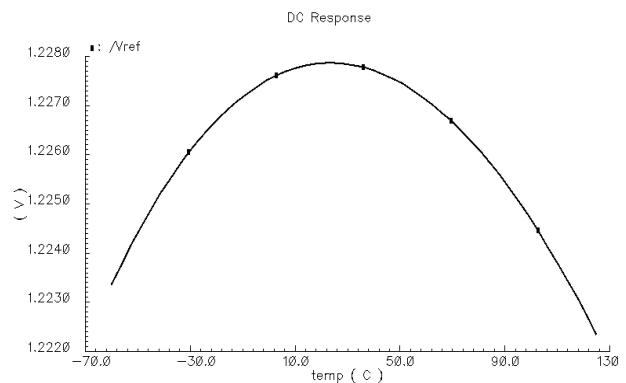


Рис. 4



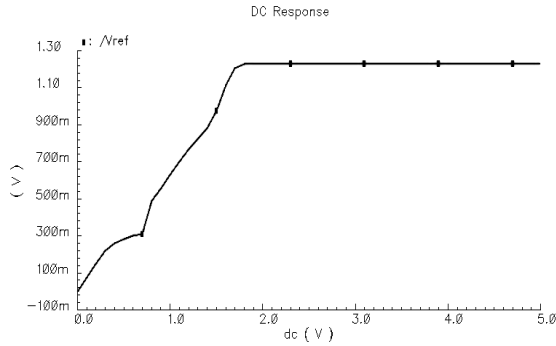


Рис. 5

**Источник стабильного тока**

Для получения стабильных значений тока в широком диапазоне температур используется схема термостабильного источника тока (рис. 6) [6].

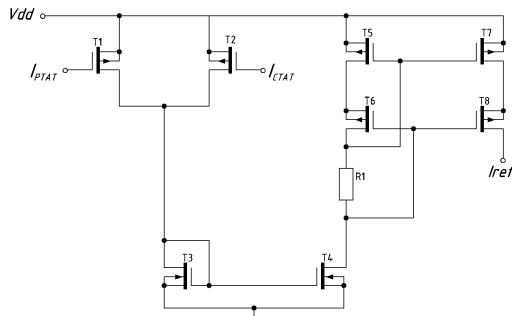


Рис. 6

Величина тока в нем определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводника. Принцип действия заключается в арифметическом сложении тока на прямо смещенном p-n-переходе, который линейно убывает с ростом температуры – СТАТ-элемент (рис. 7) и комплементарного тока на другом схемном элементе, который прямо пропорционален абсолютной температуре – РТАТ – элемент (рис. 3). Ток на выходе такой схемы описывается формулой:

$$I_{ref} = I_{СТАТ} + I_{РТАТ}$$

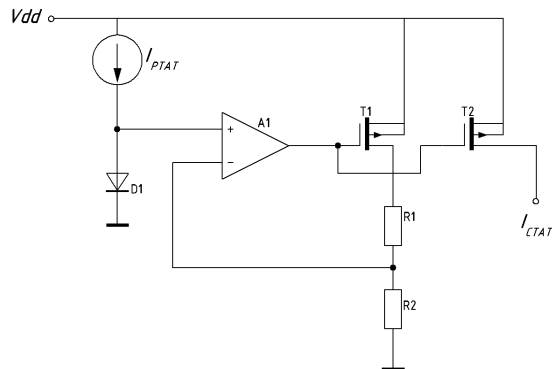


Рис. 7

**Регулирующий элемент**

Чтобы обеспечить малое падение напряжения в качестве регулирующего элемента стабилизатора напряжения используется р-канальный МОП-транзистор. Его размеры определяются следующим выражением

$$\left(\frac{W}{L}\right) = \frac{2 I_D}{K_P (U_{DSatpass})^2},$$

где  $W$  и  $L$  – соответственно ширина и длина канала транзистора,  $I_D$  - ток стока транзистора,  $K_P$  – удельная крутизна транзистора,  $U_{DSatpass}$  – напряжение насыщения транзистора. Из выражения получили следующие размеры: длина канала –  $L=180n$ , ширина канала –  $W=26.5m$ .

**Моделирование стабилизатора напряжения в пакете Cadence Virtuoso Schematic**

Для исследования параметров стабилизатора напряжения было проведено моделирование в пакете Cadence Virtuoso Schematic.

Температурная нестабильность выходного напряжения (рис. 8) и тока равна 0.129% (рис. 9).

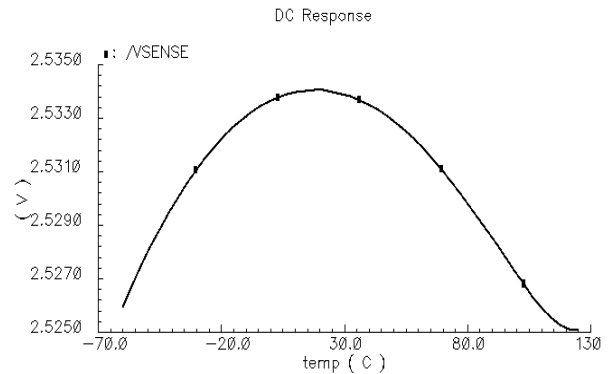


Рис. 8

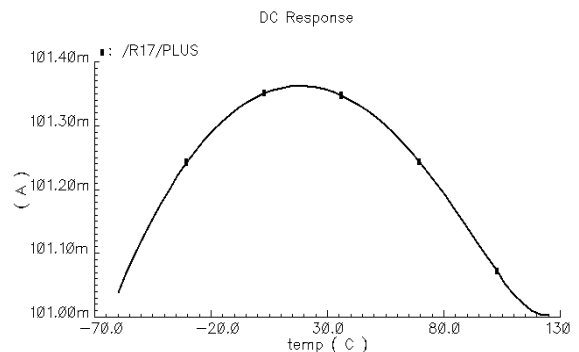


Рис. 9

Нестабильность выходного напряжения по напряжению питания равна 0.06%/В (рис. 10).

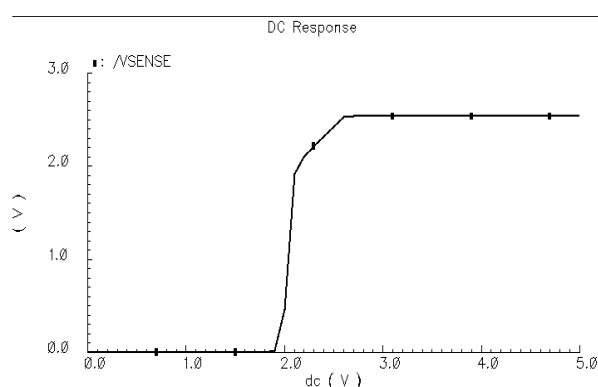


Рис. 10

Минимальное падение напряжения составляет 100мВ (рис. 11).

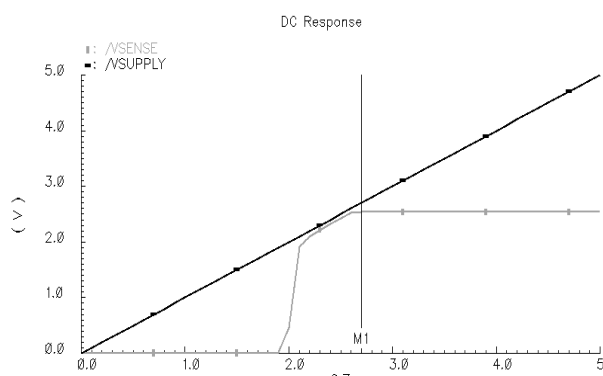


Рис. 11

Коэффициент подавления пульсаций напряжения питания (PSSR) равен 74дБ (рис. 12).

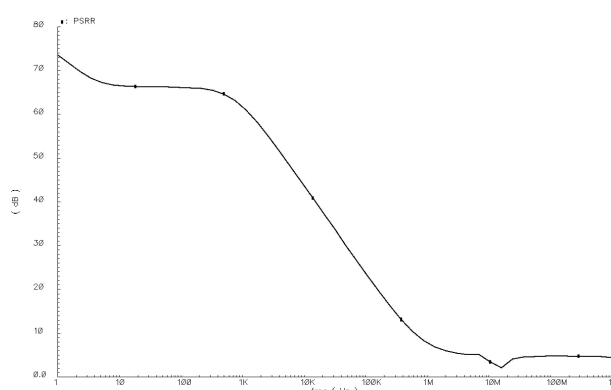


Рис. 12

### Заключение

В результате был разработан линейный стабилизатор напряжения с падением напряжения 100 мВ, работающий в диапазоне температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Диапазон входных напряжений от 2.7 В до 5 В. Величина выходного напряжения равна 2.5 В, а выходного тока 100 мА. Благодаря примененному схемотехническому решению и используемой технологии получили его параметры более точными, чем у аналогов.

### Литература

1. Overview for Linear Regulator (LDO). Режим доступа: <http://www.ti.com/power-management/linear-regulators-ldo/overview.html> (дата обращения: 25.07.2018).
2. Thomas H. Lee, The Design of CMOS Radio – Frequency Integrated Circuits, Cambridge University Press, 2004.
3. XH035 Data sheet – X – Fab.
4. Allen P.E., Holberg D.R. CMOS Analog Circuit Design. New York: Oxford University press, 2011.
5. Нано – КМОП – схемы и проектирование на физическом уровне / Б.П. Вонг, А. Миттал, Ю. Цао, Г. Старр. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014.
6. Linden T. Harrison, Current Sources & Voltage References. New York: Technology Department Oxford, 2005.

Поступила 29.09.2018; принята к публикации 29.11.2018

### Информация об авторах

**Шайкин Александр Сергеевич** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: [aleksandrsajkin8@gmail.com](mailto:aleksandrsajkin8@gmail.com)

**Суров Илья Александрович** – начальник лаборатории, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394026, Россия, г. Воронеж, Старых Большевиков, 5), тел. +7(473) 226 – 29 – 37

**Алперин Евгений Данилович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473) 243 – 76 – 65

## LINEAR VOLTAGE STABILIZER WITH MINUTE VOLTAGE FALL

A.S. Shaikin<sup>1</sup>, I.A. Surov<sup>2</sup>, E.D. Alperin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>JS “NII ET”, Voronezh, Russia

**Abstract:** the development of the concept of a linear voltage regulator with a voltage drop of 200 mV (Ultra LDO) and a load current of 100 mA is considered. Its structural scheme was proposed, which includes three main blocks: a reference voltage source (RVS), an error signal amplifier (ESA), and a regulating element (RE). As an error signal amplifier, an operational amplifier with Miller's compensation with a capacitor in the feedback circuit is used, made in MOS technology. The bandgap core is selected as the reference voltage source, the voltage at the output of which is determined by the width of the forbidden zone of the semiconductor used. A stable current is required for ESA and RVS operation. For its implementation, a thermally stable current source is used, the output current of which remains stable over a wide range of temperatures. As a regulating element of the voltage regulator, a p-channel MOS transistor is used, the resistance of which is changed so that the output voltage level remains almost constant, compensating for the fluctuations of the load current and the input voltage. Using the simulation methods in the Cadence Virtuoso Schematic system, the performance of the voltage regulator is checked, its temperature instability, instability on the supply voltage, the minimum voltage drop, and the ripple suppression factor are investigated. The research results indicate the possibility of using this stabilizer in power sources for processors and EPLD

**Key words:** stable voltage, reference voltage source, thermally stable current source, error signal amplifier, minimum voltage drop

### References

1. Overview for Linear Regulator (LDO), available at: <http://www.ti.com/power-management/linear-regulators-ldo/overview.html>, free (accessed: 25.07.2018).
2. Thomas H. Lee, “The design of CMOS radio – frequency integrated circuits”, Cambridge University Press, 2004.
3. XH035 Data sheet – X – Fab.
4. Allen P.E., Holberg D.R. “CMOS Analog Circuit Design”, New York, Oxford University press, 2011.
5. Wong B.P., Mittal A., Cao Y., Starr G., “Nano - CMOS - schemes and design at the physical level”, Moscow, Tekhnosfera, 2014.
6. Linden T. Harrison “Current Sources & Voltage References”, New York, Technology Department Oxford, 2005.

Submitted 29.09.2018; revised 29.11.2018

### Information about the authors

**Aleksandr S. Shaikin**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: [aleksandrsajkin8@gmail.com](mailto:aleksandrsajkin8@gmail.com)

**Il'ya A. Surov**, Head of Laboratory, JS “NII ET” (5 Old Bolsheviks, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473) 226 - 29 – 37

**Evgeniy D. Alperin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel. +7(473) 243 – 76 – 65

## РЕАЛИЗАЦИЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО LDPC-ДЕКОДЕРА НА ПЛИС

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассматриваются LDPC-коды применительно к следующим стандартам связи: 10GBASE-T, DVB-S2 и IEEE 802.16 (WiMAX). Представлен обзор нового класса стохастических итеративных архитектур декодирования. Предлагаемая в работе архитектура дает возможность организации параллельного декодирования (длинных) современных LDPC-кодов с реализацией декодеров на ПЛИС. Стохастические декодеры работают с вероятностными сообщениями в двоичном представлении, что позволяет создать упрощенную архитектуру факторного графа на ПЛИС. Описана реализация на ПЛИС LDPC-декодера с 8 информационными и 8 закодированными битами. На ПЛИС Altera Cyclone пропускная способность составляет 5 Мбит/с при тактовой частоте 100 МГц и, как ожидается, частота будет увеличиваться почти линейно с длиной кода. Проведенное моделирование декодера на ПЛИС Altera Stratix показало пропускную способность 8 Мбит/с. Описана аппаратная реализация стохастического LDPC-декодера. Рассматриваются основы итеративного декодирования LDPC-кодов. Описывается концепция стохастического декодирования. Представлен обзор аппаратной архитектуры стохастического LDPC-декодера. Результаты реализации на ПЛИС и выводы приведены в заключении данной статьи

**Ключевые слова:** стохастический декодер, LDPC код, стохастические вычисления

## Введение

LDPC-коды представляют собой семейство корректирующих кодов, первоначально предложенных Галлагером в начале 1960-х годов. Коды LDPC нашли применение в различных современных стандартах связи, таких как 10GBASE-T, DVB-S2 и IEEE 802.16 (WiMAX), LTE, и поэтому исследование архитектур аппаратного декодирования этих кодов в последнее время является очень актуальным [1].

В попытке разработать новые, более эффективные архитектуры исследователи переоценили фундаментальные предположения, лежащие в основе аппаратного декодирования. Хорошим примером этого является применение аналоговых вычислений для декодеров. Показано, что непрерывная обработка аналоговых сигналов хорошо подходит для реализации высокоскоростных, маломощных и эффективных декодеров. В этой статье описаны и представлены результаты для нового метода декодирования, называемого стохастическим декодированием. Стохастическое декодирование основано на простых цифровых «стохастических» вычислительных схемах, впервые описанных в 1960-х годах, а затем используемых при реализации искусственных нейронных сетей.

Стохастические декодеры демонстрируют простоту аналоговых декодеров, но решают ключевые ограничения аналоговой технологии, такие как масштабируемость, относительная сложность проектирования и проверки RTL-модели устройства.

## Декодирование кодов LDPC

LDPC-коды - это класс кодов с исправлением ошибок, которые могут приближаться к пределу Шеннона.

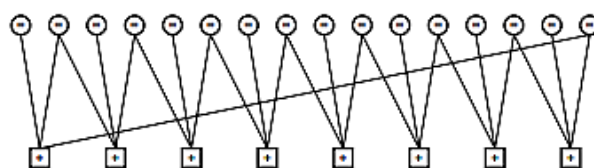


Рис. 1. Факторный граф LDPC-кода длиной блока 16

Графическую модель декодирования кодов LDPC можно представить в виде факторного графа. Факторный граф - это двудольный граф, который представляет кодовые ограничения и состоит из двух типов узлов: переменных и проверочных. Пример факторного графа LDPC-кода для скорости декодирования  $\frac{1}{2}$  и длины кодового слова 16 показан на рис. 1. Декодирование выполняется с использованием алгоритма распространения доверия. Для каждой итерации сообщения передаются от переменных узлов к проверочным вдоль сети межсоединений, а возвращаемые сообщения

передаются от проверочных назад к переменным [2].

Проверочные узлы обеспечивают равномерность распределения кодовых сообщений между тремя битами вдоль ребер графа. Учитывая вероятности двух входных битов  $P_a$  и  $P_b$ , вероятность выходного бита  $P_c$  вычисляют при помощи функции «2-input soft XOR»:

$$P_c = P_a(-P_b) + (-P_a)(P_b) \quad (1)$$

Аналогично можно записать функцию «2-input soft equality» для переменных узлов

$$P_c = \frac{P_a P_b}{(-P_a)(-P_b) + P_a P_b} \quad (2)$$

Декодирование продолжается до тех пор, пока не будет найдено кодовое слово или пока не будет достигнуто заданное число итераций.

### Стохастическое декодирование

Стохастическое декодирование является относительно новым подходом к декодированию кодов с низкой сложностью итеративного декодирования.

Стохастическое декодирование имеет проблему задержек при передаче сообщений и обращении к памяти. Было замечено, что циклы в графе кода коррелируют стохастические сообщения таким образом, что группа узлов находится в фиксированных состояниях в течение нескольких итераций декодирования, что резко ухудшает сходимость декодера [3].

Когда блок проверочного узла выполняет операцию сложения, вентиль «soft XOR» является вероятностным и сводится к стандартному вентилю «hard XOR», а входные сообщения представляют собой последовательность Бернулли. Блок проверочного узла показан на рис. 2 с добавлением D-триггера для временной синхронизации.

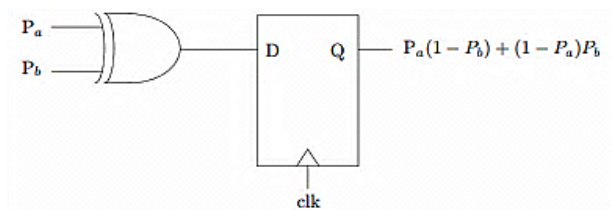


Рис. 2. Блок проверочного узла

Операция умножения требуется в блоке переменного узла. Операция умножения реализована с AND вентилем и JK-триггером, как показано на рис. 3.

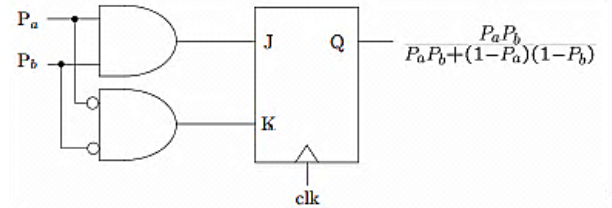


Рис. 3. Блок переменного узла

Одним из преимуществ стохастического подхода является то, что для представления каждого ребра в полностью параллельной реализации факторного графа требуется только два провода (по одному в каждом направлении), что уменьшает проблемы перегрузки маршрутизации, характерные для многобитных цифровых представлений.

### Архитектура декодера

Структурная схема декодера приведена на рис. 4. Основные процедуры архитектуры включают в себя преобразование уровня сигнала в вероятность, цифровое стохастическое преобразование, стохастический декодер факторного графа и стохастическое преобразование в цифровое.

Входные данные для стохастического декодера модулируются при помощи двоичной фазовой манипуляции (BPSK) и преобразуются в стохастические потоки данных. Это достигается в два этапа. Первый этап включает в себя преобразование из области логарифмического правдоподобия в область вероятностей, а второй этап включает в себя создание стохастического потока на основе соответствующих вероятностей. Преобразование уровня сигнала в вероятность выполняется с помощью базовых логических элементов ПЛИС (LUT). Преобразование цифровых данных в стохастический поток является довольно простым процессом, но требует большого количества независимых случайных битов. Используя мультиплексоры и эти случайные биты, стохастический поток может быть сгенерирован с помощью простой комбинационной логической структуры, как показано на рис. 5, где вектор D является двоичным входным значением, а  $N=(m + 1)$  - битным случайным вектором шума, где m-

ширина кодового слова  $D$  [4].

Рис. 5 показывает реализацию преобразования цифрового потока в стохастический для  $m = 4$ . Эта схема использует  $M$  бит шума при  $N_4 = 0$ . Однако использование нулевого входа смещает стохастический поток.

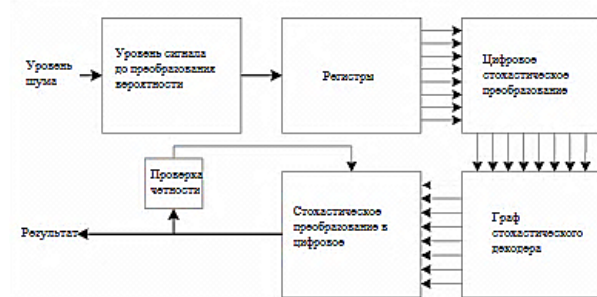


Рис. 4. Структурная схема декодера

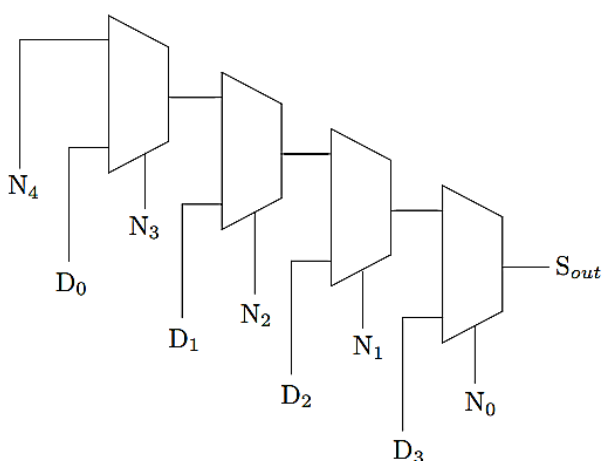


Рис. 5. Преобразование цифрового потока данных в стохастический

Для эффективного выполнения стохастических операций каждый бит в потоке одного операнда должен быть независим от битов в другом потоке операнда. Однако через некоторые вычислительные элементы декодера в потоки выходных данных вводятся битовые зависимости и корреляции, при этом потоки данных становятся непригодными для дальнейшего использования при стохастическом вычислении. Узлы проверки равенства J-K триггеров в декодере очень чувствительны к этим зависимостям на входах и часто блокируются в течение длительных периодов времени, пока не поступит правильный набор входных данных, чтобы разблокировать их. Для того, чтобы повторно ввести случайность, было введено понятие «суперузел». Он очищает сигнал и восстанавливает полезные свойства

случайности, позволяя производить дальнейшие стохастические вычисления в потоке.

Структура суперузла проста и состоит из счетчика и цифрового стохастического преобразователя. Входной поток поступает непосредственно в счетчик, чтобы подсчитать количество единиц в потоке для заданного количества циклов. Этот подсчет затем передается цифровому стохастическому преобразователю для генерации нового потока.

Стохастические потоки вероятности являются входными данными в граф декодера. В данной статье рассматривается реализация LDPC-кода длиной блока 16, как показано на рис. 1. Между узлами графа декодера были добавлены «суперузлы» для уменьшения корреляций.

Заключительный этап декодирования предполагает обработку данных с выходов графа стохастического декодера в конечный декодер. Преобразование стохастического потока в цифровой выполняется счетчиком up/down, который принимает поток в качестве входных данных. Каждый раз, когда в потоке находится 1, показания счетчика увеличиваются. Каждый раз, когда в потоке находится 0, показания счетчика уменьшаются.

Существуют две фазы вычислений. На этапе инициализации стохастический декодер работает для циклов  $T_{INIT}$ , но выходные счетчики up/down не обновляются. На этапе декодирования декодер запускается для циклов  $T_{CHECK}$ , а счетчики up/down обновляются в каждом цикле. После этих циклов декодирование  $T_{CHECK}$  и обновление счетчиков up/down продолжается до тех пор, пока на выходе не появится действительное кодовое слово, полученное посредством проверки четности кода.

Преобразование цифрового значения в стохастический поток требует нескольких случайных битов. Для этого первоначального преобразования требуются не только случайные биты, но и «суперузлы», которые регенерируют стохастические потоки. Стандартный регистр сдвига с линейной обратной связью (LFSR) обеспечивает недостаточный уровень случайности для стохастического вычисления. В регулярной структуре LFSR существует сильная корреляция между соседними битами. Это ухудшает качество вычислений, которое может быть выполнено вычислительными элементами. Однако линейные гибридные сотовые автоматы (LHCA) обеспечивают векторы с более высокой

степенью случайности. Корреляция между соседними битами значительно уменьшается при относительно небольших структурных издержках. Для генерации большого количества требуемых случайных битов использовались несколько ЛНСА разной длины.

### Реализация декодера на ПЛИС

Окончательная конструкция декодера синтезирована на ПЛИС Altera Cyclone EP1C12F324C8 с 12060 логическими элементами. Задействование ресурсов ПЛИС, максимальная тактовая частота, частота ошибок в битах и измерения пропускной способности были записаны для (16,8) LDPC-декодера, показанного на рис. 1. Декодер занял 1491 логический элемент или 12% ПЛИС. При синтезе на ПЛИС Cyclone была достигнута максимальная тактовая частота чуть более 100 МГц. При синтезе на семействе ПЛИС Stratix максимальная тактовая частота выросла до 165 МГц. Фактическая скорость передачи данных, однако, зависит от конфигурации декодера.

На рис. 6 показана скорость возникновения битовых ошибок реализации на ПЛИС декодера, в сравнении с программным моделированием стохастического декодирования, для BER  $10^{-4}$  наблюдается примерно 0,4 дБ, что объясняется грубым 4-битным квантованием входных вероятностей. Очень мало различий в частотах ошибок в битах наблюдалось при изменении параметров  $T_{INIT}$  и  $T_{CHECK}$ .

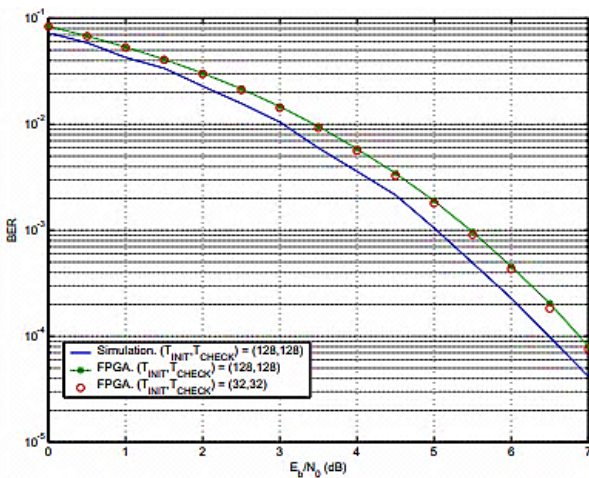


Рис. 6. Скорость возникновения битовых ошибок при реализации декодера на ПЛИС, в сравнении с программным моделированием стохастического декодирования

На рис. 7 показано время декодирования для разных ( $T_{INIT}$ ,  $T_{CHECK}$ ) вариаций. Время, показанное на графике, представляет собой среднее число тактовых циклов, необходимых для декодирования одного кодового слова. Таким образом, для высоких значений SNR декодер способен работать со средним периодом приблизительно 19,5 тактовых циклов на некодированный информационный бит. На ПЛИС Cyclone, работающем на частоте 100 МГц, декодер способен декодировать со скоростью 5,1 Мбит/с. На устройстве Stratix, работающем на частоте 165 МГц, средняя скорость передачи данных увеличивается до 8,4 Мбит/с.

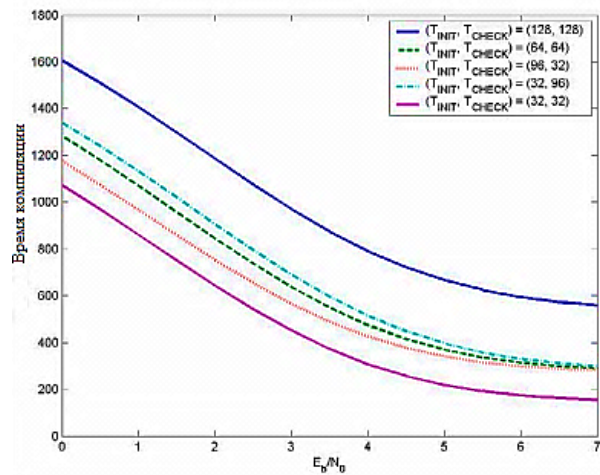


Рис. 7. Время компиляции одного кодового слова для LDPC-декодера длиной 16

### Заключение

В этой статье был рассмотрен алгоритм итеративного декодирования на основе стохастических вычислений, применительно к кодам LDPC, и представлена реализация этого алгоритма на ПЛИС для кода малой длины 16, скорость 1/2. Пропускная способность составляет около 5 Мбит/с на небольшой ПЛИС. Пропускная способность полностью параллельных итерационных декодеров, таких как аналоговые и стохастические декодеры, увеличивается почти линейно с увеличением размера кода из-за увеличения количества генерируемых информационных битов и относительно постоянной задержки декодирования. Дальнейшие исследования стохастического декодирования следует сосредоточить на применении исследуемого алгоритма к более длинным LDPC-кодам, используемым в современных стандартах связи.

### 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.
2. Свиридова И.В., Башкиров А.В., Муратов А.В. Эффективное многопороговое декодирование двоичных 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 двоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.

Поступила 18.09.2018; принята к публикации 13.11.2018

### Информация об авторах

**Башкиров Алексей Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>  
**Свиридова Ирина Владимировна** - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

## REALIZATION OF A STOCHASTIC LDPC DECODER ON A FPGA

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** this article considers LDPC codes for the following communication standards: 10GBASE-T, DVB-S2 and IEEE 802.16 (WiMAX). A review of a new class of stochastic iterative decoding architectures is presented. The proposed architecture makes completely parallel decoding of (long) modern LDPC codes working on FPGAs. Stochastic decoders represent probabilistic messages on the frequency of units in a binary stream. This leads to a simple mapping of the factor graph of the code in silicon. The implementation on the FPGA of the LDPC decoder with 8 information bits and 8 encoded bits is described. On the Altera Cyclone FPGA, the bandwidth is 5 Mbit / s when clocked at 100 MHz and is expected to increase almost linearly with the code length. Modeling of the decoder on the FPGA Altera Stratix at a demanding capacity of 8 Mbit/s was carried out. The article describes the hardware implementation of the stochastic decoder for the LDPC code. Next, we'll look at the basics of iterative decoding of LDPC codes. The concept of stochastic decoding is described below. An overview of the hardware architecture of the stochastic LDPC decoder is presented. The results of the FPGA implementation and summary are given in the conclusion of this article

**Key words:** stochastic decoder, LDPC code, stochastic calculations

### References

1. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V., ed. Zubarev Yu.B. "Interference-free coding. Methods and algorithms: manual" ("Pomekhoustoychivoe kodirovanie. Metody i algoritmy: ucheb. posobie"), Moscow, Spravochnoe izdanie, 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 failure of 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 18.09.2018; revised 13.11.2018

### Information about the authors

**Aleksey V. Bashkirov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0939-722X  
**Irina V. Sviridova**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5279-0807



## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА НА БАЗЕ ПЛИС

А.А. Пирогов<sup>1</sup>, Е.А. Бочаров<sup>2</sup>, Э.В. Сёмка<sup>3</sup>, О.Ю. Макаров<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>АО «Воронежское центральное конструкторское бюро «Полюс», г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** неотъемлемым элементом большинства радиотехнических устройств являются системы синтеза частот и сигналов. Большинство известных схем использует аналоговые элементы, которым присуще изменение параметров в той или иной степени под влиянием внешних факторов. Однако с появлением и развитием цифровой техники, которая использует исключительно математические расчеты и логические функции, устойчивые к изменению внешних факторов, появился новый способ генерации сигналов – это прямой цифровой синтез. Один из основных типов синтезаторов частот – цифровые вычислительные синтезаторы (ЦВС). Высокое разрешение по частоте и фазе, максимально быстрый переход на другую частоту без разрыва фазы, возможность управления частотой, фазой и амплитудой по цифровому интерфейсу постоянно расширяют сферу применения ЦВС в различных областях техники, таких как связь со спутниками, радиолокация, радионавигация, измерительные приборы и т.д. Прямой цифровой синтез – метод создания сигнала требуемой частоты и формы с помощью цифровых ресурсов. Благодаря цифровому решению генерируемый сигнал обладает точностью, присущей цифровым системам. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени известны и подконтрольны. Благодаря этим преимуществам прямой цифровой синтез все сильнее вытесняет аналоговые решения. Актуальность работы обусловлена отсутствием отечественных аналогов микросхем синтезаторов частот, реализованных на современной элементной базе. Описана методика проектирования прямого цифрового синтезатора (ПЦС) с четвертьволновым преобразователем (ЧВП) на базе ПЛИС

**Ключевые слова:** арифметико-логическое устройство, программируемая логическая интегральная схема, проектирование, верификация, моделирование

### Введение

Цель работы - разработать методику проектирования базовой части синтезатора частот на основе прямого цифрового синтезатора (ПЦС) с применением ПЛИС.

Схема синтезатора представлена на рис. 1. Четвертьволновый преобразователь использует свойство симметрии синуса для формирования полного периода сигнала. Это означает, что в памяти содержатся выборки только для четверти волны сигнала, которые при определенном алгоритме чтения памяти формируют полный период. Этот прием позволяет сократить объем используемой памяти в четыре раза.

Для формирования полного периода необходимы четыре цикла чтения таблицы:

- в прямом направлении (от нулевого адреса к максимальному) с сигналом положительного знака,
- в обратном направлении (от максимального адреса к нулевому) с сигналом положительного знака,

– в прямом направлении (от нулевого адреса к максимальному) с сигналом отрицательного знака,

– в обратном направлении (от максимального адреса к нулевому) с сигналом отрицательного знака [1].

При данном методе формирования весь размах сигнала будет находиться в пределах от нуля до напряжения питания ( $U_{пит}$ ) устройства. Поэтому условно нулем, относительно которого отсчитываются положительные или отрицательные полуволны, будет являться половина напряжения питания ( $U_{пит}/2$ ). И для того чтобы сформировать полуволну служат два цикла чтения ПЗУ (в прямом и обратном направлении), а сигнал знака определяет, какой она будет, положительной или отрицательной, путем сложения или вычитания значения выборок со значением условного нуля. Так амплитуда отрицательной полуволны будет лежать в пределах от нуля до напряжения  $U_{пит}/2$ , а амплитуда положительной полуволны от  $U_{пит}/2$  до  $U_{пит}$ .

В данном варианте структура ПЦС содержит следующие блоки:

- накопитель кода фазы (НКФ),
- селектор квадрантов (СК),

- постоянное запоминающее устройство со значениями выборок (ПЗУ),
- выходной инвертор (ВИ).

### Проектирование прямого цифрового синтезатора

Прямой цифровой синтезатор построен на базе ПЛИС Altera семейства Cyclone IV мо-

дель EP4СЕ6. Микросхема смонтирована на отладочной плате, которая в своем составе имеет генератор тактовой частоты 50 МГц, на которую мы и будем ориентироваться. Разработка кода программы синтезатора велась на языке Verilog в среде Quartus Prime 17.0 Lite Edition (рис. 2).

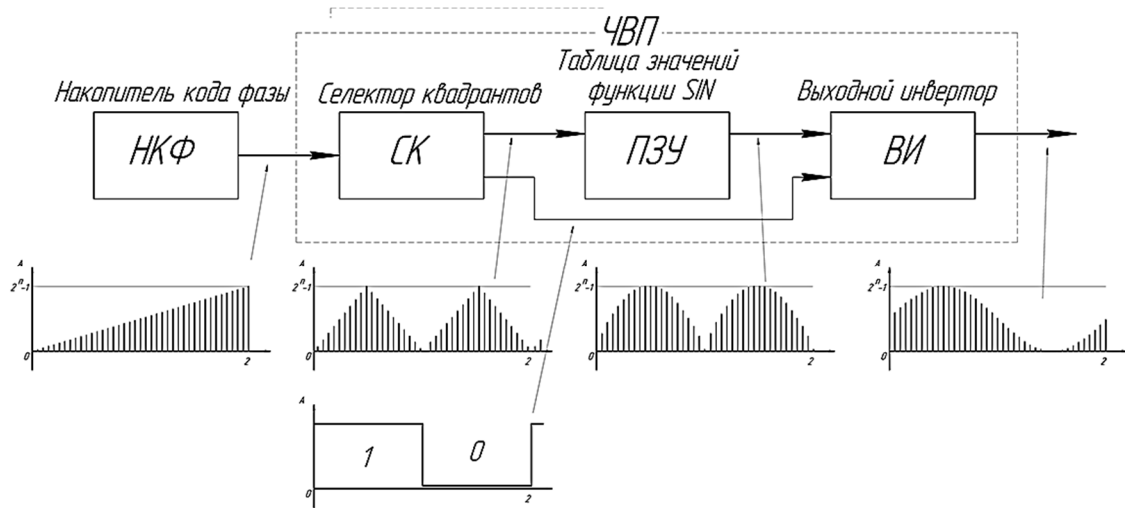


Рис. 1. Блок-схема синтезатора частот с четвертьволновым преобразователем

Основной задачей является получение сигнала синусоидального вида в цифровой форме для дальнейшей возможности применения в цифровой обработке сигналов.

Накопитель кода фазы осуществляет управление всей системой. Он отвечает за установку частоты с помощью настроечного слова, управление фазой и шага перестройки.

Значение фазы изменяется линейно и на выход поступает в цифровом виде [2].

Селектор квадрантов определяет, в каком квадранте будет располагаться считанная четверть волны в зависимости от значения фазы. На выходе имеет значения адреса для чтения таблицы ПЗУ и сигнал знака.

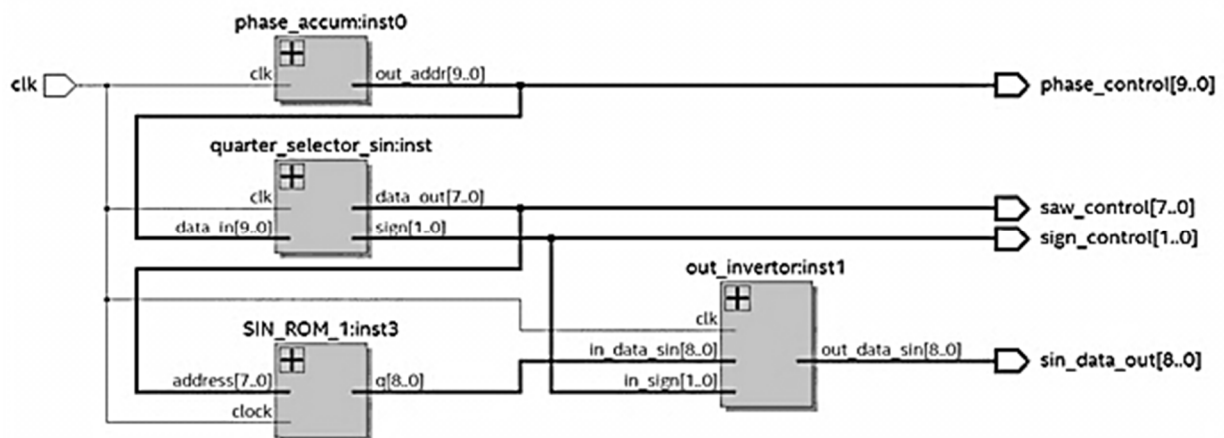


Рис. 2. Схема прямого цифрового синтезатора с четвертьволновым преобразователем в среде Quartus Prime

Постоянное запоминающее устройство содержит значения выборок для четверти волны синусоидального сигнала.

Выходной инвертор служит для окончательного формирования синусоидального сигнала. На вход принимает значения выборок из ПЗУ и сигнал знака от селектора квадрантов.

На выходе системы создается последовательность дискретных значений синуса, которые после обработки цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) и фильтрации с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ) принимают вид аналогового синусоидального сигнала [3].

При данной конфигурации методика проектирования сводится к определению таких параметров ПЦС, как:

- максимальная синтезируемая частота,
- тактовая частота,
- разрядность накопителя кода фазы,
- количество ячеек ПЗУ,
- разрядность ячеек ПЗУ.

Первый вопрос, на который необходимо ответить, приступая к проектированию ПЦС, это определение максимальной синтезируемой частоты. Если стоит цель, определить данную частоту при известной тактовой частоте, используют формулу:

$$f_{max} = 0.4 \times f_{clk}, \quad (1)$$

где  $f_{max}$  – максимальная синтезируемая частота;

$f_{clk}$  – частота тактового сигнала.

Если нужно определить частоту тактового сигнала по известной максимальной синтезируемой частоте, используют формулу:

$$f_{clk} \geq \frac{f_{max}}{0.4}, \quad (2)$$

где  $f_{clk}$  – тактовая частота;

$f_{max}$  – максимальная синтезируемая частота.

Коэффициент 0,4 говорит о том, что получить на выходе ПЦС частоту выше, чем  $0,4 \cdot f_{clk}$  не удастся, потому что реконструкция выходного сигнала невозможна без фильтра нижних частот, ограничивающего диапазон выходного сигнала приблизительно до 40% тактовой частоты.

После нахождения тактовой частоты, следующим шагом является расчет разрядности

НКФ. Она будет влиять на шаг перестройки частоты.

В своем составе НКФ содержит:

- регистр приращения фазы, содержащий настроечное слово  $M$  (код частоты), устанавливающее всю систему на нужную частоту,
- сумматор, складывающий текущее значение фазы и постоянное число  $M$ ,
- фазовый регистр, который содержит текущее значение фазы и при поступлении тактового сигнала перезагружается новым значением.

Все элементы схемы имеют одинаковую разрядность. НКФ собирается по схеме, представленной на рис. 3.

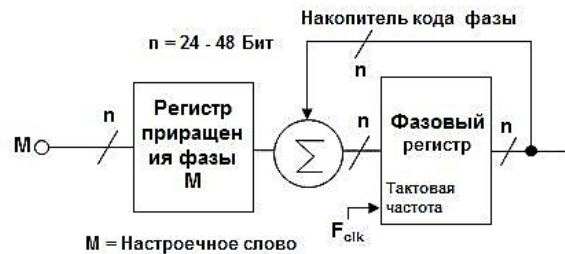


Рис. 3. Схема построения НКФ

Теперь используя известную тактовую частоту, можно подобрать разрядность НКФ, обеспечивающую наиболее близкое значение шага перестройки к желаемому значению, используя формулу:

$$\Delta f = \frac{f_{clk}}{2^n}, \quad (3)$$

где  $\Delta f$  – шаг перестройки;

$f_{clk}$  – тактовая частота;

$n$  – разрядность аккумулятора фазы.

Результатом выполнения расчета являются рассчитанные значения шага перестройки для разрядностей от 24 до 48, при заданной частоте.

Определить частоту синтезируемого сигнала можно по формуле:

$$f_{out} = M \times \frac{f_{clk}}{2^n}, \quad (4)$$

где  $f_{out}$  – синтезируемая частота;

$M$  – настроечное слово;

$f_{clk}$  – тактовая частота;

$n$  – разрядность накопителя кода фазы.

Настроечное слово  $M$  для установки ПЦС на требуемую частоту рассчитывается по следующей формуле:

$$M = \frac{2^n \times f_{out}}{f_{clk}}, \quad (5)$$

где  $M$  – код частоты;  
 $n$  – разрядность НКФ;  
 $f_{out}$  – выходная частота;  
 $f_{clk}$  – тактовая частота.

Если же синтезатор должен работать на фиксированной частоте, в регистр приращения фазы записывается константа, рассчитанная по формуле (5) соответствующая требуемой частоте. Выходной сигнал модуля НКФ должен выглядеть как последовательность дискретных значений фазы, где каждое последующее значение отличается от предыдущего на величину  $M$ . График представлен на рис. 4.

Как было указано выше, основой системы является накопитель кода фазы (НКФ, аккумулятор фазы), который осуществляет управление всей системой. Схема НКФ в среде Quartus Prime представлена на рис. 5.

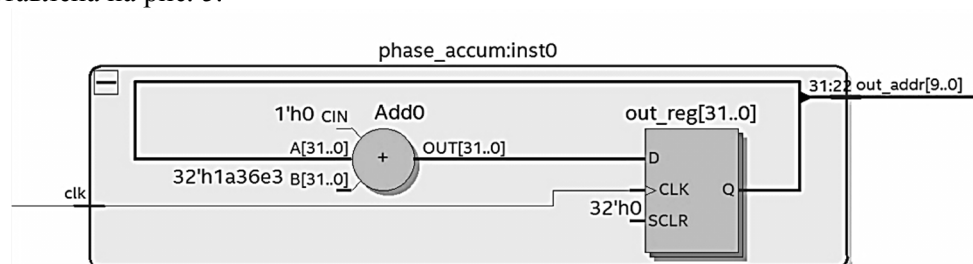


Рис. 5. Схема накопителя кода фазы в среде Quartus Prime

При имеющемся тактовом генераторе с частотой 50 МГц возможно обеспечить шаг перестройки частоты от 2,9 Гц до  $1,77 \cdot 10^{-7}$  Гц. В табл. 1 представлены сравнительные данные расчетных размеров шага перестройки для разных разрядностей накопителя фазы от 24 до 48 бит.

Для проектируемого синтезатора выбрана разрядность 32 бита, обеспечивающая шаг перестройки 0,01 Гц.

В регистр приращения фазы записывается настроечное слово, обозначаемое буквой  $M$ , которое задает шаг перестройки, соответствующий той или иной частоте. Содержимое регистра приращения фазы может принимать значения в диапазоне:

$$0 \leq M \leq 2^n,$$

На практике перед сумматором устанавливается еще один регистр (регистр приращения фазы - РПФ), который хранит в себе значение приращения фазы, обозначаемое буквой  $M$ .

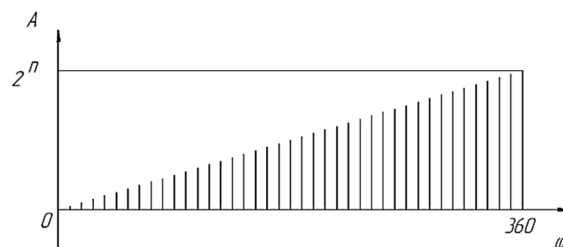


Рис. 4. Выходные данные фазы НКФ

Основной характеристикой накопителя кода фазы является шаг перестройки частоты. Этот параметр зависит от тактовой частоты и разрядности накопителя кода фазы. Разрядность накопителя выбирают из диапазона 24 - 48 бит, что позволяет обеспечить оптимальный шаг перестройки частоты [4].

Например, при тактовой частоте 50 МГц шаг может меняться от 2,9 Гц до  $1,77 \cdot 10^{-7}$  Гц.

где  $n$  – разрядность регистра приращения фазы;

$M$  – число в регистре приращения фазы.

Разрядность регистра должна соответствовать выбранной разрядности накопителя кода фазы, как и разрядность сумматора.

Нулевое приращение соответствует нулевой частоте, т.е. постоянному току на выходе, приращение  $2^n$  – максимальной частоте соответственно.

Однако, как сказано ранее, максимальной синтезируемой частотой, отвечающей условию, является 20 МГц, отсюда следует, что в нашем случае, значение  $M$ , будет меняться в пределах:

$$0 \leq M \leq M(f_{max}).$$

В шестнадцатеричном виде это выглядит как:

$$0 \leq M \leq 66666666_{16}.$$

На выходе накопитель кода фазы имеет последовательность двоичных чисел, отличающихся на величину  $M$ .

В модуле один вход, на который подается сигнал тактового генератора, и один выход, передающий последовательность значений мгновенной фазы.

Таблица 1

Таблица зависимости шага перестройки частоты от разрядности накопителя кода фазы при тактовой частоте 50 МГц

Разрядность накопителя фазы (НКФ)	Шаг перестройки частоты
24	2,98023
25	1,49011
26	0,74505
27	0,37252
28	0,18626
29	0,09313
30	0,04656
31	0,02328
32	0,01164
33	0,00582
34	0,00291
35	0,00145
36	0,00072
37	0,00036
38	0,00018
39	0,000090949
40	0,000045474
41	0,000022737
42	0,000011368
43	0,0000056843
44	0,0000028421
45	0,0000014210
46	0,00000071054
47	0,00000035527
48	0,00000017763

Модуль не имеет интерфейса управления, вместо этого в регистр приращения фазы записан фиксированный код  $M = 32'h418937$  соответствующий частоте 50 КГц. В модуле всегда при поступлении положительного фронта тактового сигнала значение приращения фазы в сумматоре складывается с текущим значением выходного регистра. Суммирование происхо-

дит до переполнения счетчика, после чего он сбрасывается и начинает счет от нуля.

Следующим этапом является создание блока селектора квадрантов. С этого блока начинается преобразование значений фазы в синусоидальный сигнал. На его вход подаются значения фазы с выхода НКФ усеченные до разрядности  $P$  отбрасыванием младших разрядов. Обычно значение  $P$  лежит в диапазоне от 8 до 16 бит, что определяется количеством используемых ячеек ПЗУ, либо зависит от имеющихся ресурсов. Отбрасывание младших разрядов вносит допустимую незначительную погрешность, так как основная масса ошибок и шумов возникает на этапе цифроаналогового преобразования с помощью ЦАП.

Работа селектора квадрантов заключается в формировании последовательности адресов для чтения содержимого постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) и формировании сигнала знака, который будет использоваться при окончательном формировании сигнала. Его работа организуется следующим образом. Из значений, поступающих на вход СК, выбираются два старших разряда и принимаются как сигналы направления чтения таблицы ПЗУ и сигнал знака [5].

Старший разряд  $P$  за полный период обращения изменяет свое состояние с частотой, соответствующей изменению знака полуволны, а разряд  $P-1$  (предпоследний) с той же частотой изменяет свое состояние, что и участки возрастания и спада полуволн синусоидального сигнала. В совокупности два сигнала определяют, в каком квадранте будут располагаться отсчеты синуса. Таблица состояний сигналов для каждого квадранта представлена далее.

Таблица 2

Таблица состояний сигналов выбора кода квадранта

Номер квадранта	Бит $P$	Бит $P - 1$
1 (I)	0	0
2 (II)	0	1
3 (III)	1	0
4 (IV)	1	1

Фактически состояние старшего разряда  $P$  можно напрямую подать на выход блока СК как сигнал знака, а внутри блока обрабатывать состояние бита  $P-1$ . Когда бит  $P-1$  имеет состояние логического нуля, значение адреса должно увеличиваться от нулевого до максимального, а при логической единице, уменьшаться от максимального до нулевого. В итоге

увеличение и уменьшение значений адреса будет соответствовать прямому и обратному чтению таблицы. Временная диаграмма представлена на рис. 6.

Далее значения адреса подаются на адресный вход ПЗУ. Запоминающее устройство может быть не только встроенным в кристалл (интегрировано в ПЛИС), но и внешним в зависимости от потребностей и ресурсов разработчика. С увеличением разрядности ячейки растет точность дискретного значения синуса. Однако окончательная точность зависит от параметров ЦАП. Обычно разрядность ячейки выбирается на два разряда больше, чем разрядность ЦАП. Поэтому разрядность ячейки ПЗУ лежит в пределах от 8 до 14 бит.

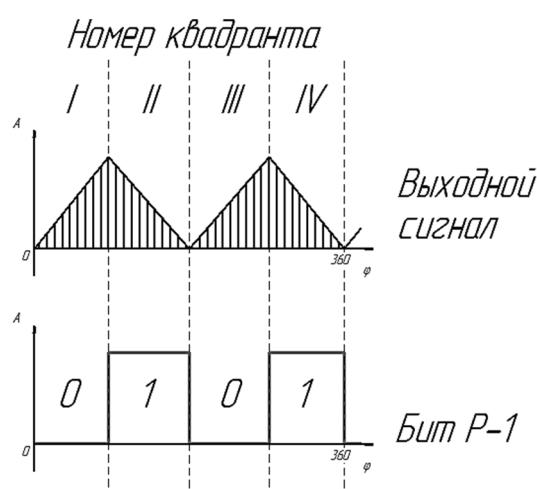


Рис. 6. Временное соотношение сигнала направления чтения и выходных значений адреса чтения ПЗУ

В обычном варианте, когда таблица ПЗУ содержит значения полного периода синуса, значения с выхода НКФ подаются напрямую на адресный вход блока памяти. В нашем же

случае, используя четвертьволновый преобразователь, если мы повторим данную операцию, получим лишь повторяющиеся четверти периода синуса на выходе.

Для формирования полного периода таблицы нужно считать немного иначе. Для формирования волны на промежутке от 0 до  $\pi/2$  (I квадрант) значения таблицы считываются в прямом направлении, от нулевого адреса к максимальному. Для формирования волны на промежутке от  $\pi/2$  до  $\pi$  (II квадрант) значения считываются в обратном направлении, от максимального адреса к нулевому. Для формирования волны на промежутке от  $\pi/2$  до  $3/2\pi$  (III квадрант) значения таблицы считываются в прямом направлении, от нулевого адреса к максимальному, с отрицательным знаком. Для формирования волны на промежутке от  $3/2\pi$  до  $2\pi$  (IV квадрант) значения считываются в обратном направлении, от максимального адреса к нулевому, с отрицательным знаком.

Для того чтобы определить, когда, с каким знаком и в каком направлении производить чтение таблицы, используется сигнал признака.

Признаками принимаются два старших бита значений шины P+2, поступающих с выхода НКФ на вход селектора. Один отвечает за направление чтения (бит P + 1), второй за знак полуволны (бит P + 2). Их совокупность отвечает за то, в каком квадранте будет формироваться волна. Таблица истинности и фото осциллограммы сигналов представлены далее.

На каждый полный цикл чтения приходится изменение логического уровня сигнала, что соответствует смене знака полуволны. Высокий уровень – положительная полуволна, низкий уровень – отрицательная полуволна. Схема селектора квадрантов представлена на рис. 7.

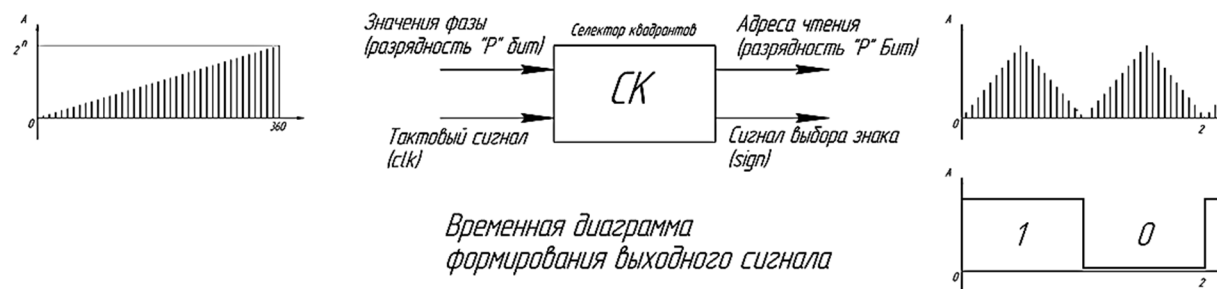


Рис. 7. Схема селектора квадрантов

Вход модуля data\_in принимает значения от накопителя кода фазы с разрядностью P + 2 бит (рис. 8). Здесь P означает ширину адреса

ячеек ПЗУ, при этом разрядность мгновенного значения фазы обрезается отбрасыванием младших бит до величины адреса P. Потеря

значений младших бит на точность не влияет, потому что в ошибке значении G-й выходного сигнала доминирует составляющая ошибки квантования цифро-аналогового преобразователя. Разрядность адреса P определяется в общем случае количеством ячеек ПЗУ. Эту зависимость можно записать как:

$$P = \log_2 K, \quad (6)$$

где P – разрядность адреса ячейки ПЗУ;

K – количество ячеек ПЗУ.

Современные ПЗУ позволяют организовать адресацию от 32 до 65536 ячеек, что соответствует разрядности адреса от 4 до 16 бит соответственно. В данном проекте выбрана разрядность адреса ПЗУ равная 8 бит, что соответствует 256 ячейкам памяти, поэтому входные данные селектора квадрантов будут иметь разрядность  $8 + 2 = 10$  бит.

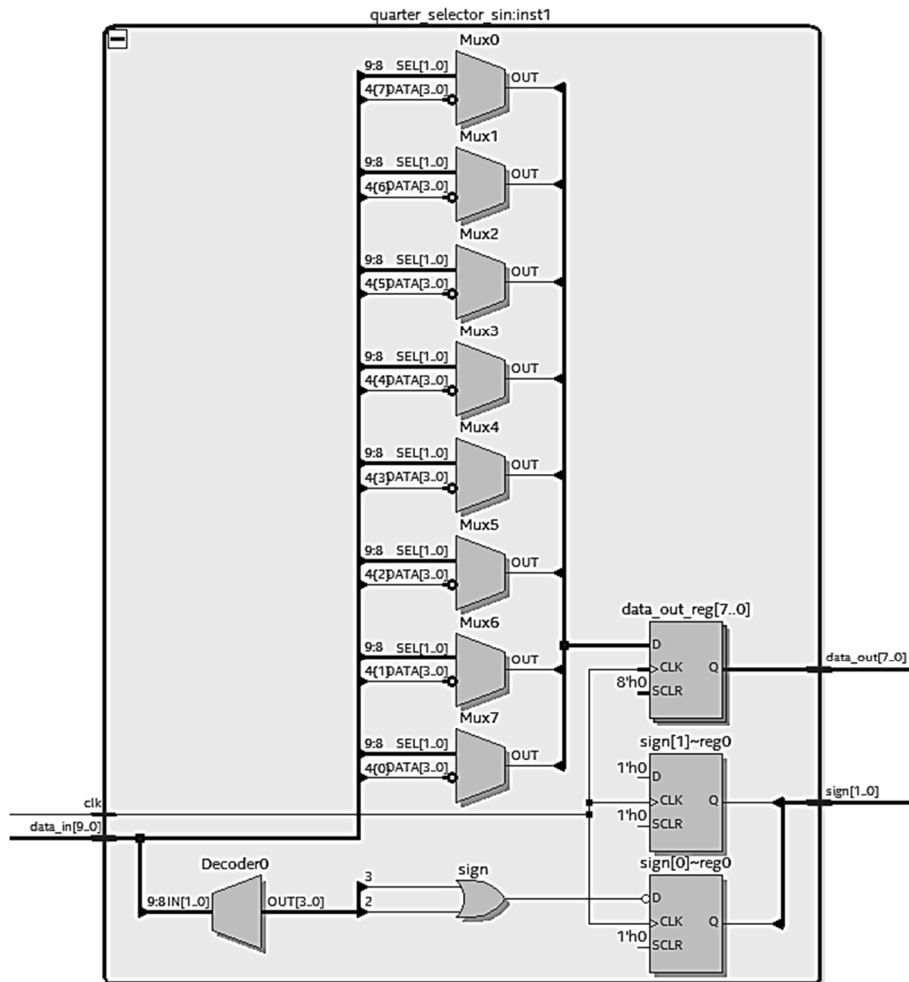


Рис. 8. Схема селектора квадрантов в среде Quartus Prime

ПЗУ содержит 256 отсчетов для формирования четверти волны синуса. Для сравнения при использовании прямого преобразователя, записав значения для целого периода при тех же параметрах Памяти, потребовалось бы уже 1024 ячеек памяти. Это в 4 раза больше, что для некоторых микросхем может быть критично.

Значения отсчетов синуса с выхода ПЗУ поступают для окончательной обработки в выходной инвертор (ВИ). Его задача по сигналу

знака от селектора квадрантов инвертировать значения синтезированной полуволны, тем самым сформировав отрицательную полуволну (рис. 9).

На вход модуль принимает мгновенные значения синуса, записанные в ПЗУ, и сигнал признака знака от селектора квадрантов. Основная задача выходного инвертора – это перевернуть полуволну по сигналу признака отрицательного знака, тем самым закончив формирование полного периода синуса.

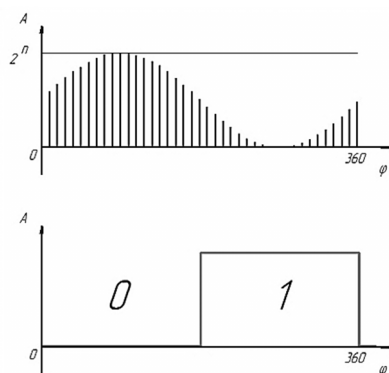


Рис. 9. Работа выходного инвертора в зависимости от сигнала знака селектора квадрантов

Схема модуля выходного инвертора в среде Quartus Prime представлена на рис. 10. Как было сказано ранее, размах сигнала

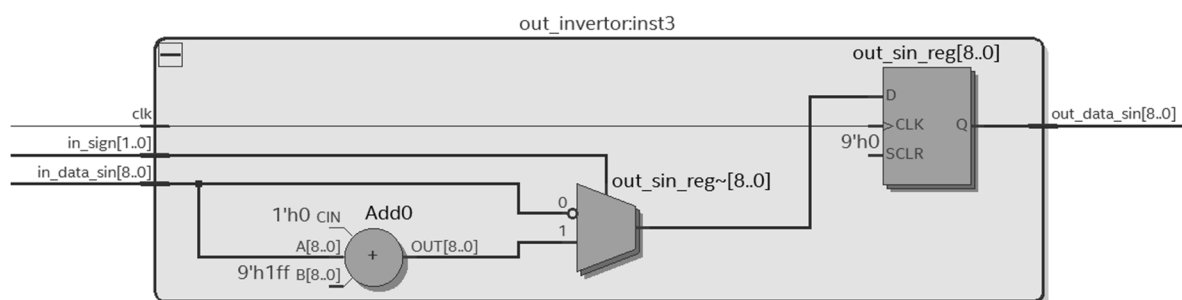


Рис. 10. Схема выходного инвертора

В итоге после соединения всех блоков по схеме (рис. 2) на выходе синтезатора создается последовательность дискретных значений синуса. Если нет необходимости в преобразовании в аналоговый вид, данные можно использовать для математической обработки. Если же необходимо преобразовать сигнал в аналоговый вид, применяется ЦАП и ФНЧ.

### Выводы

Результатом проделанной работы по изучению прямого цифрового синтеза является методика, описывающая проектирование простого синтезатора частот на базе ПЛИС. Полученная методика не охватывает всех вопросов по проектированию связанных с выбором или расчетом ЦАП и ФНЧ, влияния параметров элементов ПЦС на чистоту спектра выходного сигнала и других вопросов, связанных с обработкой сигналов. Однако полученные результаты можно использовать как базу для дальнейшего развития темы, углубленного исследования, расширения возможностей и улучшения синтезатора. В пер-

будет находиться в пределах от нуля до напряжения питания ( $U_{пит}$ ) устройства. Поэтому условно нулем, относительно которого отсчитываются положительные или отрицательные полуволны, будет являться половина напряжения питания ( $U_{пит}/2$ ). И для того чтобы сформировать полуволну положительную или отрицательную, необходимо к цифровому значению условного нуля при поступлении сигнала положительной полуволны прибавлять дискретные значения синуса, а при поступлении сигнала отрицательной полуволны, вычитать значения выборок от значения условного нуля. Так амплитуда отрицательной полуволны будет лежать в пределах от нуля до напряжения  $U_{пит}/2$ , а амплитуда положительной полуволны от  $U_{пит}/2$  до  $U_{пит}$ .

спективе полученный опыт и знания не составит труда направить на проектирование синтезаторов в исполнении интегральных микросхем и улучшение решений на базе ПЛИС, создавая цифровые синтезаторы частот прямого цифрового синтеза на отечественной элементной базе.

### Литература

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 800 с.
2. Тарасов И.Е., Потехин Д.С. Разработка систем цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 248 с.
3. Makarov E.S., Fedorov S.M. Broadband e-shaped microstrip antenna with dipole re-radiators. Microwave and Optical Technology Letters. 2012. Т. 54. № 8. С. 1785-1788.
4. Экспериментальное исследование сверхширокополосной антенны, построенной на основе модификации плоской линзы Луненберга / С.А. Антипов, А.В. Ашихмин, В.В. Негрбов, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 3. С. 113-118.
5. Самодуров А.С., Антипов С.А. Моделирование пеленгационных характеристик трехэлементной кольцевой антенной решетки с учетом влияния носителя. М.: Радиотехника, 2017. № 6. С. 145-148.



Информация об авторах

**Пирогов Александр Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

**Бочаров Евгений Алексеевич** – инженер 2 категории, АО «Воронежское центральное конструкторское бюро «Полюс» (394019, г. Воронеж, ул. Краснодарская, 16 «Б»), e-mail: ghost194@mail.ru

**Сёмка Элеонора Викторовна** – 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: semka\_elya@mail.ru

**Макаров Олег Юрьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: moy230@yandex.ru

**METHOD OF DESIGNING THE FREQUENCY SYNTHESIZER OF DIRECT DIGITAL SYNTHESIS ON FPGA**

**A.A. Pirogov<sup>1</sup>, E.A. Bocharov<sup>2</sup>, E.V. Syemka<sup>3</sup>, O.Yu. Makarov<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>**"VTSKB "Polyus", Voronezh, Russia**

<sup>3</sup>**Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russia**

**Abstract:** an integral element of most radio devices are systems for synthesizing frequencies and signals. Most of the known circuits use analog elements, which are characterized by changing parameters to one degree or another under the influence of external factors. However, with the advent and development of digital technology, which uses purely mathematical calculations and logical functions that are resistant to changes in external factors, a new way of generating signals has emerged - direct digital synthesis. One of the main types of frequency synthesizers is digital computational synthesizers (DCS). High resolution in frequency and phase, the most rapid transition to another frequency without interrupting the phase, the ability to control the frequency, phase, and amplitude of the digital interface are constantly expanding the scope of digital signaling systems in various fields of technology, such as satellite communications, radar, radio navigation, measuring instruments, etc. Direct digital synthesis is a method of creating a signal of the required frequency and shape using digital resources. Thanks to the digital solution, the generated signal has the inherent accuracy of digital systems. The frequency, amplitude and phase of the signal at any given time are known and controlled. Thanks to these advantages, direct digital synthesis is increasingly crowding out analog solutions. The work is relevant because of the lack of domestic analogues of frequency synthesizer chips, implemented on a modern element base. The technique of designing a direct digital synthesizer (DDS) with a quarter-wave converter (QWC) based on FPGA is described

**Key words:** arithmetic logic device, programmable logic integrated circuit, design, verification, modeling

**References**

1. Ugryumov E.P. "Digital circuit design: manual" ("Tsifrovaya skhemotekhnika: ucheb. posobie"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2004, 800 p.
2. Tarasov I.E., Potekhin D.S. "Development of digital signal processing systems based on FPGA" ("Razrabotka sistem tsifrovoy obrabotki signalov na baze PLIS"), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2007, 248 p.
3. Makarov E.S., Fedorov S.M., "Broadband e-shaped microstrip antenna with dipole re-radiators", *Microwave and Optical Technology Letters*, 2012, vol. 54, no. 8, pp. 1785-1788.
4. Antipov S.A., Ashikhmin A.V., Negrobov V.V., Fyedorov S.M. "Experimental study of an ultra-wideband antenna, built on the basis of a modification of a flat Luneberg lens", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 3, pp. 113-118.
5. Samodurov A.S., Antipov S.A. "Modeling the direction-finding characteristics of a three-element annular antenna array, taking into account the influence of the carrier", Moscow, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2017, no. 6, pp. 145-148.

Submitted 15.09.2018; revised 29.11.2018

**Information about the authors**

**Aleksandr A. Pirogov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

**Evgeniy A. Bocharov**, Engineer, JS «VTSKB "Polyus"» (16B Krasnodonskaya st., Voronezh 394019, Russia), e-mail: ghost194@mail.ru

**Eleonora V. Syemka**, Assistant Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: semka\_elya@mail.ru

**Oleg Yu. Makarov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА КОЛЁСНОЙ ПАРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

Д.В. Журавлёв, Т.С. Глотова, В.В. Глотов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** мониторинг состояния оборудования в широком понимании подразумевает считывание информационных сигналов с различных датчиков, сбор данных, обработку сигналов и их анализ для извлечения и оценки информации о неисправностях. Цель мониторинга - предотвращение внеплановой остановки производственных процессов из-за неисправности отдельных узлов и катастрофических аварий оборудования в ходе работы железнодорожных вагонов. Мониторинг состояния совершенно необходим на транспорте, где соображения безопасности имеют высокий приоритет. Мониторинг необходим для достижения максимально выгодного экономического эффекта, так как установка неисправностей будет проходить на ранних стадиях разработки. Вибрационные сигналы являются носителями информации как для машины в целом, так и для ее частей, каждая из которых характеризуется собственным спектром частот вибрации. Чтобы обеспечить эффективное упреждающее детектирование повреждений в сложных механизмах, содержащих множество узлов, требуются такие методы обработки и анализа сигналов, которые позволяют извлечь из полного виброакустического (ВА) сигнала частичную информацию о состоянии каждого конкретного компонента оборудования. Описаны результаты экспериментального исследования статистических характеристик ВА сигналов роликового подшипника колёсной пары железнодорожного вагона

**Ключевые слова:** виброакустические сигналы, роликовый подшипник, грузовой вагон, статистические характеристики

### Введение

Примером оценки состояния роликовых подшипников колёсных пар грузовых железнодорожных вагонов является установка УДП-

01. Данное устройство производится в г. Воронеж и внедрено в различные депо России и ближнего зарубежья [1]. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

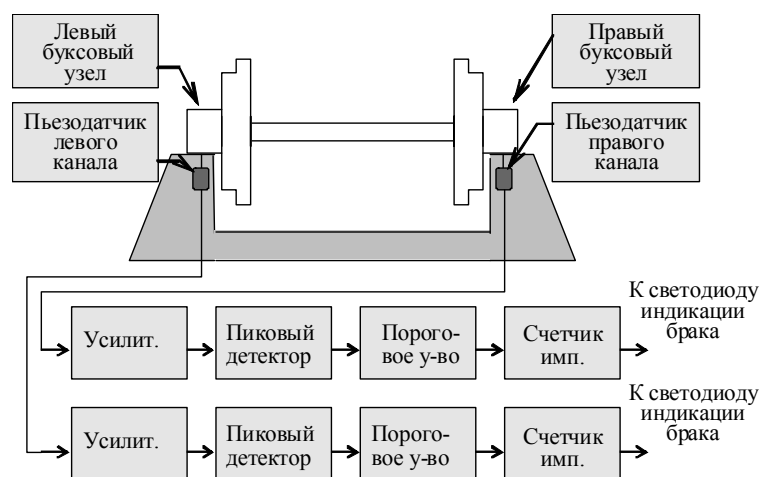


Рис. 1. Структурная схема установки УДП-01

### Эксперимент

Для диагностирования подшипников колёсная пара железнодорожного вагона устанавливается на испытательный стенд установки УДП-01 и раскручивается до 260 об/мин (что соответствует средней скорости движения грузового вагона).

Если на подшипниках присутствуют дефекты (неисправности), то при раскручивании колёсной пары возникают колебания – механические удары. Данные удары передаются через звукопровод на пьезоэлектрические датчики-акселерометры. После поступления анализа на персональный компьютер инженер принимает решение об использовании колёсной пары или замене роликового подшипника.

Информация, собранная с пьезодатчиков, содержит данные о качестве поверхностей роликовых подшипников буксового узла, показывает усложненную систему колебаний, которые соответствуют частотам резонанса, вызванного датчиком, самим звукопроводом. Сигнал подшипника во время тестирования колесной пары показан на рис. 2. Сигнал получен с помощью 8-разрядного аналогового

цифрового преобразователя на частоте дискретизации 80 кГц.

Источником ВА сигналов является искусственно созданная трещина размером 2×2 мм по образующей ролика. Сигнал, состоящий из отдельно быстро затухающих импульсов звуковой частоты, находится в пределах 2-3 мс, а средняя частота повторения около десяти импульсов в секунду.

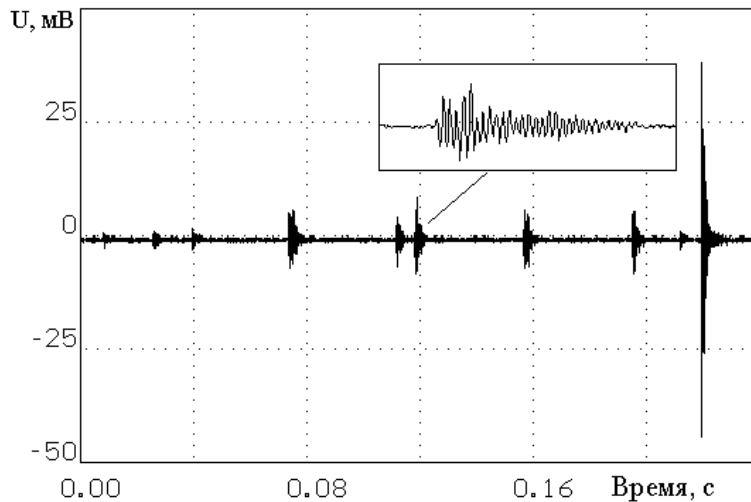


Рис. 2. Сигнал, снятый с тестируемого устройства

Сигналы с такой высокой скважностью обладают широким спектром со сложной структурой. Поэтому при проектировании предварительного усилителя необходимо учитывать информацию о спектральной плотности мощности сигнала для различных возможных комбинаций дефектов. Неплохие результаты при оценке спектральной плотности мощности даёт метод периодограмм с перекрытием сегментов и взвешиванием оконной функцией во временной области.

В соответствии с данной методикой все данные разбиваются на P сегменты по D отчётов с каждым сдвигом S от x[0] до x[N-1]. Взвешенный p сегмент состоит из  $x^{(p)}[n] = w[n] \cdot x[n+pS]$  отсчётов, где  $0 \leq n \leq D-1$ , номер сегмента p лежит в интервале  $0 \leq p \leq P-1$ , а w[n] – отсчёты окончатальной функции. Выборочный спектр p-го сегмента в диапазоне частот  $-1/2T \leq f \leq 1/2T$  определяется выражением

$$\tilde{P}_{xx}^{(p)}(f) = \frac{1}{UDT} |X^{(p)}(f)|^2, \quad (1)$$

где

$$X^{(p)}(f) = T \sum_{n=0}^{D-1} x^{(p)}[n] \exp(-j2\pi f n T) \quad (2)$$

- дискретно-временное преобразование p-го сегмента

$$U = T \sum_{n=0}^{D-1} w^2[n] \quad (3)$$

- энергия дискретно-временного окна. Оценка периодограммы получается усреднением по всем сегментам

$$\hat{P}_w(f) = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^{P-1} \tilde{P}_{xx}^{(p)}(f) \quad (4)$$

Оценка мощности сигнала спектральной плотности пьезоэлектрического датчика получена методом периодограмм с вычислениями Наттолла [2, 3].

Графики на рис. 3 иллюстрируют два предельных случая: кривая 1 получена при наличии одного искусственного дефекта ролика, а кривая 2 – при множественных разрушениях деталей подшипника после аварии железнодорожного состава. В других случаях графики спектральной плотности мощности лежат между кривыми 1 и 2.

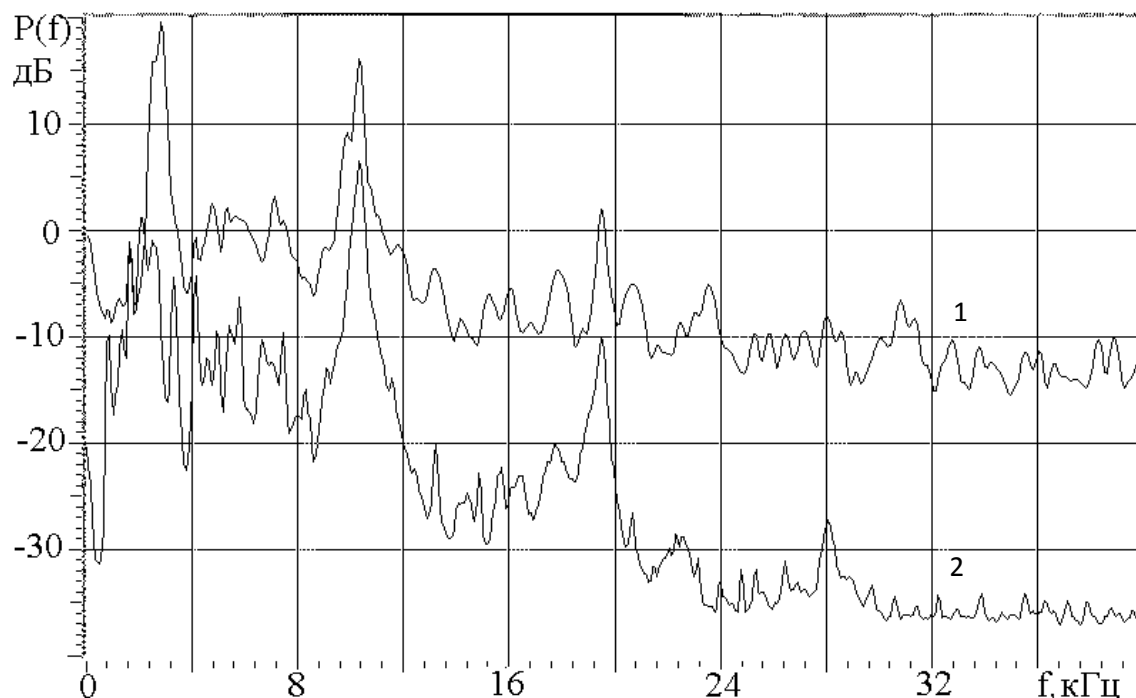


Рис. 3. Спектры сигналов пьезоэлектрического датчика

В нашем варианте резонансные максимумы спектральной плотности мощности сигнала расположены на частотах около 2.5, 10.5 и 19.5 кГц. В зависимости от конструкции корпуса буксового узла, звукопровода, датчиков положение максимумов спектральной плотности мощности и соотношений может изменяться, но в основных случаях сигнал находится в полосе частот от 4 до 18 кГц. Для оптимизации соотношения сигнал/шум на выходе предварительного усилителя полосы пропускания его амплитудно-частотная характеристика должна лежать в тех же пределах.

Для оценки состояния подшипника по методу ударных импульсов достаточно сохранить информацию только об амплитуде и времени прихода каждого дефектного импульса. Такой подход позволяет перейти к обработке огибающей сигнала пьезоэлектрического датчика с понижением частоты дискретизации как минимум на порядок, что существенно снижает требования к вычислительной мощности системы.

Сравним эмпирические полигоны распределения сигналов от исправного подшипника и подшипника с дефектом ролика, показанные на рис. 4 и 5. Легко заметить, что подавляющая часть отсчетов сигнала в обоих случаях (99.8% и 92.6% соответственно) лежит в обла-

сти  $\pm 5$  мВ, выделенной на рисунках штриховой линией. Импульсы с амплитудой  $< 5$  мВ присутствуют в сигнале пьезоэлектрического датчика независимо от наличия значительных дефектов поверхности качения. Связаны такие сигналы с наличием мелких механических включений в смазке, допустимой шероховатостью рабочих поверхностей подшипника и соударениями деталей подшипника при вращении. Поскольку импульсы с амплитудой  $< 5$  мВ не несут информации о наличии существенных дефектов подшипника, а доля таких импульсов в общем потоке превышает 90%, было бы разумно исключить из дальнейшей обработки сигналы с низкой амплитудой. Если провести эту операцию до аналого-цифрового преобразования сигнала, то нагрузка на вычислительное устройство может быть снижена в десятки раз без уменьшения вероятности обнаружения дефектов. Наиболее эффективно такая операция может быть реализована введением в детектор огибающей нелинейного элемента. При коэффициенте передачи предварительного усилителя установки УДП-01  $|K_U|=200$  перегиб вольт-амперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента должен составлять  $U_{пор} = 5 \text{ мВ} \cdot 200 = 1 \text{ В}$ . Весьма близкими ВАХ обладают кремниевые выпрямительные диоды.

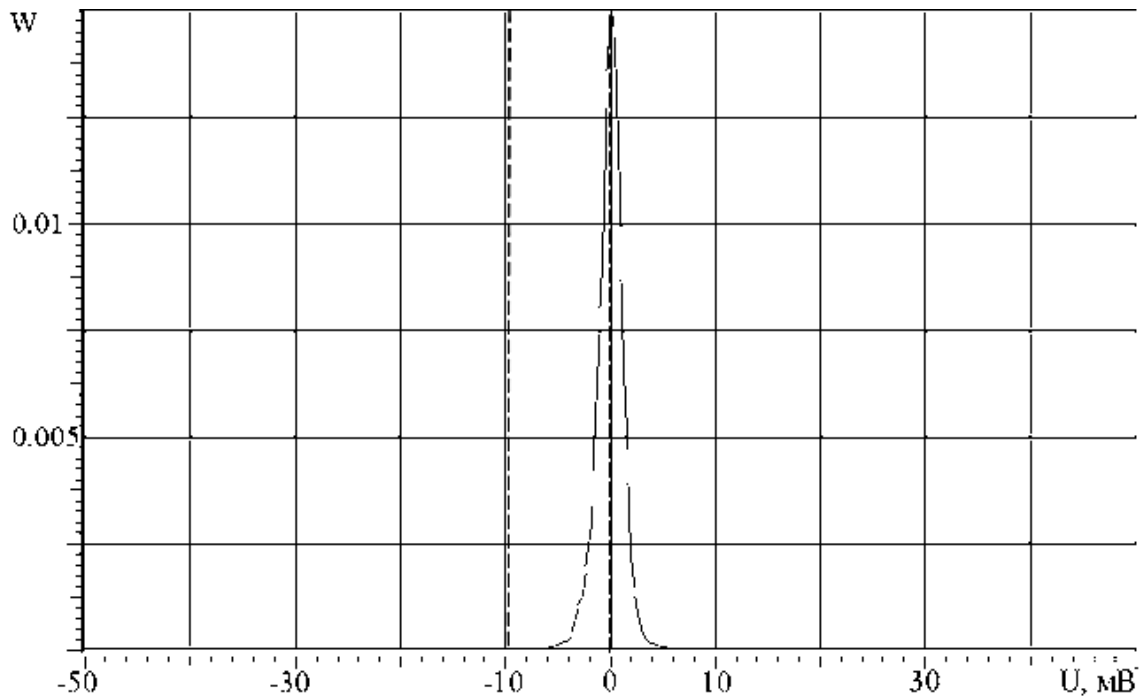


Рис. 4. Полигон эмпирического распределения амплитуд ВА сигнала от исправного подшипника

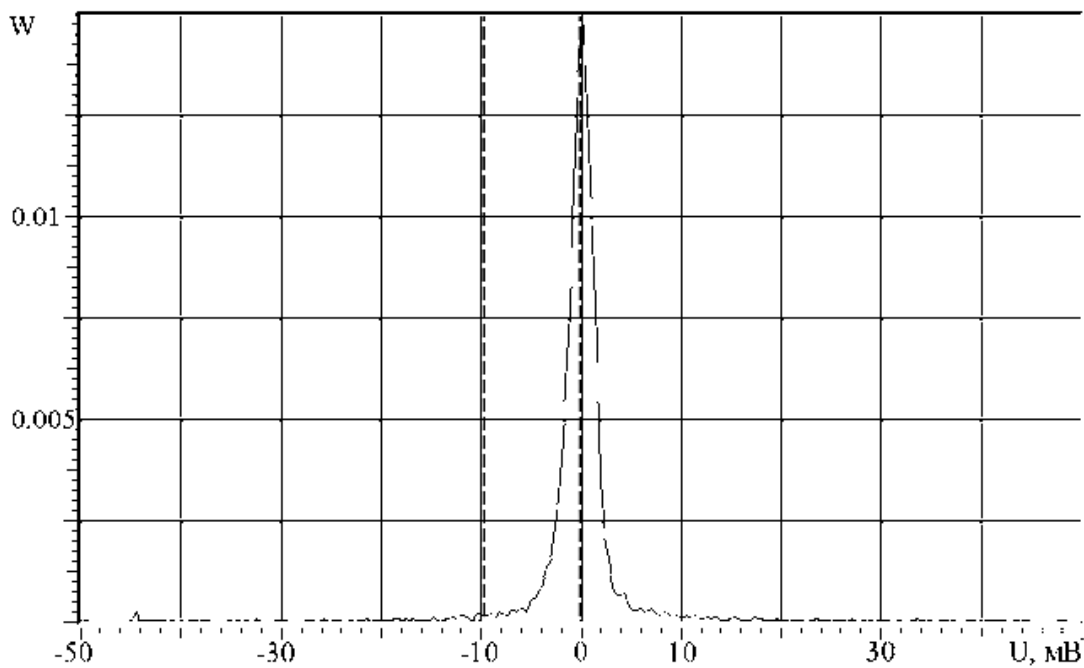


Рис. 5. Полигон эмпирического распределения амплитуд ВА сигнала от подшипника с дефектом ролика

После предложенных выше преобразований свойства сигнала существенно изменяются. Сигналы, которые мы видим на рис. 6, записаны одновременно в двух точках схемы: а –

на выходе пьезоэлектрического датчика, б – после предварительного усиления, фильтрации и выделения огибающей с одновременным подавлением сигналов с малой амплитудой.

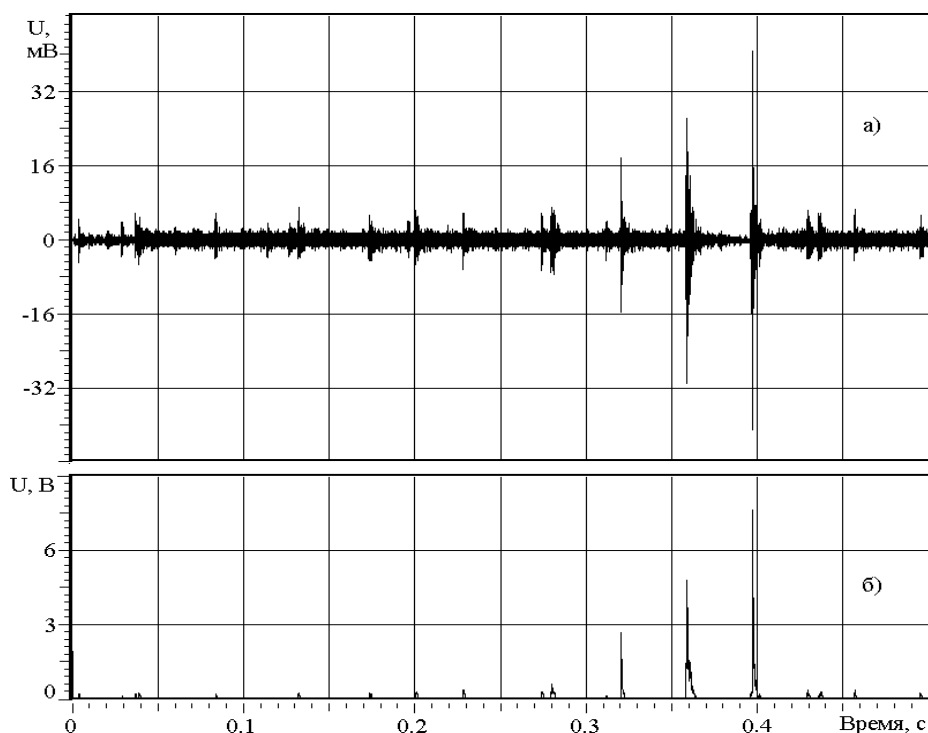


Рис. 6. Сигналы до и после преобразования

Сигнал после преобразования полностью сохраняет информацию о времени прихода импульсов от дефектов и об их амплитуде при снижении частоты дискретизации до 10 кГц. Кроме того, можно заметить, что в промежутках между импульсами (более 90 % времени наблюдения) сигнал равен нулю, что указывает на большую избыточность информационного потока. В работе [3] показано, что средние интервалы между импульсами от единичных дефектов ролика, кольца и обоймы подшипника составляют 43.21, 30.57 и 42.92 мс соответственно.

При среднем периоде следования импульсов от единичного дефекта составляет 20 мс. Чтобы провести оценку длительности интервала, необходимо определить положение каждого импульса с точностью  $\pm 2$  мс. Для решения этой задачи достаточно весь интервал наблюдения разбить на равные отрезки времени длительностью не более 6 мс и определить максимальное значение сигнала внутри каждого такого отрезка. Для запоминания максимального значения в таком случае удобно использовать пиковый детектор со схемой сброса, включаемой после каждого аналого-цифрового преобразования.

## Вывод

Учитывая особенности ВА сигналов, характерных для установки УДП-01, можно не уменьшая вероятности обнаружения дефектов достаточно снизить требования к конструктивной части установки и стоимости оборудования. При входном потоке данных в сотни байт в секунду возможно применение в блоке цифровой обработки и управления автоматизированной системы внешнего доступа недорогих микроконтроллеров типа INTEL 87C51. Данный микроконтроллер способен выполнять сложные цифровые алгоритмы обнаружения дефектов до 15 тысяч операций за каждый отчет выходных данных.

## Литература

1. Глотов В.В. Комплексный подход в проектировании помехозащищенных радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 125-128.
2. On the condition evaluation of the axle unit bearings of a wheel pair / V.V. Glotov, M.A. Romashchenko, I.V. Ostroumov, Il.V. Kondratiev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042036.
3. Глотов В.В. Математическая модель виброакустического сигнала роликового подшипника // Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2018: сб. тр. IV Междунар. молодежной науч. конф. Екатеринбург: УРФУ, Секция 3. С. 22-24.

Поступила 10.09.2018; принята к публикации 13.11.2018

**Информация об авторах**

**Журавлёв Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ddom1@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

**Глотова Татьяна Сергеевна** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

**Глотов Вадим Валерьевич** - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

**ESTIMATION METHODOLOGY OF VIBROACOUSTIC SIGNALS OF THE ROLLER BEARING OF THE RAILWAY CARRIAGE WHEEL PAIR**

**D.V. Zhuravlyev, T.S. Glotova, V.V. Glotov**

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

**Abstract:** monitoring equipment status in a broad sense means reading information signals from various sensors, collecting data, processing signals and analyzing them for extracting and evaluating fault information. The purpose of the monitoring is to prevent the unplanned shutdown of production processes due to malfunction of individual units and catastrophic equipment failures during the operation of rail cars. Monitoring of the state is absolutely necessary on transport, where safety considerations have a high priority. Smooth monitoring is necessary to achieve the most beneficial economic effect, as the installation of malfunctions will take place in the early stages of development. Vibration signals are carriers of information for both the machine as a whole and its parts, each of which has its own spectrum of vibration frequencies. In order to provide effective preventive detection of damages in complex mechanisms containing multiple nodes, these methods of signal processing and analysis are required that make it possible to extract partial information about the state of each specific component of the complete vibroacoustic (VA) signal. This article describes the results of an experimental study of the statistical characteristics of VA signals of a roller bearing a wheel pair of a railway car

**Key words:** vibro-acoustic signals, roller bearing, freight car, statistical characteristics

**References**

1. Glotov V.V. “Comprehensive approach in the design of noise-immune radioelectronic facilities with regard to electromagnetic compatibility”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp.125-128.
2. Glotov V.V., Romashchenko M.A., Ostroumov I.V., Kondratiev I.V. “On the condition of evaluation of the axle unit bearings of a wheel pair”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 327 042036.
3. Glotov V.V. “Mathematical model of the vibro-acoustic signal of a roller bearing”, *Proc. of the IV Intern. Youth Sci. Conf. in Ekaterinburg: Physics.Technologies. Innovations of the FTI-2018 (Fizika. Tekhnologii. Innovatsii FTI-2018: sb. tr. IV Mezhdunar. molodezhnoy nauch. konf. Yekaterinburg)*, URFU, sec. 3, pp. 22-24.

Submitted 10.09.2018; revised 13.11.2018

**Information about the authors**

**Dmitriy V. Zhuravlyev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ddom1@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1087-9704

**Tat'yana S. Glotova**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9122-8988

**Vadim V. Glotov**, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5129-4369

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИНЗЫ ФРЕНЕЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕМ-РУПОРА****Л.Н. Коротков, А.С. Самодуров, Д.С. Погребной****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** исследовано влияние линзы Френеля на входные параметры рупорной антенны при установке различных вариантов линзы Френеля. Установлено, что использование линзы Френеля на раскрытие рупорной антенны в большинстве случаев приводит к улучшению ряда параметров, из которых наиболее важное значение имеют коэффициент стоячей волны по напряжению, коэффициент усиления, активное и реактивное входное сопротивление. В ходе численного эксперимента было выяснено, что направление установки линзы очень важно, это наглядно отображено на графиках исследования. Так, например, перевёрнутая линза отличается от обычной тем, что у рупорной антенны с ней лучше показатели коэффициента усиления (одного из главных показателей для антенн) без сужения угла диаграммы направленности. Достигается это за счёт различного сдвига когерентных волн по фазе, благодаря чему максимумы волн из разных зон совпадают, а это в свою очередь вызывает усиление сигнала при неизменном угле излучения. Анализ полученных в ходе моделирования результатов показал, что именно перевёрнутая линза Френеля обеспечила улучшение комплекса параметров рупорной антенны в нескольких диапазонах частот. Для дополнительной проверки результатов была составлена трёхмерная диаграмма направленности антенны, благодаря чему удалось установить, что никакого отрицательного воздействия на направленность антенны нет, угол среза зубцов на зонах Френеля установлен правильно

**Ключевые слова:** ТЕМ-рупор, диэлектрическая линза, линза Френеля, рупорная антенна

**Введение**

Современный мир очень сложно представить без мобильных телефонов, микроволновок, линий электропередачи, компьютеров и других устройств, излучающих электромагнитное поле. И чем больше таких устройств появляется, тем сильнее возрастает потребность в устройствах измерения и анализа электромагнитных полей, создаваемых этими устройствами [1]. Обычно для анализа электромагнитных полей используются рупорные антенны. Они способны работать в широком диапазоне частот, т.е. являются широкополосными. Это и ряд других важных свойств (например, относительная простота конструкции) делают рупорную антенну незаменимой для различных измерений характеристик электромагнитного поля, а также в технике антенных измерений.

Для улучшения параметров рупорной антенны практикуется установка фазовыравнивающего элемента на её раскрытие. В этом исследовании в качестве такого элемента будет использована линза Френеля, рассчитанная для электромагнитных волн радиодиапазона [2].

Задачей статьи является создание рупорной антенны с линзой Френеля на выходе волновода. В работе приведены результаты расчёта использования линзы Френеля в рупорных антеннах, предназначенных для приёма электромагнитных волн СВЧ диапазона. Подобные

конструкции ТЕМ-рупоров отличает постоянство значения волнового сопротивления вдоль их продольной оси (совпадающей с направлением излучения максимальной интенсивности). Использование линзы Френеля в них предполагает преобразование фронта волны в плоский вид.

Цель статьи заключается в том, чтобы определиться, какой тип линзы лучше использовать для рупорной антенны в качестве фазовыравнивающего элемента.

**Характеристики антенн**

В настоящее время на рынке представлено достаточно много рупорных антенн. Рассмотрим наиболее интересные конкурентные предложения, найденные через каталоги Sernia [3] и Protehnology [4].

На рис. 1 - 3 приведен внешний вид и характеристики двухгребневой рупорной антенны RFspin DRH20 [5]. Применяется в автомобилях, для радиомониторинга, в электронике, в государственных и оборонных целях, в медицине, в испытаниях технических средств на электромагнитную совместимость и т.д.

На рис. 4 - 6 приведен внешний вид и характеристики двухгребневой рупорной антенны RFspin DRH40. Область применения аналогична RFspin DRH20.





Рис. 1. Антенна RFspin DRH20

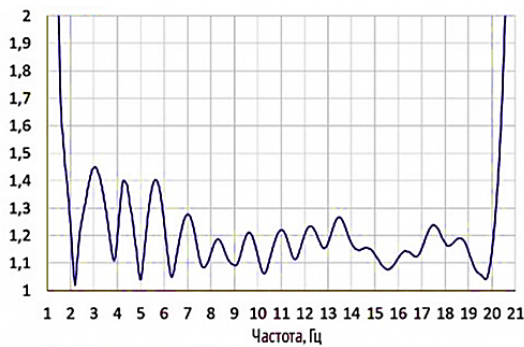


Рис. 2. KCBH для антенны RFspinDRH20



Рис. 3. Распределение коэффициента усиления RFspinDRH20



Рис. 4. Антенна RFspin DRH40

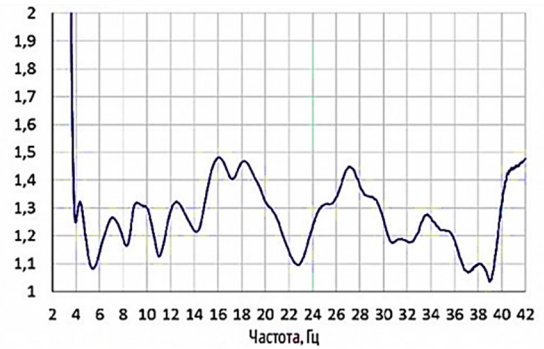


Рис. 5. KCBH для антенны RFspin DRH40

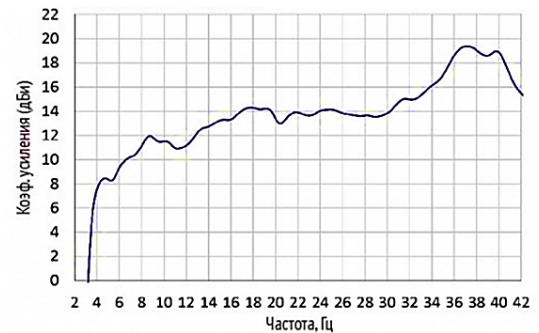


Рис. 6. Распределение коэффициента усиления RFspin DRH40

На рис. 7 - 9 приведен внешний вид и характеристики двухгребневой рупорной антенны ETS-Lindgren 3116C. По заверениям производителя [6], достоинствами антенны являются равномерное облучение поверхности тестируемого объекта и возможность точной оценки усиления.

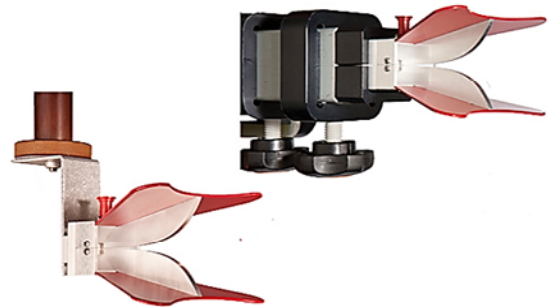


Рис. 7. Антенна ETS-Lindgren 3116C

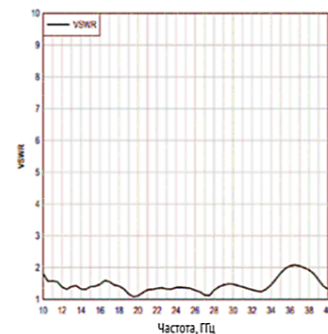


Рис. 8. KCBH для ETS-Lindgren 3116C

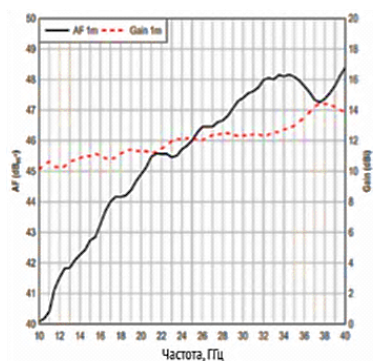


Рис. 9. Распределение КУ и АФ для ETS-Lindgren 3116C

Однако у всех конкурентов отсутствует линза Френеля, которая может использоваться как фазовыравнивающее устройство (для выпрямления фронта волны) либо в качестве фокусирующего и усиливающего мощность излучения устройства.

### Методика

Уравнение поверхности каждой  $m$ -й зоны можно записать в виде формул 1 и 2 с той лишь разницей, что фокусное расстояние  $f_m$  для каждой  $m$ -й зоны выбирается своё [7].

$$f_m = f + (m - 1) \left( + \frac{\lambda_0}{1-n} \right), \text{ при } n < 1, \quad (1)$$

$$f_m = f + (m - 1) \left( - \frac{\lambda_0}{1-n} \right), \text{ при } n > 1, \quad (2)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $m$  – номер зоны,  $\lambda_0$  – начальная длина волны,  $n$  – показатель коэффициента преломления.

Причём знак “+” берётся при  $n < 1$ , а знак “-” при  $n > 1$ . Стоит отметить, что зонирование приводит не только к положительному эффекту уменьшения толщины линзы  $d_1$ , но и к ряду отрицательных эффектов.

Во-первых, в зонированных линзах появляются или необлучаемые участки, в которых волна скользит вдоль ступеньки, или расфазированные участки в угловом секторе. Это приводит к некоторому уменьшению коэффициента направленного действия (КНД) линзовых антенн и к возрастанию уровня боковых лепестков.

Во-вторых, глубина ступеньки зависит от длины волны. К счастью, вышеописанные недостатки ввиду своего небольшого влияния слабо скажутся на качестве антенны. А вот вес и толщину линзы благодаря зонированию удастся уменьшить значительно [8].

Общий вид спроектированных рупоров приведен на рис. 10-12.

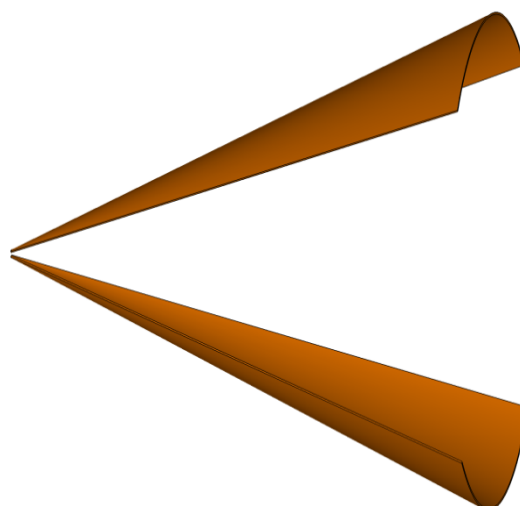


Рис. 10. Рупор без линзы

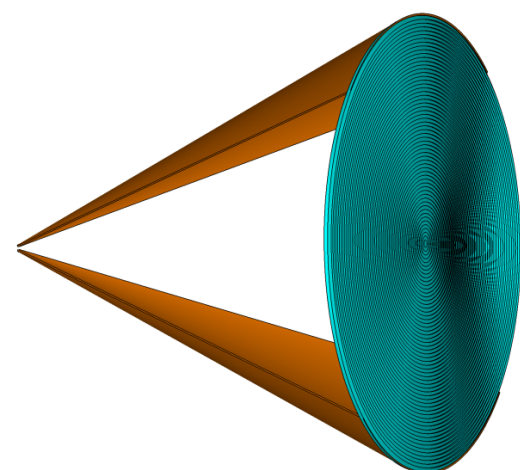


Рис. 11. Рупор с перевёрнутой линзой Френеля

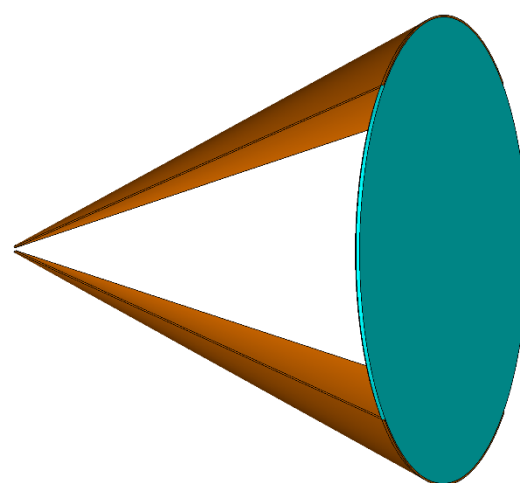


Рис. 12. Рупор с линзой Френеля

Синтез линзы выполнен в TracePro. Расчёты электромагнитного поля проведены в САПР CST (Computer Simulation Technology) STUDIO SUITE 2018 методом квантования по времени

[9], т.е. с помощью решателя Time domain solver. Программа выполняет расчёты электромагнитных полей, непосредственно решая уравнения Максвелла численным методом.

### Результаты и их обсуждение

Здесь и далее будут использоваться следующие обозначения:

- сплошная линия используется для обозначения рупора без линзы;
- пунктирная линия используется для обозначения рупора с перевёрнутой линзой;
- штриховая линия используется для обозначения рупора с линзой.

В ходе моделирования рупора с различными выравнивающими линзами, установленными на раскрыве, были получены графики, изображённые на рис. 13.

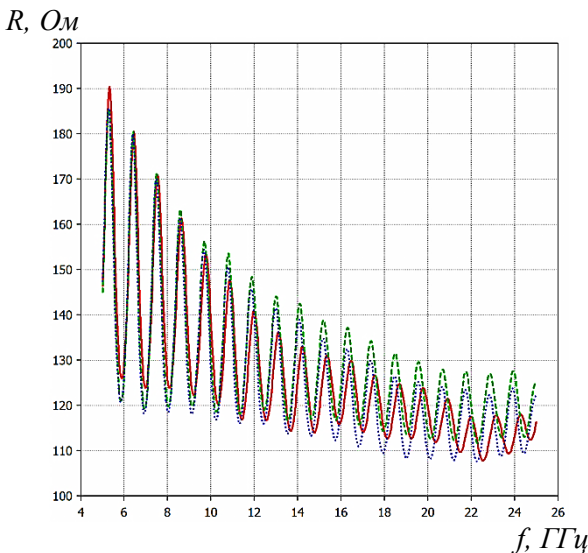


Рис. 13. Зависимости активного сопротивления от частоты

Они показывают зависимость активного сопротивления от частоты. Данные этого графика хоть и не являются критично важными, однако вполне способны показать реальное качество работы антенного оборудования и эффективность его конструкции. Среднее значение входного сопротивления можно принять 150 Ом.

На графике на рис. 13 прослеживается, что в области от 5 ГГц до 12 ГГц наличие линзы практически никак не влияет на активное сопротивление, а вот в области от 21 ГГц до 25 ГГц использование линзы приводит к повышенному разбросу значений. Однако в целом на практике такая погрешность практически никак не повлияет на эксплуатационные качества антенны.

Рассмотрим график зависимости реактивного сопротивления от частоты, изображённый на рис. 14.

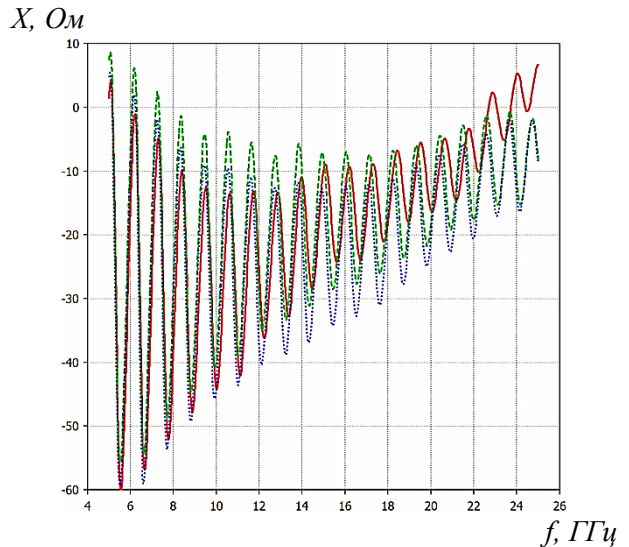


Рис. 14. Зависимости реактивного сопротивления от частоты

На графике, изображённом на рис. 14, интересна реактивная часть сопротивления для рупора без линзы тем, что на высоких и низких частотах имеется хоть и небольшое, но индуктивное сопротивление, однако такой разброс не будет критично влиять на измеренные параметры при реальном использовании. На рис. 15 приведен график зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению от частоты.

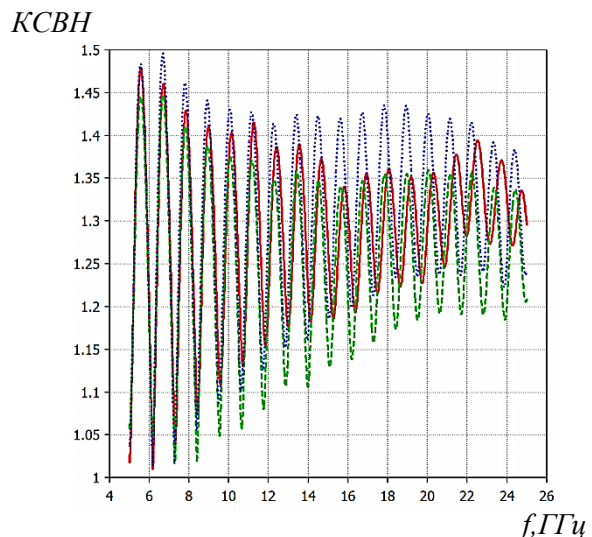
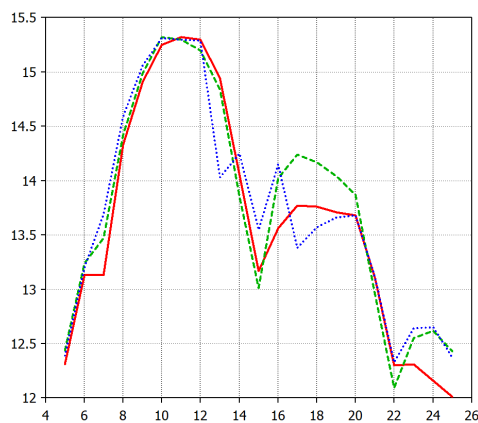


Рис. 15. Зависимости КСВН от частоты

По графику на рис. 15 видно, что КСВН по всему диапазону частот примерно одинаковый, но при использовании перевёрнутой линзы заметно небольшое повышение в диапазоне от 14

до 21 ГГц, которое, хоть и может отрицательно сказаться на качестве согласования, но в глобальном плане не способно ухудшить свойства антенны проектируемого типа. А правильно повернутая линза наоборот приближает КСВН к единице, тем самым обеспечивая более качественный приём и/или передачу сигнала. Сравнение зависимостей коэффициента усиления от частоты наглядно отобразено на рис. 16.

$D$ , дБ



$f$ , ГГц

Рис. 16. Зависимости коэффициента усиления от частоты

На графике в диапазоне 5-6 ГГц, 8-12 ГГц и 20-22 ГГц все варианты антенны выдают примерно одинаковые значения усиления, а значит, в этом диапазоне как-либо усиливать сигнал линза Френеля не будет. На частоте 7 ГГц наблюдается явное усиление сигнала в рупорах с линзой и перевёрнутой линзой. На частоте 13 ГГц рупор с перевёрнутой линзой явно проигрывает своим конкурентам по качеству усиления, однако отыгрывается в диапазоне 14-16 ГГц, а затем опять проваливается на частоте 17-18 ГГц и усиливает с 23 до 25 ГГц. Рупор с линзой стабильно усиливает сигнал в диапазонах от 16 до 20 ГГц и от 23 до 25 ГГц. К тому же рупор с линзой во всём диапазоне частот (кроме 15 ГГц) практически не уступает (разве что в пределах погрешности) рупору с перевёрнутой линзой и рупору без линзы по качеству усиления сигнала.

На основании графиков, изображённых на рис. 15 и 16, видно, что рупор с линзой является лучшим выбором для проектируемой рупорной антенны.

### Выводы

Использование рупора с линзой Френеля ощутимо улучшает характеристики антенны.

Малая толщина линзы, являющаяся следствием применения зонирования, приводит к незначительным потерям энергии в диэлектрике, и коэффициент стоячей волны по напряжению меньше 2 позволяет использовать рупорную антенну в качестве передающего устройства или в качестве излучателя антенной решетки [10].

Как линза, так и перевёрнутая линза не сильно влияют на диаграмму направленности рупорной антенны. И всё же незначительные отличия есть, но они приводят лишь к небольшому эффекту рассеивания, который при реальном использовании вряд ли будет заметен. Однако для правильного понимания необходимо учитывать, что эффект рассеивания присутствует.

Опираясь на вышеописанное исследование, в качестве фазовыравнивающего элемента оптимальным будет использовать линзу Френеля, направленную зубцами к источнику сигнала. Таким образом, использование перевёрнутой линзы Френеля на первый взгляд имеет мало практического смысла.

### Литература

1. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищённости и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ.-М.: Высш. школа, 1988.
3. Электронный каталог компании Sernia [Электронный ресурс]. URL: [https://sernia.ru/catalog/rupornye\\_antenny](https://sernia.ru/catalog/rupornye_antenny) (дата обращения 07.05.2018).
4. Электронный каталог компании Protechnology [Электронный ресурс]. URL: <https://www.protechnology.ru/page/rupornye-antenny> (дата обращения 10.05.2018).
5. Электронный каталог фирмы RFspin [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rfspin.cz/en> (дата обращения 03.05.2018).
6. Электронный каталог фирмы ETS-Lindgren [Электронный ресурс]. URL: [www.ets-lindgren.com/antennas](http://www.ets-lindgren.com/antennas) (дата обращения 04.05.2018).
7. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарёв. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
8. Чеснаков Д.Д., Самодуров А.С., Степанова А.В. Поиск путей оптимизации конструкции диэлектрической линзы для ТЕМ-рупоров // Современные проблемы радиоэлектроники. Красноярск: СФУ, 2014. С. 384 – 387.
9. Оптимизация геометрических размеров ТЕМ-рупорной антенны для излучения сверхкоротких импульсов / А.М. Бобрешов, А.А. Головкин, И.И. Мещеряков, Г.К. Усков, Е.А. Руднев, С.Н. Шульженко // Антенны. 2009. Вып. 6 (145). С. 80-83.
10. О возможности применения пирамидального ТЕМ-рупора с круглой диэлектрической линзой / С.А. Антипов, А.С. Самодуров, А.В. Степанова, Д.Д. Чеснаков // Радиотехника. 2014. № 3. С. 7-10.

Информация об авторах

**Коротков Леонид Николаевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: l\_korotkov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5350-5841>

**Самодуров Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: unaxel2000@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2283-663X>

**Погребной Денис Сергеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: denis2371@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-8344>

RESEARCH OF THE FRESNEL LENS INFLUENCE ON PARAMETERS OF THE TEM-HORN

L.N. Korotkov, A.S. Samodurov, D.S. Pogrebnoy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the influence of the Fresnel lens on the input parameters of the horn antenna is studied when different versions of the Fresnel lens are installed. It is established that the use of the Fresnel lens on the opening of the horn antenna in most cases leads to an improvement in a number of parameters, of which the most important are the standing wave voltage coefficient, the gain factor, the active and reactive input resistance. In the course of a numerical experiment, it was found that the direction of installation of the lens is very important; this is clearly shown on the graphs of research. So, for example, the inverted lens differs from the directed one in that the horn antenna has better gain factor (one of the main parameters for the antennas) without narrowing the angle of the radiation pattern. This is achieved due to a different shift of coherent waves in phase, due to which the maxima of the waves from different zones coincide, and this, in turn, causes amplification of the signal with an unchanged radiation angle. An analysis of the results obtained as a result of simulation showed that it was the inverted Fresnel lens that provided the improvement of the horn antenna parameter set in several frequency bands. For additional verification of the results, a three-dimensional radiation pattern of the antenna was compiled, which made it possible to establish that there was no negative effect on the directionality of the antenna, the angle of cut of the teeth in the Fresnel zones was set correctly

**Key words:** TEM-horn, dielectric lens, Fresnel lens, horn antenna

References

1. Pirogov A.A. “Methods of improving noise immunity and coding efficiency of subscriber access communication networks”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 162-163.
2. Sazonov D.M. “Antennas and microwave devices” (“Antenny i ustroystva SVCh”), Moscow, Vyssh. shkola, 1988.
3. Electronic catalog of Sernia, available at: [https://sernia.ru/catalog/rupornye\\_antenny](https://sernia.ru/catalog/rupornye_antenny) (accessed 07.05.2018).
4. Electronic catalog of Protehnology, available at: <https://www.protehnology.ru/page/rupornye-antenny> (accessed 10.05.2018).
5. Electronic catalog of RFspin, available at: <http://www.rfspin.cz/en> (accessed 03.05.2018).
6. Electronic catalog of ETS-Lindgren, available at: [www.ets-lindgren.com/antennas](http://www.ets-lindgren.com/antennas) (accessed 04.05.2018).
7. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomaryev L.I., “Microwave devices and antennas” (“Ustroystva SVCh i anteny”), Moscow, Radiotekhnika, 2006, 376 p.
8. Chesnakov D.D., Samodurov A.S., Stepanova A.V. “Search for ways to optimize the design of a dielectric lens for TEM-horns”, *Modern Problems of Radio Electronics (Sovremennye problemy radioelektroniki)*, Krasnoyarsk, SFU, 2014, pp.384 – 387.
9. Bobreshov A.M., Golovkin A.A., Meshcheryakov I.I., Uskov G.K., Rudnev E.A., Shul’zhenko S.N. “Optimization of the geometric dimensions of the TEM-horn antenna for radiation of ultrashort pulses”, *Antennas (Antenny)*, 2009, no. 6 ( 145 ), pp. 80-83.
10. Antipov S.A., Samodurov A.S., Stepanova A.V. Chesnakov D.D. “On the possibility of using a pyramidal TEM horn with a round dielectric lens”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 7-10.

Submitted 03.09.2018; revised 30.11.2018

Information about the authors

**Leonid N. Korotkov**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: l\_korotkov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5350-5841>

**Aleksandr S. Samodurov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: unaxel2000@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2283-663X>

**Denis S. Pogrebnoy**, Student, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: denis2371@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4318-8344>

**УПРАВЛЯЕМЫЕ ДВУХКАСКАДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ НА ПАВ-ФИЛЬТРАХ****М.И. Бочаров<sup>1</sup>, С.Г. Некрасов<sup>2</sup>, А.Е. Акиншин<sup>1</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>АО НКТБ «Феррит», г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** к управляемым генераторам высокочастотных колебаний, используемых на высоких частотах и СВЧ, предъявляются повышенные требования по линейности модуляционных характеристик, величине девиации частоты, уровню шумового излучения и стабильности частоты. Эти противоречивые требования могут быть выполнены с использованием генераторов, выполненных на двухкаскадных усилителях и фильтрах на поверхностных акустических волнах (ПАВ). На основе анализа основных структур двухкаскадных усилителей (каскадных схем) сделано обоснование по реализации управляемого генератора на ПАВ полосовых фильтрах с применением двухкаскадных усилителей общая база - общий коллектор при токовом управлении частотой генератора барьерной емкостью варактора. Для реализации управляемых генераторов с оптимальными характеристиками предложена методика их расчета, основанная на матричном методе и применении Y-параметров, что позволяет реализовать оптимальный энергетический режим работы с минимальными нелинейными искажениями. Для оценки достоверности полученных результатов проведены моделирование и экспериментальная проверка статической модуляционной характеристики (СМХ), динамической модуляционной характеристики (ДМХ), уровня шумового излучения и нелинейных искажений. Установлено, что диапазон перестройки по частоте ПАВ-генератора составляет около 0.9 % при девиации частоты 230 кГц, уровне шумового излучения около 155 дБ/Гц при отстройке от средней частоты на 100 кГц и режимной нестабильности частоты  $1.8 \cdot 10^{-5}$  при изменении напряжения питания на  $\pm 5$  %

**Ключевые слова:** ПАВ-фильтр, двухкаскадный усилитель, матричный метод, модуляционные характеристики, моделирование и экспериментальные исследования

**Введение**

К устройствам генерирования колебаний систем связи и измерительной техники предъявляются повышенные требования по диапазону рабочих частот, стабильности частоты и уровню нелинейных искажений и шумового излучения. Реализация этих требований во многих случаях может быть осуществлена с использованием генераторов на ПАВ-фильтрах [1...4]. Это обусловлено несколькими причинами: высокими избирательными свойствами этих устройств и технологичностью, появлением новых принципов построения ПАВ-фильтров [3...7], позволяющих существенно улучшить технические характеристики устройств на ПАВ-генераторах. Перспективным является использование и схемотехнических методов, которые также улучшают технические характеристики. В частности, в [8] исследован ПАВ-генератор, в котором для перестройки по частоте используется емкость варактора, включенного в одну из ветвей П-контура. В результате существенно расширяется полоса рабочих частот.

**Постановка задачи**

Перспективным является использование ПАВ-генераторов и с применением двухкаскадных усилителей [9]. Из возможных вариантов двухкаскадных усилителей для построения управляемых генераторов наиболее целесообразным является применение усилителей типа общая база - общая база (ОБ)-(ОБ), общая база - общий коллектор (ОБ)-(ОК), общий эмиттер - общий коллектор (ОЭ)-(ОК), которые генерируют большие уровни ВЧ мощности при одинаковых потерях в фильтрах по сравнению с однокаскадными генераторами. При этом наиболее высокочастотными из приведенных структур являются генераторы, выполненные по схеме ОБ-ОБ [10]. Однако они имеют существенные недостатки: относительно небольшой уровень выходной мощности, при которой достаточно большая режимная нестабильность частоты, сложность согласования с относительно небольшим сопротивлением внешней нагрузки.

Оптимальным из приведенных структур является генераторы, выполненные по схеме ОБ-ОК. Один из вариантов принципиальной схемы такого устройства приведен на рис. 1.

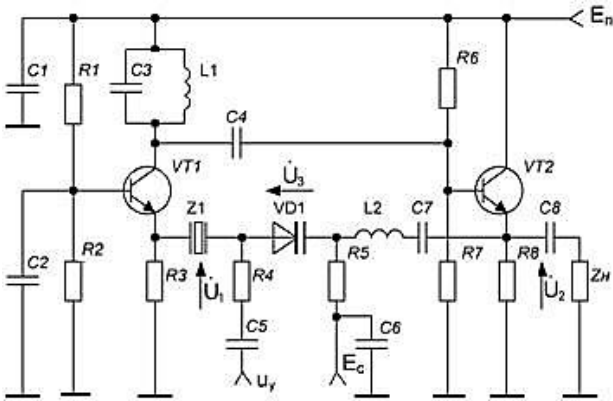


Рис. 1. Принципиальная схема генератора

В этой схеме на транзисторе VT1 выполнен каскад с ОБ, а на транзисторе VT2 каскад с ОК (эмиттерный повторитель). ПАВ-фильтр Z1, варактор VD1, его барьерная емкость, которая совместно с индуктивностью катушки L2 и образует последовательный LC контур, создают цепь положительной обратной связи. Достоинством этого устройства является большая прямая проводимость при работе как при больших, так и небольших сопротивлениях внешней нагрузки  $Z_H$ . Этим и обеспечивается его эффективная работа как на низких, так и на высоких частотах.

Управляющий входной сигнал подается на варактор VD1 через фильтр R4, C5. Напряжение смещения  $E_c$  передается через фильтр R5, C6. В этом устройстве оба каскада содержат 100-процентную отрицательную обратную связь, что повышает область рабочих частот. Кроме этого, за счет подключения цепи обратной связи к выходу ОК, имеющему малое выходное сопротивление, достигается более высокая стабильность частоты.

Необходимо также отметить, что возбуждение автоколебаний происходит около резонансной частоты последовательного контура, образованного статической емкостью фильтра Z1, катушкой индуктивности L2, емкостью варактора VD1. Этим достигается зарядовое (токовое) управление емкостью варактора VD1. При таком соединении его кулонвольтная характеристика (KBX) представляется следующим выражением

$$u(q) = [(1-v) \cdot q / (C_{y0} \phi_k^v) + \phi_k^{1-\gamma}]^{1/(1-\gamma)} - \phi_k, \quad (1)$$

где  $C_{y0}$  – емкость варактора в рабочей точке;  $\phi_k$  – контактная разность потенциалов (0.5... 0.7 В);  $v$  – коэффициент нелинейности (0.5... 1).

Для наиболее широко используемых на практике варакторов ( $\gamma = 0.5$ ) его KBX в барьерном режиме описывается зависимостью

$$u(q) = C_{y0}^{-1} q + (4\phi_k)^{-1} C_{y0}^{-2} q^2. \quad (2)$$

### Выбор метода исследования

Для определения оптимального режима возбуждения управляемого генератора воспользуемся матричным методом [11]. Для этого представим принципиальную схему (рис. 1) в виде структуры, состоящей из параллельного соединения активного (усилителя) и пассивного (цепи обратной связи) четырехполюсников. Далее с использованием Y параметров транзисторов [9] формируются матрицы проводимости усилителя и цепи обратной связи. При этом матрица проводимости усилителя имеет следующий вид

$$\|Y_u\| = \begin{vmatrix} \dot{Y}_{11} & -\frac{\dot{Y}_{11}(\dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{22})}{\dot{Y} + \dot{Y}_4} \\ -\frac{\dot{Y}_{21}^2}{\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4} & \dot{Y}_c - \frac{\dot{Y}_{11}(\dot{Y}_{21} + \dot{Y}_{11})}{\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где  $\dot{Y}_{11} = g_{11} + j \cdot b_{11}$  – входная проводимость транзистора ( $g_{11}$  – активная составляющая проводимости,  $b_{11}$  – реактивная составляющая проводимости);  $\dot{Y}_{12} = g_{12} + j \cdot b_{12}$  – проводимость обратной передачи ( $g_{12}$  – активная составляющая проводимости обратной передачи,  $b_{12}$  – реактивная составляющая проводимости обратной передачи);  $\dot{Y}_{21} = g_{21} + j \cdot b_{21}$  – проводимость (крутизна S) прямой передачи ( $g_{21}$  – активная составляющая проводимости прямой передачи,  $b_{21}$  – реактивная составляющая проводимости прямой передачи);  $\dot{Y}_{22} = g_{22} + j \cdot b_{22}$  – выходная проводимость ( $g_{22}$  – активная составляющая выходной проводимости,  $b_{22}$  – реактивная составляющая выходной проводимости);  $\dot{Y}_4 = R_3^{-1} + j \cdot X_3^{-1}$  – проводимость контура L1, C3;  $R_3 = Q_k \cdot \rho_k$  – эквивалентное активное сопротивление этого контура на резонансной частоте,  $R_3^{-1}$  – активная проводимость контура,  $Q_k$  – добротность контура,  $\rho_k$  – волновое сопротивление контура;  $X_3^{-1}$  – реактивная проводимость контура;

$$\dot{Y}_c = \dot{Y}_{11} + \dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{21} + \dot{Y}_{22}.$$

Матрица проводимости цепи обратной связи приводится к следующему виду

$$\|Y_{oc}\| = \begin{vmatrix} \dot{Y}_1 + \dot{Y}_3 & -\dot{Y}_3 \\ -\dot{Y}_3 & \dot{Y}_1 + \dot{Y}_3 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где  $\dot{Y}_1 = 1/R_3$ ;  $\dot{Y}_2 = 1/R_6$ ;  $\dot{Y}_3 = g_3 + +j\omega_0 C_\Sigma$ ;  $g_3 = 1/(r_1 + r_s + r_k)$ ,  $r_1, r_s, r_k$  – сопротивления потерь ПАВ-фильтра Z1, варактора VD1 и индуктивности L2 соответственно.  $C_\Sigma = C_0 \cdot C_{y0}/(C_0 + C_{y0})$  – общая (суммарная) емкость цепи обратной связи:  $C_0$  – статическая емкость фильтра Z1;  $C_{y0}$  – емкость варактора VD1.

Для составления матрицы проводимостей автогенератора сделаем следующие допущения:  $Y_{21} \gg Y_{12}$ ,  $Y_{21} \gg Y_{22}$ ,  $Y_{22} \gg Y_{11}$ ,  $Y_{11} \gg Y_{22}$ , что следует из реальных значений Y-параметров транзисторов [13].

С учетом принятых допущений, а также малой рассеиваемой мощности на транзисторе, чистоты спектра выходного колебания и работе транзисторов в недонапряженном режиме, матрица Y-параметров управляемого генератора принимает следующий вид

$$||Y_{\Gamma}|| = \begin{vmatrix} \dot{Y}_{11} + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_3 & -\frac{\dot{Y}_{11}(\dot{Y}_{12} + \dot{Y}_{22})}{\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4} - \dot{Y}_3 \\ -\dot{Y}_3 - \frac{\dot{Y}_{21}^2}{\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4} & \frac{\dot{Y}_{21}\dot{Y}_4}{\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4} + \dot{Y}_1 + \dot{Y}_3 \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Для проведения анализа предположим также, что режимы работы транзисторов VT1 и VT2 по постоянному току таковы, что их параметры практически одинаковы. Влиянием внешней нагрузки  $Z_n$ , конденсаторов C1, C2,  $C_\Sigma$ , резисторов R1, R2, R6, R7 на условия самовозбуждения и генерируемую частоту пренебрегаем. С учетом этих допущений эквивалентная схема управляемого генератора принимает вид, представленный на рис. 2.

Поскольку автоколебания возникают в режиме малого сигнала, то можно считать, что возбуждение генератора происходит при условии, что в определителе (5) действительная (реальная  $\Delta=0$ ) и мнимая составляющие ( $\text{Im}\Delta=0$ ).

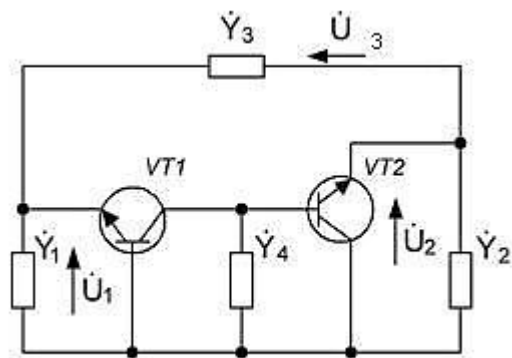


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора

В стационарном режиме необходимо обеспечить и ненапряженный режим работы транзисторов, при котором происходит минимальное изменение реактивных параметров транзисторов, в результате достигается максимальная режимная стабильность частоты. При этом для определения оптимального режима можно использовать полигональную аппроксимацию только для крутизны проходной характеристики транзисторов. С учетом этого усредненная крутизна по первой гармонике определяется с помощью выражения

$$S_1 = \gamma_1(\theta)^{-1} \left\{ \frac{0.5(\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_1)\dot{Y}_4}{\dot{Y}_3} + \frac{\dot{Y}_4}{2} + \left[ \frac{0.5\dot{Y}_4(\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_1)\dot{Y}_3}{\dot{Y}_3} + \frac{\dot{Y}_4}{2} \right]^2 + \frac{\dot{Y}_1(\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_1)(\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4)}{\dot{Y}_3} + (2\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_1)(\dot{Y}_{11} + \dot{Y}_4) + \left. \frac{\dot{Y}_{11}\omega_0^2 C_0 C_{y0}}{\dot{Y}_3} \right]^{0.5} \right\}, \quad (6)$$

где  $\gamma_1(\theta)^{-1}$  – коэффициент разложения по первой гармонике для угла отсечки  $\theta$  [10].

С использованием (6) определяется оптимальный режим работы, которому соответствует устойчивая работа устройства при минимальных нелинейных искажениях.

Генерируемая частота в устройстве (рис. 1) при добротности ПАВ-фильтра, превышающей добротность фильтрующей цепи ( $L_2, C_{y0}$ ) приблизительно на порядок, как и для генератора [12], находится в области с максимальной крутизной фазочастотной характеристики ПАВ-фильтра и совпадает со скатом его амплитудно-частотной характеристики. Поэтому можно считать, что ее середина сдвинута относительно центральной частоты ПАВ-фильтра приблизительно на половину его полосы пропускания, определенной по уровню 3 дБ.

Необходимо также определить и область безынерционной работы транзисторов, в которой практически не возникают фазовые сдвиги, обусловленные влиянием паразитных реактивных элементов транзисторов. Эта область генерируемых частот определяется из условия  $f_r < 0.25f_s$  ( $f_s$  – граничная частота транзистора по крутизне),



$$f_s = f_t / (S r_0), \quad (7)$$

где  $f_t$  – граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с ОЭ;  $r_0$  – сопротивление материала базы транзистора (справочные величины) [11].

Следует отметить, что при оптимальном выборе транзисторов безынерционный режим их работы перекрывает весь диапазон известных ПАВ-фильтров [5...7]. Так, для транзистора КТ399А [13]:  $f_t = 1,8$  ГГц, граничная частота по крутизне  $f_s = 1,5$  ГГц. Поэтому безынерционная область частот с учетом (7) находится в полосе до 450 МГц. С учетом этого при использовании транзисторов с  $f_t \geq 10$  ГГц можно считать, что для генераторов с ПАВ-фильтрами [5...7] режим работы транзисторов будет безынерционным. Поэтому расчетные соотношения (5) и (6) можно упростить, исключив реактивные составляющие  $Y$  параметров транзисторов.

С использованием данной методики выполнен расчет принципиальной схемы управляемого генератора (рис. 1) в оптимальном режиме с использованием СВЧ транзисторов КТ399А [13] при потребляемом токе  $I_{к0} = 5$  мА каждым транзистором и варакторе 2В124А. В качестве ПАВ-элемента выбран полосовой фильтр с параметрами:  $f_0 = 85,38$  МГц – центральная частота; динамические параметры:  $L_1 = 87,65$  мкГ,  $C_1 = 0,04$  пФ,  $r_1 = 28,8$  Ом - динамические параметры;  $C_0 = 6$  пФ - статическая емкость; полоса пропускания по уровню 3 дБ равна 1,3 МГц.

### Моделирование и экспериментальные исследования

Для выявления работоспособности устройства и его основных технических характеристик проводилось моделирование устройства с использованием системы AWR Microwave Office [14]. В процессе моделирования использовались библиотечные модели компонентов, имеющихся в программе. Вместо транзисторов КТ399А применены их зарубежные аналоги BFR93А, а варактор 2В124А заменен на аналог ВВ639.

В процессе моделирования определялись: спектр выходного ВЧ колебания, уровень сигнала основной частоты и побочных гармоник.

Установлено, что происходит устойчивое возбуждение колебаний вблизи центральной частоты ПАВ-фильтра. В результате при потребляемом токе  $I_{к0} = 5$  мА каждым транзи-

стором (рис. 1) выходная мощность составляет около 4 мВт на нагрузке 50 Ом, а уровень побочных гармоник не превышает 20 дБ. При этом ток, протекающий через транзисторы, имеет форму импульсов с  $\theta \approx 140^\circ$ .

Определялись также и модуляционные характеристики: СМХ, приведенная на рис. 3.

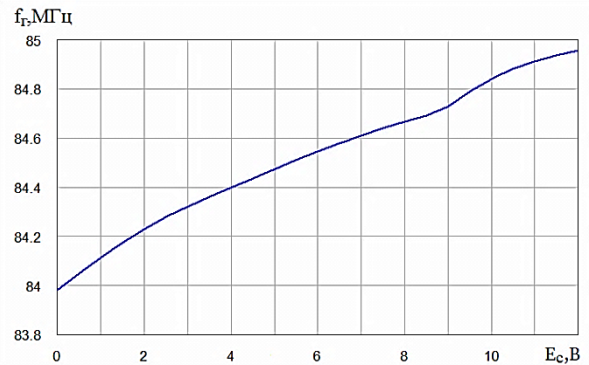


Рис. 3. Статическая модуляционная характеристика

Из рис. 3 следует, что диапазон перестройки по частоте составляет около 0,9 %, при этом диапазон линейной перестройки 0,6 %, а смещение средней частоты генерируемых колебаний от  $f_0$  составляет 0,21 МГц и практически равен половине полосы пропускания ПАВ-фильтра.

Уровень шумового излучения (рис. 4) составляет около 155 дБ/Гц при отстройке от центральной частоты на 100 кГц.

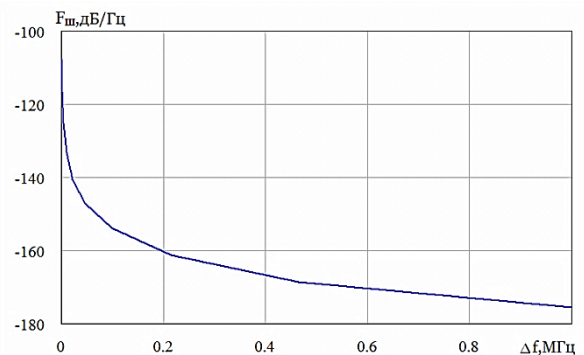


Рис. 4. Уровень шумового излучения

Экспериментально определялись динамическая модуляционная характеристика и уровень шумового излучения в ближней зоне. Установлено, что девиация частоты изменяется линейно до значения  $\Delta f_d \approx 230$  кГц, а уровень шумового излучения равен 109 дБ/Гц при отстройке от генерируемой частоты на 1 кГц и 128 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц.

Режимная нестабильность частоты при изменении напряжения питания на  $\pm 5\%$  составляет  $1,8 \cdot 10^{-5}$ .

### Заключение

Для определения оптимального режима работы управляемого генератора использован матричный метод, основанный на  $Y$  параметрах элементов его принципиальной схемы. Это позволяет определить его оптимальный режим с углом осечки  $\theta \approx 120^\circ \dots 150^\circ$ , минимальными нелинейными искажениями и максимальной стабильностью частоты.

Результаты моделирования показали, что двухтранзисторные управляемые генераторы, выполненные с использованием высокочастотных усилителей и ПАВ-фильтров с полосой пропускания 1,3 МГц, обеспечивают полосу перестройки 0,9 % при практически линейной модуляционной характеристике в полосе 0,6 % и уровня шумового излучения 155 дБ/Гц при отстройке от генерируемой частоты на 100 кГц.

Результаты экспериментальных исследований показали, что девиация частоты линейна до 230 кГц; уровень шумового излучения в ближней зоне составляет 98 дБ/Гц при отстройке от центральной частоты на 1 кГц и 128 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно большой перестройке по частоте и для данного типа генераторов, и низком уровне шумового излучения.

### Литература

1. Семенов Э.А., Посадский В.Н. Развитие СВЧ техники объемных и поверхностных акустических волн // Радиотехника. 1999. № 4. С. 81-85.

2. Багдасарян А.С. Устройства на поверхностных акустических волнах. Состояние и перспективы // Национальная академия наук. Режим доступа: <http://www.sci.am/>.-2009

3. Рыжков А.В., Попов В.Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.

4. Петухов В.К., Мальтер И.Г., Павловский О.П. Фильтры, линии задержки и автогенераторы на поверхностных акустических волнах // Радиотехника. 2006. № 3. С. 72-76.

5. Узкополосные фильтры на поверхностных акустических волнах в системах радиочастотной идентификации / А.С. Багдасарян, Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, С.А. Багдасарян, Т.В. Синицина // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 7. С. 887-896.

6. Синицина Т.В., Прапорщиков В.В., Багдасарян А.С. Резонаторные фильтры для систем связи // Крыника-2004. СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: материалы 14-й междунар. конф. Украина, 2007. С. 472-473.

7. Синицина Т.В., Багдасарян А.С., Егоров Р.В. ПАВ-фильтры на основе продольно-связанных структур // Электронная промышленность. Наука. Технологии. Издания. 2004. С. 14-19.

8. Лящук А.Н., Завьялов С.А. Генераторы на поверхностных акустических волнах с широкой перестройкой по частоте // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 300-303.

9. Уточкин Г.В. Интегральные и многотранзисторные каскады избирательных усилителей. М.: Энергия, 1978. 80 с.

10. Шитиков Г.Т., Цыганков П.Я., Орлов О.М. Высокостабильные кварцевые автогенераторы / под ред. Г.Т. Шитикова. М.: Сов. радио, 1974. 374 с.

11. Сайт <http://www.angstrem.ru/>

12. Бочаров М.И., Рыжов А.О. ЧМ-генераторы информационно-телекоммуникационных систем на резонаторах и узкополосных фильтрах на поверхностных акустических волнах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 75-79.

13. Перельман Б.Л. Полупроводниковые приборы. Справочник. М.: НТЦ Микротех, 2000. 176 с.

14. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office / под ред. В.Д. Разевига. М.: СОЛОН Пресс, 2003. 496 с.

Поступила 13.09.2018; принята к публикации 12.11.2018

### Информация об авторах

**Бочаров Михаил Иванович** – канд. техн. наук, доцент Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 7-960-131-32-68, e-mail: komandor20132013@mail.ru

**Некрасов Сергей Геннадьевич** – инженер, АО НКТЬ «Феррит» (394066, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 179, корп. 4), тел. 8-909-215-72-67, e-mail: nec-sergio@Yandex.ru

**Акиншин Антон Евгеньевич** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 7-960-109-41-56, e-mail: antonakinshin@rambler.ru

## CONTROLLABLE TWO-CASCADE GENERATORS ON SAW-FILTERS

**M.I. Bocharov<sup>1</sup>, S.G. Nekrasov<sup>2</sup>, A.E. Akin'shin<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> JS «Ferrit», Voronezh, Russia

**Abstract:** raised standards are required for the linearity of the modulation characteristics, the magnitude of the frequency deviation, the level of noise emission and frequency stability of controlled oscillators of high-frequency oscillations used at high frequencies and microwave frequencies. These contradictory requirements can be fulfilled using generators made on two-cascade amplifiers and filters on surface acoustic waves (SAW). Based on the analysis of the basic structures of two-cascade amplifiers (cascode circuits), a justification was made for implementing a controlled generator on SAW bandpass filters using two-cascade amplifiers common base - common collector with current control of the generator frequency by the barrier capacitance of the varactor. For the implementation of controlled generators with optimal characteristics, a method of their calculation is proposed, based on the matrix method and the use of Y-parameters, which allows for an optimal energy mode of operation with minimal nonlinear distortions. To assess the reliability of the results obtained, modeling and experimental verification of the static modulation characteristic (SMC), dynamic modulation characteristic (DMC), the level of noise radiation and nonlinear distortion were carried out. It was found that the tuning range of the SAW generator frequency is about 0.9% with a frequency deviation of 230 kHz, a noise level of about -155 dB/Hz when offset from the center frequency by 100 kHz and mode instability of the frequency  $1.8 \cdot 10^{-5}$  when the supply voltage changes to  $\pm 5\%$

**Key words:** SAW filter, two-cascade amplifier, matrix method, modulation characteristics, simulation and experimental studies

### References

1. Semenov E.A., Posadskiy V.N. "Development of microwave technology of bulk and surface acoustic waves", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 1999, no. 4, pp. 81-85.
2. Bagdasaryan A.S. "Surface acoustic wave devices. State and prospects" ("Ustroystva na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh. Sostoyaniye i perspektivy"), *National Academy of Science (Natsional'naya akademiya nauk)*, 2009, available at: <http://www.sci.am/>
3. Ryzhkov A.V., Popov V.N. "Frequency synthesizers in radio technology" ("Sintezatory chastot v tekhnike radiosvyazi"), Moscow, *Radio i svyaz'*, 1991, 264 p.
4. Petukhov V.K., Malter I.G., Pavlovskiy O.P. "Filters, delay lines and oscillators on surface acoustic waves", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2006, no. 3, pp. 72-76.
5. Bagdasaryan A.S., Gulyaev Yu.V., Nikitov S.A., Bagdasaryan S.A., Sinitsina T.V. "Narrow-band filters on surface acoustic waves in radio frequency identification systems", *Radio Engineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*, 2008, vol.53, no.7, pp. 887-896.
6. Sinitsina T.V., Praporshchikov V.V., Bagdasaryan A.S. "Resonator filters for communication systems", *Proc. of the 14th intern. Ukraine conf. Krynika-2004. Microwave technology and telecommunication technologies (Krynika-2004. SVCH tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii: materialy 14-y mezhdunar. konf. Ukraina)*, 2007, pp. 472-473.
7. Sinitsina T.V., Bagdasaryan A.S., Egorov R.V. "SAW filters based on longitudinally connected structures", *Electronic industry. The science. Technology. Products (Elektronnaya promyshlennost'. Nauka. Tekhnologii. Izdeliya)*, 2004, pp. 14-19.
8. Lyashchuk A.N., Zav'alov S.A. "Generators on surface acoustic waves with a wide frequency tuning", *Omsk Scientific Herald (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2011, no. 3 (103), pp. 300-303.
9. Utochkin G.V. "Integral and multi-transistor cascades of selective amplifiers" ("Integral'nye i mnogotranzistornye kaskady izbiratel'nykh usiliteley"), Moscow, *Energiya*, 1978, 80 p.
10. Shitikov G.T., Tsygankov P.Ya., Orlov O.M. "Highly stable quartz oscillators" ("Vysokostabil'nye kvartsevye avtogeneratory"), Moscow, *Sov. Radio*, 1974, 374 p.
11. Website <http://www.angstrem.ru/>
12. Bocharov M.I., Ryzhov A.O. "FM generators of information and telecommunication systems on resonators and narrow-band filters on surface acoustic waves", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 2, pp. 75-79.
13. Perelman B.L. "Semiconductor devices. Reference book" ("Poluprovodnikovye pribory. Spravochnik"), Moscow, *NTTs Mikrotekh*, 2000, 176 p.
14. Razevig V.D., Potapov Yu.V., Kurushin A.A. "Designing microwave devices using Microwave Office" ("Proektirovanie SVCH ustroystv s pomoshch'yu Microwave Office"), Moscow, *SOLON Press*, 2003, 496 p.

Submitted 13.09.2018; revised 12.11.2018

### Information about the authors

**Mikhail I. Bocharov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. 7-960-131-32-68, e-mail: komandor20132013@mail.ru  
**Sergey G. Nekrasov**, Engineer, JS "Ferrit" (179 build. 4 Moskovskiy Prospekt, Voronezh 394066, Russia), tel. 8-909-215-72-67, e-mail: nec-sergio@yandex.ru  
**Anton E. Akin'shin**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. 7-960-109-41-56, e-mail: antonakinshin@rambler.ru

УДК 539.384

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПО МЕТОДУ ОБТЯЖКИ

В.В. Елисеев<sup>1</sup>, Л.В. Хливненко<sup>1</sup>, А.М. Гольцев<sup>1</sup>, С.С. Одинг<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «АСВ-Техно», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** излагается расчетно-экспериментальная методика определения коэффициентов трения между листовой заготовкой и носителем формы методом обтяжки. Определение коэффициента трения выполнено на основе решения задачи о равновесии элемента заготовки, нагруженной по схеме изгиба с растяжением с учетом трения по закону Кулона. Экспериментальный коэффициент трения находили по распределению продольных деформаций образца после обтяжки. Для проведения исследования предварительно выполнили испытания по определению механических свойств различных материалов, используемых при обтяжке реальных деталей из алюминиевых сплавов и сталей. При определении коэффициентов трения использовали установку для простой обтяжки. Исследовано влияние различных материалов пуансона и заготовки и смазки на коэффициент трения. Установлено влияние трения на предельную деформацию заготовки. Результаты исследований используются при моделировании различных операций листовой штамповки с помощью систем автоматизированного проектирования технологических операций (САПР ТО)

**Ключевые слова:** коэффициент трения, заготовка, смазка, предельная деформация, обтяжка

Введение

Моделирование операций листовой штамповки требует заполнение баз данных механических характеристик материалов заготовки и технологических параметров процесса [1].

Одним из важных технологических параметров является коэффициент трения между поверхностью формуемой заготовки и жесткой матрицей, носителем формы детали.

Для определения коэффициента трения рассмотрим процесс гибки с растяжением листовой заготовки по цилиндрическому формблоку радиуса R (рис. 1).

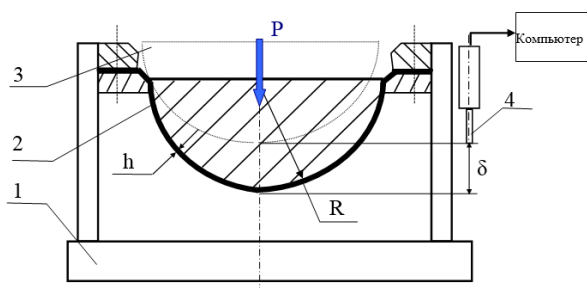


Рис. 1. Установка для гибки листовой заготовки по цилиндрическому формблоку:  
1 – оснастка; 2 – листовая заготовка; 3 – пуансон; 4 – датчик перемещений

Модель материала

Принимается модель жёсткопластического, трансверсально-изотропного материала, подчиняющегося степенному закону упрочнения, которое описывается уравнением Свифта

$$\sigma = A(e + \epsilon_0)^m, \tag{1}$$

где  $A, \epsilon_0, m$  - параметры аппроксимации.

При формообразовании по цилиндрическому пуансону деформации в направлении, перпендикулярном к направлению обтяжки, незначительные. Поэтому деформированное состояние заготовки примем плоским. В этом случае, согласно [1], имеем

$$e_e = e/K; \sigma_e = K\sigma, \tag{2}$$

где  $\sigma, e$  - напряжение и деформация в направлении растягивающего усилия;

$$K = \sqrt{\frac{3a_x + a_y}{2a}}; a_x + a_y + a_z = 1; a = a_x a_y + a_x a_z + a_y a_z; \tag{3}$$

где  $a_x, a_y, a_z$  - параметры анизотропии, которые вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a_x &= r_0 / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_y &= r_{90} / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_z &= r_0 r_{90} / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_{xy} &= \frac{0.5(1 + 2r_{45})(r_0 + r_{90})}{r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}}. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

В формулах (4)  $r_0, r_{90}, r_{45}$  - параметры Лэнкфорда, полученные по испытаниям на растяжение соответственно в направлении под углами 0, 90 и 45 градусов к направлению прокатки [1].

### Теоретическое определение коэффициента трения при обтяжке

Уравнения равновесия элемента цилиндрической оболочки длиной  $\delta L$ , находящегося в контакте с пуансоном, запишем в виде

$$\frac{\delta N}{\delta L} = T_\mu : q = N_\alpha \frac{\delta \alpha}{\delta L}; \quad (5)$$

где  $N$  - погонное усилие;  
 $T_\mu$  - погонная сила трения;  
 $q$  - нормальное давление;  
 $\alpha$  - угол наклона касательной к контуру пуансона.

Поскольку давление листовой заготовки на пуансон меньше предела текучести материала, принимаем закон трения Кулона

$$T_\mu = \mu q, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения.

Система (5) при подстановке (6) сводится к уравнению

$$\frac{\delta N}{\delta \alpha} = \mu N. \quad (7)$$

Из интегрального уравнения равновесия находим продольное усилие

$$N = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma dy, \quad (8)$$

где  $h$  - толщина заготовки.

Подставляя (1), (2), (8) в уравнение (7), получим

$$\frac{\delta e}{\delta \alpha} = \frac{\mu(\varepsilon_o + ke)}{k(m - e) - \varepsilon_o}. \quad (9)$$

Зная распределение деформации по длине заготовки, можно определить коэффициент трения

$$\mu = \frac{\frac{\delta e}{\delta \alpha}}{\frac{\varepsilon_o + Ke}{K(m - e) - \varepsilon_o}}. \quad (10)$$

### Экспериментальное определение коэффициента трения между заготовкой и формблоком

Экспериментальная методика определения коэффициента трения состоит в следующем.

На заготовку наносят координатную сетку с размерами ячейки 5 мм, как показано на рис. 2. Захватная часть заготовки делается шире для предотвращения ее разрушения в губках.

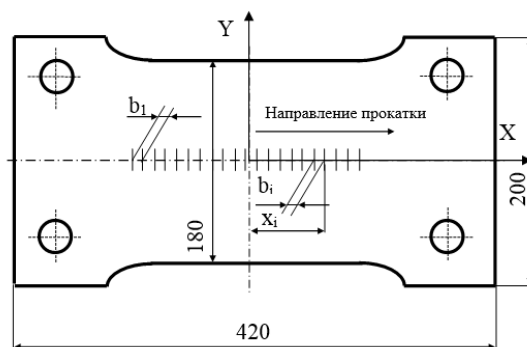


Рис. 2. Заготовка для испытания на трение по методу обтяжки

Гибка заготовки производилась на установке, схема которой показана на рис. 1. Деформирование осуществляли по цилиндрическому пуансону радиуса  $R=75$  мм с углом охвата  $180^\circ$ . Степень растяжения заготовки контролировали по перемещению пуансона аналоговым датчиком WAU-50 через встроенную в компьютер карту DKC16TR в режиме реального времени. Размеры координатной сетки до и после деформирования измеряли на инструментальном микроскопе УИМ 21 с точностью  $\pm 0.001$  мм.

Логарифмические деформации в  $i$ -й точке координатной сетки определяли по следующим формулам:

$$e_i = \ln\left(\frac{b_{i+1} + b_i}{b_{i+1}^o + b_i^o}\right); (i = 1, 2, \dots, n - 1), \quad (11)$$

где  $b_i^o, b_i$  - размер  $i$ -й ячейки до и после деформирования;

$n$  - число узлов координатной сетки.

Координата, определяющая положение  $i$ -й точки ячейки, равна

$$x_i = \sum_{j=1}^i b_j; (i = 1, 2, \dots, n - 1). \quad (12)$$

Скорость изменения деформаций по длине заготовки вычисляют по формуле

$$\frac{\delta e_i}{\delta x_i} = \frac{e_{i+1} - e_i}{x_{i+1} - x_i}; (i = 1, 2, \dots, n - 1). \quad (13)$$

Перед вычислением производной распределение деформаций по длине заготовки сглаживается.

Опыт определения коэффициентов трения для реальных процессов показал, что коэффициент трения целесообразно вычислять по формуле (6), обрабатывая экспериментальные данные по методу наименьших квадратов:

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{N-2} T_j q_j}{\sum_{j=1}^{N-2} q_j^2}; \quad (14)$$

где  $q_j = \sigma_j h_j / R, \quad (15)$

$$T_j = \frac{\partial N_j}{\partial x_j} = \left( \frac{\partial \sigma_j}{\partial x_j} - \sigma_j \frac{\partial e_j}{\partial x_j} \right) h_j; \quad (16)$$

$$\sigma_j = KA(\varepsilon_o + e_j / K)^m; \quad (17)$$

$$h_j = h_j^o \exp(-e_j); \quad (18)$$

$$\frac{\delta \sigma_j}{\delta x_j} = Am(\varepsilon_o + e_j / K)^{m-1} \left( \frac{\delta e}{\delta x_j} \right); \quad (19)$$

где  $h^o$  - исходная толщина заготовки.

При решении системы уравнений (11) - (19) определяют коэффициент трения.

### Результаты и их обсуждение

1. Параметры кривой течения (1) и коэффициентов анизотропии (4) определили испытаниями материала заготовки на одноосное растяжение в трёх направлениях к прокатке. Эксперименты проводили на листовом алюминиевом сплаве (Cu=0.15-0.4%; Fe=0.7%; Mg=0.8-1.2%; Mn=0.4-0.8%) и легированной стали (Cu=0.19% Mn=0.44%; Cr=1.02%, Ni=0.14%) по методике [2]. В каждом направлении испытали по 3 образца. В табл. 1 приведены механические характеристики этих сплавов.

Таблица 1

Механические характеристики алюминиевого сплава и легированной стали

Сплав	Направление прокатки	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Равномерная деформация	$\sigma = A(e + \varepsilon_o)^m$			Коэффициент анизотропии r
					A, МПа	m	$10^4 \times \varepsilon_o$	
Алюминий	0	158.61	271.20	0.1902	519.18	0.2749	139	0.6463
	90	154.92	269.09	0.2144	510.64	0.2746	136	0.7106
	45	153.25	266.46	0.2207	50.285	0.2855	138	0.5706
Сталь	0	173.88	325.14	0.2742	568.79	0.2329	48	1.5724
	90	148.81	323.73	0.2753	564.57	0.2289	36	2.1204
	45	178.41	328.52	0.2367	567.59	0.2206	32	1.2715

2. Эксперимент по определению коэффициентов трения проводили на модельном устройстве со схемой, приведенной на рис. 1. Получены графики распределения продольных деформаций при формообразовании алюминиевого (сплошная линия на рис. 3) сплава с толщиной листа 1.2 мм и стального листа толщиной 0.77 мм (штриховая линия на рис. 3) по алюминиевому пуансону со смазкой Houghto-Draw 7002.

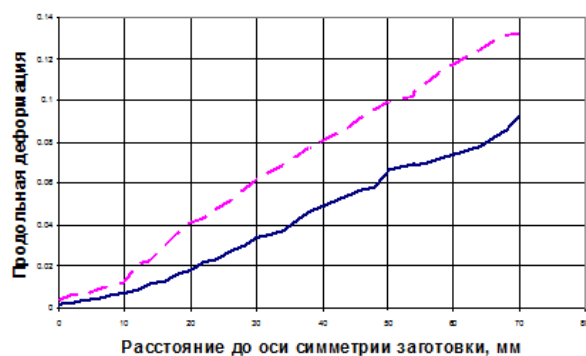


Рис. 3. Графики распределения продольных деформаций при формообразовании алюминиевого сплава и стального листа

3. Результаты испытаний по определению коэффициента трения между листовыми заготовками из алюминиевого сплава 2024 и цилиндрическими форм-блоком из различных материалов, условиях смазки и степенях деформации приведены в табл. 2. Расчёты выполняли по опи-

санному выше алгоритму и свойствами материала заготовки из табл. 1. Эксперименты показали, что с ростом деформации оболочки, коэффициент трения снижается. В дальнейшем моделировании операций штамповки использовали усредненные значения коэффициентов трения.

Таблица 2

Коэффициенты трения между листовой заготовкой и цилиндрическим пуансоном

Материал пуансона	Смазка	Коэффициент трения		
		Среднее значение	Среднее квадратич. отклонение	Наибольшая деформация, %
Стальное литье	Масло Houghto-Draw 7002	0.003	–	9.484
		0.003	–	6.210
		0.019	–	1.770
		0.025	–	2.556
		0.013	0.011	3.674
Алюминиевое литье	Масло Houghto-Draw 7002	0.092	–	1.175
		0.024	–	1.336
		0.054	–	2.143
Стальное литье	Без смазки	0.065	–	0.979
		0.193	–	1.679
		0.139	–	1.394
		0.132	0.064	2.007
Пластиковое покрытие Richlite	Масло Houghto-Draw 7002	0.058	–	5.823
		0.034	–	4.936
		0.018	–	2.213
		0.038	0.020	1.855
		0.038	–	7.135
Пластиковое покрытие Richlite	Без смазки	0.174	–	2.283
		0.111	–	1.947
		0.092	–	1.203
		0.126	0.042	2.075
Фторопластовое покрытие Expros	Масло Houghto-Draw 7002	0.001	–	2.690
		0.012	-	3.734
		0.014	-	5.022
		0.002	-	7.367
		0.007	0.007	9.015
Фторопластовое покрытие Expros	Без смазки	0.185	-	1.737
		0.071	-	1.301
		0.050	-	1.306
		0.102	0.072	2.102

### Выводы

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения коэффициентов трения скольжения, которые используются для моделирования процессов пластического формоизменения в операциях обтяжки деталей из листа и профиля на станках с числовым программным управлением.

2. Экспериментально определены статические коэффициенты трения скольжения между

форм-блоком и листовой заготовкой из различных металлов с различными видами смазки, которые используются в операциях продольной и поперечной листовой обтяжки на прессах FEKD, FET, FEL, VTL.

3. Установлена экспериментальная зависимость между предельной деформацией заготовки и статическими коэффициентами трения скольжения при различных типах смазки.

4. Полученные данные использованы в САПР технологической операции штамповки эластичной средой деталей из листа в жесткую матрицу для повышения точности формообразования и уменьшения трудоемкости доводочных работ.

#### Литература

1. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.
2. Разработка баз данных материалов САПР бездефектных технологий листовой штамповки / В.В. Елисеев, А.М. Гольцев, Л.В. Хливненко, Ю.Б. Рукин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 102-106.

Поступила 05.09.2018; принята к публикации 26.11.2018

#### Информация об авторах

**Елисеев Владимир Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: evv52@bk.ru, тел. 8919-185-83-81

**Хливненко Любовь Владимировна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: hlivnenko\_lv@mail.ru, тел. 8950-754-83-31

**Гольцев Александр Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: amg57@bk.ru, тел. 8920-228-57-05

**Одинг Сергей Сергеевич** – д-р техн. наук, профессор, научный руководитель ООО «АСВ-Техно» (394036, Россия, г. Воронеж, ул. Алексеевского, 15), e-mail: oding.sergey@gmail.com, тел. 8473-249-42-32

### EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FRICTION COEFFICIENT BY STRETCH-FORMING METHOD

V.V. Eliseev<sup>1</sup>, L.V. Khlivnenko<sup>1</sup>, A.M. Gol'tsev<sup>1</sup>, S.S. Oding<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Co Ltd «ASV-Tekhn», Voronezh, Russia

**Abstract:** the article shows the calculation and experimental methods for determining the friction coefficients between the sheet blank and the form-block by the stretch forming method. The determination of the coefficient of friction is made on the basis of the solution of the problem of the equilibrium of the workpiece element, loaded according to the bending scheme with stretching taking into account friction according to the Coulomb law. The experimental coefficient of friction was found from the distribution of the longitudinal strains of the sample after stretch forming. To carry out the research, preliminary tests were performed to determine the mechanical properties of various materials used for stretch forming of the parts from aluminum alloys and steels. When determining the coefficients of friction, a simple stretch forming device was used. The effect of influence of various punch, blank and lubricant materials on the coefficient of friction was studied. The effect of friction on the limit strains of the workpiece was established. The results of the studies are used in modeling various operations of sheet punching with the help of CAD of technological processes

**Key words:** coefficient of friction, workpiece, lubrication, limit strain, stretch forming

#### References

1. Del G.D. "Technological mechanics" ("Tekhnologicheskaya mekhanika"), Moscow, mashinostroenie, 1978, 174 p.
2. Eliseev V.V., Gol'tsev A.M., Khlivnenko L.V., Rukin Yu.B. "Development database of materials for CAD systems of failures-free technology of sheet stamping", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennoy tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol.13, no. 3, pp.102-106.

Submitted 05.09.2018; revised 26.11.2018

#### Information about the authors

**Vladimir V. Eliseev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: evv52@bk.ru

**Lyubov' V. Khlivnenko**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: hlivnenko\_lv@mail.ru

**Aleksandr M. Gol'tsev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: amg57@bk.ru

**Sergey S. Oding**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Scientific Adviser of Co Ltd "ASV-Tekhn" (15 Alekseevskogo st., Voronezh 394036, Russia), e-mail: oding.sergey@gmail.com



**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ****Ю.А. Цеханов<sup>1</sup>, И.В. Харченко<sup>2</sup>, Р.М. Джемалядинов<sup>2</sup>, В.В. Скакун<sup>2</sup>**<sup>1</sup>**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**<sup>2</sup>**Крымский инженерно-педагогический университет, г. Симферополь, Россия**

**Аннотация:** одним из актуальных направлений в области повышения эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) является модифицирование жидкостей ультрадисперсными порошками. Непосредственно коагуляция (агрегатирование) является основной проблемой при применении ультрадисперсных порошков, так как возникают трудности в их диспергировании, стабилизации и однородном распространении в объёме смазки. Наиболее эффективным средством устранения указанных недостатков является интенсивное диспергирование частиц металлов с введением полимера (ПАВ), который в свою очередь активно покрывает поверхность защитной оболочкой, что препятствует их дальнейшему агрегатированию. Интенсивное диспергирование разрывает коагуляционную связь, а полимер создаёт сольватную оболочку вокруг частицы. В результате активного диспергирующего воздействия в присутствии полимера удаётся добиться стабилизации модификатора в дисперсном виде и предотвратить его коагуляцию. Приведены результаты влияния стабилизированных СОТС с ультрадисперсными модификаторами алюминия и молибдена на износ и силовые характеристики процесса точения металлов с различной химической активностью. Из гистограмм видно, что использование стабилизированных ультрадисперсных модификаторов способствует снижению сил резания и снижению износа инструмента по передней поверхности за счёт снижения удельного давления и изменения угла сдвига стружки. Применение техники минимальной смазки способствует экономической целесообразности процесса

**Ключевые слова:** ультрадисперсные модификаторы, смазочно-охлаждающие технологические средства, ультразвуковое воздействие, техника минимальной смазки, поверхностно-активные вещества, силы резания, коагуляция, износ

**Введение**

На сегодняшний день, несмотря на обширное разнообразие различных способов изготовления и формирования поверхности будущих деталей, основным остаётся обработка заготовок металлорежущим инструментом. Гарантом получения продукции высокого качества и стабильно высокой работоспособности обрабатываемого инструмента является выбор и правильное применение смазочных жидкостей.

Одним из направлений активации смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) является введение в состав различных антиокислителей, антифрикционных присадок, а также моющих и противокоррозионных добавок, которые могут значительно улучшить производительность при обработке резанием, а также благоприятно сказываются на качестве обработанной поверхности. Применение ультрадисперсных модификаторов технологических сред представ-

ляет большой интерес в развитии данной отрасли.

В последнее время уникальные свойства нанопорошков, а точнее их способность изменять контактные характеристики при воздействии различных операционных факторов вследствие химической активности, применяются для создания ультрадисперсных модификаторов смазок [1-3].

Известно, что в качестве смазочных плёнокообразующих присадок применяют полимеры, дисульфид молибдена, ультрадисперсные алмазы и порошки металлов и их оксидов и т.п. [4, 5].

Хорошо себя зарекомендовало применение ультрадисперсных порошков цветных металлов и сплавов. Так применение меди, цинка, бронзы в составе смазок значительно увеличивает их трибологические характеристики и способствует большей работоспособности узла трения [6].

Действие модифицированных ультрадисперсными порошками СОТС таково, что во время резания поверхность режущей кромки инструмента покрывается защитной плёнкой. Это обстоятельство способствует появлению

сразу нескольких положительных моментов. Во-первых, данная среда способствует появлению пластификации при обработке металла. Во-вторых, уменьшается энергия на поверхностном слое обрабатываемого металла. В-третьих, порошки способствуют снижению предела текучести на сдвиг, уменьшается сила трения и температура резания [4].

По результатам, отраженным в работах [7, 8], ультрадисперсные порошки меди, графита, дисульфида молибдена и т.п. обеспечивают максимальное структурирование полимерной матрицы и могут быть рекомендованы к применению в антифрикционных композитных материалах в качестве легирующей добавки.

Таким образом, выявлен селективный перенос атомов легирующего вещества на поверхность контртела, создающий эффект граничного трения и, как следствие, более равномерное распределение нагрузок по сопряженным поверхностям трения, за счет чего уменьшается износ и трение.

В рамках данной статьи приведены результаты экспериментальных исследований влияния ультрадисперсных модификаторов СОТС на силовые характеристики процесса

точения конструкционных материалов и исследование износа по передней поверхности.

Применение ультрадисперсных порошков без предварительной обработки практически невозможно, в связи с процессом агрегатирования (коагуляции). В связи с чем процесс диспергирования и стабилизации порошков в объеме смазочного материала имеет ключевое значение. Известно о существовании нескольких способов борьбы с эффектом высокой поверхностной энергии частиц, а именно: пассивация, стабилизация коллоидными растворами, использование капсулирующих (обволакивающих) веществ и т.д. [9-13].

Чем выше концентрация ультрадисперсного модификатора, тем сложнее его деагломерация. Стабильность суспензии с высокой концентрацией частиц гораздо ниже.

Наиболее эффективным средством, на наш взгляд, устранения указанных недостатков является интенсивное диспергирование частиц металлов с введением полимера (ПАВ), который в свою очередь активно покрывает поверхность частиц защитной оболочкой, что препятствует их дальнейшему агрегатированию (рис. 1).

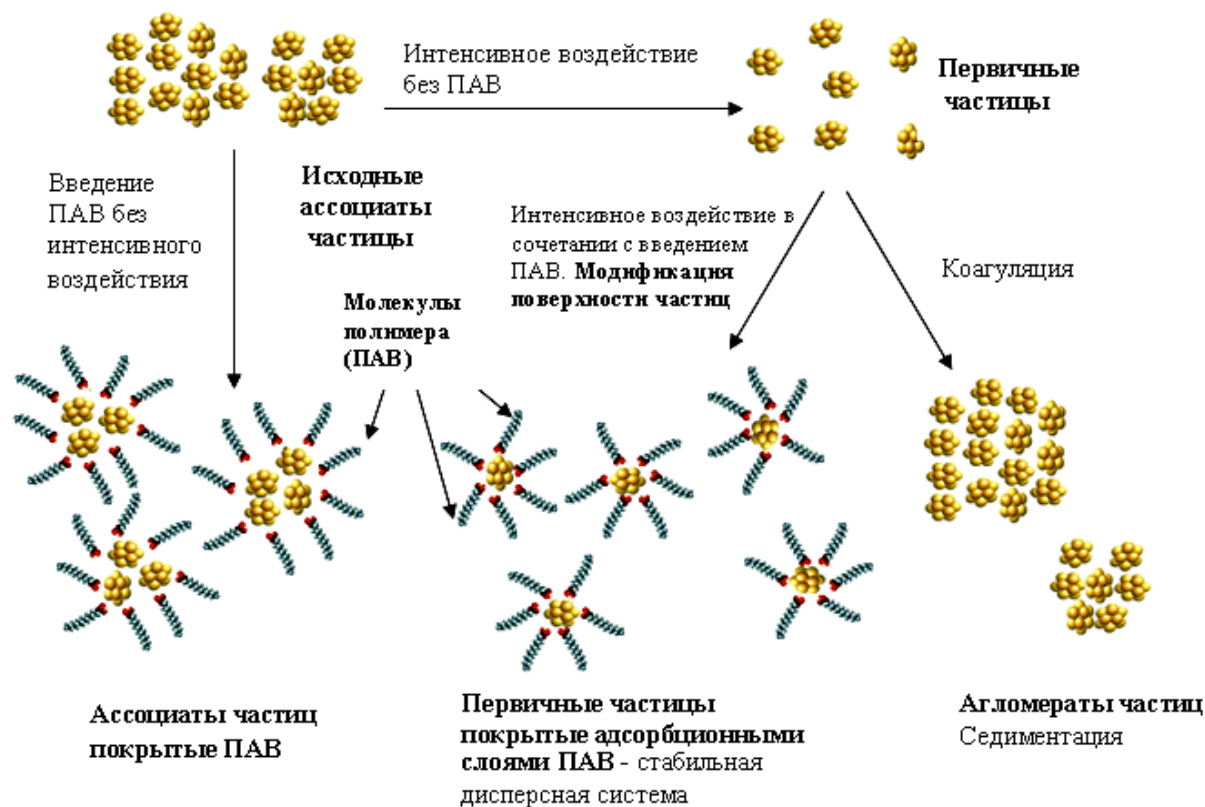


Рис. 1. Схема влияния интенсивного диспергирования частиц металлов с введением полимера и без

### Методика экспериментов

Эксперименты по точению стали 45, стали 12X18H10T и титанового сплава BT-22 проводились на базе лаборатории кафедры технологии машиностроения Крымского инженерно-педагогического университета. В ходе проведения экспериментов был рассмотрен процесс открытого точения как наиболее удобный с методической точки зрения способ исследований. Точение заготовок осуществлялось проходным резцом со сменными многогранными пластинами ISO: SPUN120308 из быстрорежущей стали P6M5 без покрытия. При этом каждый проход осуществлялся новой гранью пластины.

В качестве оборудования для проведения лабораторных экспериментов был выбран токарный станок SAMAT 400 M с бесступенчатым приводом.

Скорость резания принималась согласно усредненным данным общемашиностроительных нормативов режимов резания и составляла при точении стали 45  $v=50$  м/мин., при точении нержавеющей стали марки 12X18H10T -  $v=25$  м/мин., при точении титанового сплава BT-22 -  $v=10$  м/мин. Величина глубины резания и подачи оставалась постоянной и составляла 0,5 мм и 0,2 мм/мин. соответственно. Постоянство скорости резания при изменении диаметра обрабатываемой заготовки достигалось за счет частотного преобразователя Altivar 71.

#### Конструкция и параметры реза

Наименование	Сменная многогранная пластина	
Материал	P6M5	
Покрытие	Отсутствует	
Фирма-производитель	ОАО «Киржачский инструментальный завод»	
$r$	0,4	
$\gamma$	$0^\circ$	
$\alpha$	$11^\circ$	
$\phi$	$45^\circ$	

В качестве СОТС использовались модифицированные ультрадисперсными порошка-

ми растворы олеиновой кислоты и масла индустриального И-20 (База).

Для предотвращения агломерации ультрадисперсных порошков раствор диспергировали с помощью ультразвукового диспергатора DADI DA-968. Олеиновая кислота в этом случае играет роль ПАВ. Доля ультрадисперсной присадки составляет 0,5% и 1% соответственно. Все СОТС были повторно диспергированы непосредственно перед применением. Подача СОТС в зону резания осуществлялась с помощью специального дозирующего устройства Noga Minicool MMS (рис. 2). Расход смазки составлял 5 мл/мин.

Измерение износа осуществлялось на инструментальном измерительном микроскопе ИМЦЛ 150x75(2)Б, погрешность при измерении линейных размеров которого составляет  $\pm 0,003$  мм, а увеличение объектива микроскопа 40 крат.

За критерий износа была принята длина контакта по передней поверхности, оцениваемая по двузонной модели Зорева с учетом пластического  $L_n$  и упруго пластического  $L_u$  контакта, образующихся в течение одного и того же времени (пути) резания заготовки. Для большей достоверности данных эксперименты проводились не менее 5 раз для получения уровня надёжности доверительной вероятности 0,9 (метод малой выборки).

Определение энергосиловых составляющих процесса резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  являются основными показателями обрабатываемости материалов и позволяют оценить эффективность влияния СОТС.

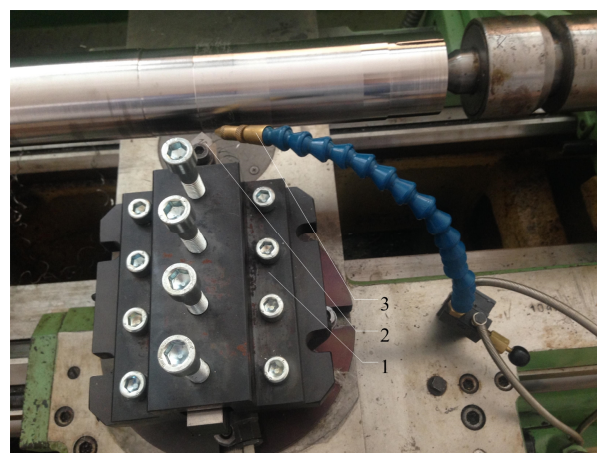


Рис. 2. Общий вид установки  
1 - динамометр М-30-3-6к, 2 – резец, 3 - дозирующее устройство Noga Minicool MMS

Замеры составляющих сил резания осуществлялись с помощью динамометра М-30-3-6к (рис. 2), сигнал с сенсоров которого благодаря

четырёхканальному усилителю был преобразован и записан на персональный компьютер.

### Результаты экспериментов

На гистограммах (рис. 3-8) показаны основные результаты влияния модифицированных СОТС на изменение составляющих сил резания и длин контакта по передней поверхности.

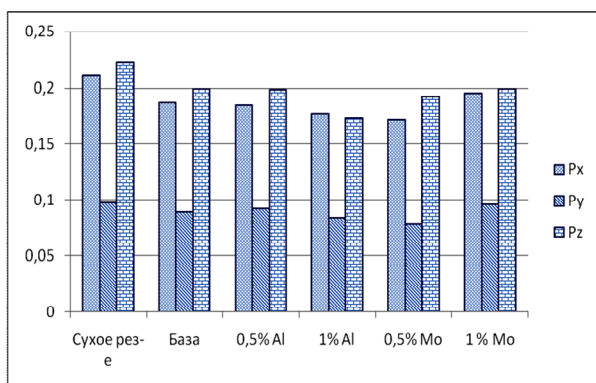


Рис. 3. Средние значения составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при точении стали 45 ( $S=0,2$  мм/об,  $V=50$  м/мин.)

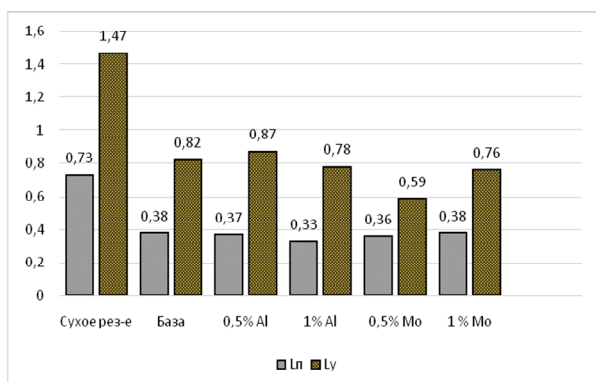


Рис. 4. Средние значения длины контакта по передней поверхности  $L_n$  и  $L_y$  при обработке стали 45 ( $T=7$  мин.)

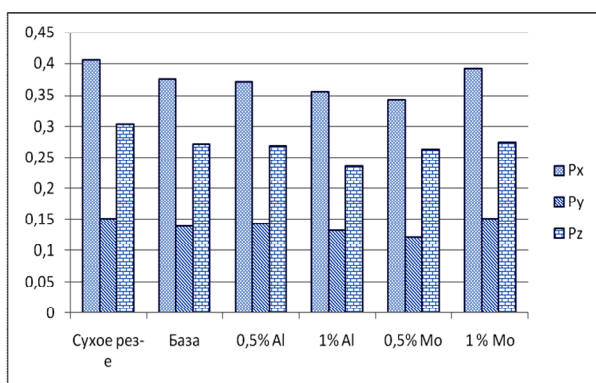


Рис. 5. Средние значения составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при точении стали 12X18H10T ( $S=0,2$  мм/об,  $V=25$  м/мин.)

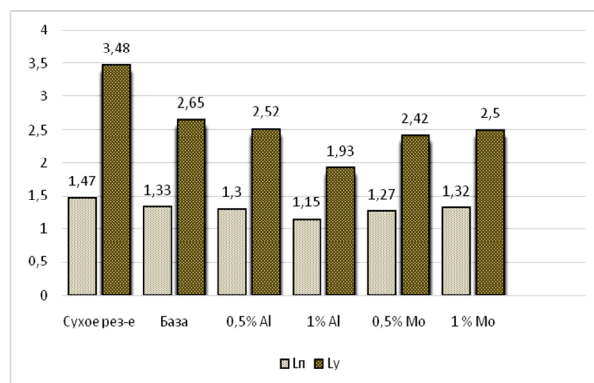


Рис. 6. Средние значения длины контакта по передней поверхности  $L_n$  и  $L_y$  при обработке стали 12X18H10T ( $T=7$  мин.)

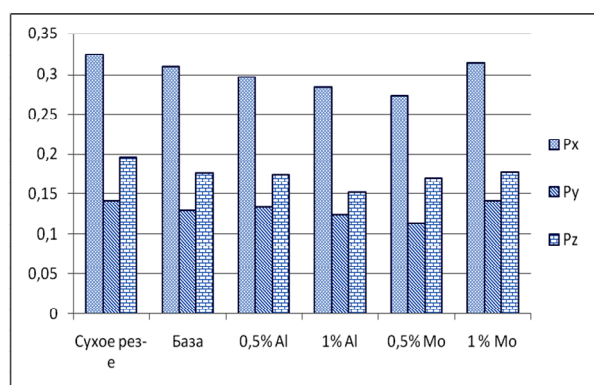


Рис. 7. Средние значения составляющих сил резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при точении титанового сплава BT-22 ( $S=0,2$  мм/об,  $V=10$  м/мин.)

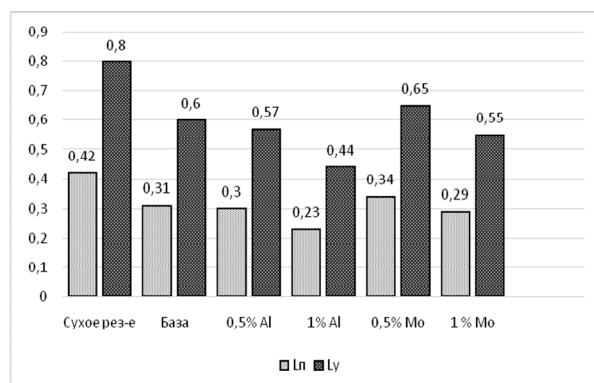


Рис. 8. Средние значения длины контакта по передней поверхности  $L_n$  и  $L_y$  при обработке титанового сплава BT-22 ( $T=7$  мин.)

### Выводы

Результаты влияния стабилизированных смазочно-охлаждающих технологических сред с ультрадисперсными модификаторами Al и Mo на износ и энергосиловые характеристики процесса точения различных по химической активности конструкционных материалов в

совокупности с техникой минимальной смазки свидетельствуют об уменьшении износа и сил резания. Это доказывает их эффективность и позволяет на порядок уменьшить расход СОТС, что благотворно влияет как на расходы, связанные с содержанием и утилизацией охлаждающих жидкостей, так и на здоровье рабочих и на экологию в целом.

#### Литература

1. Поляков С.А. Нанотехника в трибологии // Нанотехника. 2006. № 1. С. 42-51.
2. Образцов Л.Н. Наноалмазы в смазочных композициях // Вестник Полоцкого государственного университета. 2010. С. 83-91.
3. Харченко, И.В. Применение наномодификаторов для повышения эффективности СОТС при резании металлов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Ч. 2. С. 121-124.
4. Говорова О.В., Петров В.М., Сойту Н.Ю. Возможность применения активных мелкодисперсных модификаторов трения в современных СОТС // ТРАНС-ТРИБО-2005: сб. статей, 2005. С. 192-196.
5. Additive Schmierer und Arbeitssigkeit / K. Matsuo, U. Maede, M. Kurabashi, M. Miuva // 5th Int. Kolog., Esslingen, Germany, 14-16 jan.. 1986. Esslingen. 1986. Bd. 2. P. 5.417-5.418.
6. Функциональные технологические смазочные материалы, структурированные нанопорошками цветных металлов, для повышения эффективности обработки деталей транспортных средств / Г.И. Шульга, А.О. Колесниченко, Е.В. Скринников, Т.Г. Шульга // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11. № 10 (61). С. 1867-1873.

7. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Рыбин В.В. Модификация антифрикционных полимерных композиционных материалов на различных масштабных уровнях // Вопросы материаловедения. 2009. № 1 (57). С. 9-16.

8. Исследование наноразмерных самосмазывающихся соединений дисульфида молибдена и графита / А.П. Краснов, А.С. Голубь, В.Н. Адериха, А.В. Наумкин и др. // Поликомтриб-2013: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Гомель: ИММС НАНБ, 2013. С. 305.

9. Петров В.М., Сойту Н.Ю., Петров Ю.В. Результаты испытаний наноструктурированных СОТС, содержащих активные фуллероидные наномодификаторы, на операциях сверления конструкционных материалов, применяемых в машиностроении // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (46). С. 49-55.

10. Вейц В.Л., Зубарев Ю.М., Петров В.М. Перспективы развития технологий на основе фуллероидных наномодификаторов // Инструмент и технологии. 2007. № 26-27. С. 15-23.

11. Зубарев Ю.М., Петров В.М., Никити В.А. Решение частных триботехнических задач энергомашиностроения за счёт наноструктуризации технологических сред // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3 (41). Вып. 2. С. 179-184.

12. Сойту, Н.Ю. Повышение эффективности процесса сверления металлов за счёт фуллеренсодержащих СОТС: Автореф. дис... на канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2006. 23 с.

13. Булычев Н.А. Модификация дисперсных систем полимерами при механическом воздействии: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Москва, 2006. 23 с.

14. Цеханов Ю.А., Сторчак М.А. Development of analytical model for orthogonal cutting // Production Engineering, Research and Development. Germany, Springer, April. 2015. V. 9 (2). P. 56.

Поступила 20.10.2018; принята к публикации 30.11.2018

#### Информация об авторах

**Цеханов Юрий Александрович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tsekhanov@yandex.ru

**Харченко Илья Владимирович** - аспирант, Крымский инженерно-педагогический университет (295015, Россия, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), e-mail: ilya.kharchenko.33@mail.ru

**Джемалядинов Руслан Марленович** - аспирант, Крымский инженерно-педагогический университет (295015, Россия, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), e-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru

**Скакун Владимир Владимирович** - аспирант, Крымский инженерно-педагогический университет (295015, Россия, г. Симферополь, пер. Учебный, 8), e-mail: vladimir.skakun.92@list.ru

### INFLUENCE OF ULTRADISPERSED MODIFIERS OF FLUIDS ON POWER CHARACTERISTICS OF THE PROCESS OF CUTTING CONSTRUCTION MATERIALS

Yu.A. Tsekhanov<sup>1</sup>, I.V. Kharchenko<sup>2</sup>, R.M. Dzhemalyadinov<sup>2</sup>, V.V. Skakun<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Crimean Engineering and Pedagogical University, Simferopol, Russia

**Abstract:** one of the current areas in the field of improving the performance properties of lubricant agents (LCA) is the modification of liquids with ultrafine powders. Directly coagulation (aggregation) is the main problem when using ultra-fine powders, as there are difficulties in their dispersion, stabilization and uniform distribution in the volume of lubricant. The most effective means of eliminating these disadvantages is the intensive dispersion of metal particles with the introduction of a polymer (surfactant), which in turn actively covers the surface with a protective sheath, which prevents their further aggregation.

Intensive dispersion breaks the coagulation bond, and the polymer in turn creates a solvation shell around the particle. As a result of the active dispersing effect in the presence of a polymer, it is possible to achieve stabilization of the modifier in a dispersed form and prevent its coagulation. The results of the influence of stabilized LCA with ultrafine aluminum and molybdenum modifiers on wear and the power characteristics of the process of turning metals with various chemical activities are presented. It can be seen from the histograms that the use of stabilized ultrafine modifiers contributes to reducing cutting forces and reducing tool wear on the front surface by reducing the specific pressure and changing the chip shear angle. The use of minimal lubrication technology contributes to the economic viability

**Key words:** ultrafine modifiers, lubricant cooling agents, ultrasonic treatment, minimal lubrication technique, surfactants, cutting forces, coagulation, wear

#### References

1. Polyakov S.A. "Nanotechnics in tribology", *Nanotechnics (Nanotekhnika)*, 2006, no. 1, pp. 42-51.
2. Obraztsov L.N. "Nanodiamonds in lubricant compositions", *Bulletin of the Polotsk State University (Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2010, pp. 83-91.
3. Kharchenko I.V. "Application of nano modifiers to improve the efficiency of LCA when cutting metals", *Papers of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 8: v 2 ch.)*, 2017, issue 8, part 2, pp. 121-124.
4. Govorova O.V., Petrov V.M., Soytu N.Yu. "Possibility of using active finely dispersed friction modifiers in modern LCA", *Collected papers "TRANSTRIBO-2005"*, 2005, pp. 192-196.
5. Matsuo K., Maede U., Kurabashi M., Miura M. "Additive schmier und arbeitssigkeit", *5th Int. Kolog.*, Esslingen, Germany, 1986, bd. 2, pp. 5417-5418.
6. Shul'ga G.I., Kolesnichenko A.O., Skrinnikov E.V., Shul'ga T.G. "Functional technological lubricants, structured by nanopowders of non-ferrous metals, to improve the efficiency of processing parts of vehicles", *Bulletin of DSTU (Vestnik DGTU)*, 2011, vol. 11, no. 10 (61), pp. 1867-1873.
7. Anisimov A.V., Bakhareva V.E., Rybin V.V. "Modification of antifriction polymer composite materials at various scale levels", *Problems of Materials Science (Voprosy materialovedeniya)*, 2009, no. 1 (57), pp. 9-16.
8. Krasnov A.P., Golub' A.S., Aderikha V.N., Naumkin A.V. et al. "Investigation of nano self-lubricating compounds of molybdenum disulfide and graphite", *Proc. of the Int. Sci. and Techn. Conf.: Polycromtrib 2013 (Polikomtrib-2013: tez. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, Gomel, IMMS NANB, 2013, pp. 305.
9. Petrov V.M., Soytu N.Yu., Petrov Yu.V. "Results of tests of nanostructured LCA containing active fulleroid nanomodifiers on drilling operations of structural materials used in machine building", *Bulletin of SSTU (Vestnik SGTU)*, 2010, no. 3 (46), pp. 49-55.
10. Weitz V.L., Zubarev Yu.M., Petrov V.M. "Prospects for the development of technologies based on fulleroid nanomodifiers", *Instrument and Technologies (Instrument i tekhnologii)*, 2007, no. 26-27, pp. 15-23.
11. Zubarev Yu.M., Petrov V.M., Nikitin V.A. "The solution of private tribotechnical problems of power machine construction due to the nanostructuring of technological media", *Bulletin of Saratov State Technical University (Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, no. 3 (41), issue 2, pp. 179-184.
12. Soytu N.Yu. "Increasing the efficiency of the drilling process of metals due to fullerene-containing LCA: Cand. tech. sci. diss." ("Povyshenie effektivnosti protsessa sverleniya metallov za schyet fullerensoderzhashchikh SOTS: Avtoref. dis. na kand. tekhn. nauk."), St. Petersburg, 2006, 23 p.
13. Bulychev N. "Modification of disperse systems by polymers under mechanical action: Cand. chem. sci. diss." ("Modifikatsiya dispersnykh sistem polimerami pri mekhanicheskom vozdeystvii: avtoref. dis. kand. khim. nauk."), Moscow, 2006, 23 p.
14. Tsekhanov Yu.A., Storchak M.A. "Development of analytical model for orthogonal cutting", *Production Engineering. Research and Development*. Germany, Springer, 2015, vol. 9 (2), pp. 56.

Submitted 20.10.2018; revised 30.11.2018

#### Information about the authors

**Yuriy A. Tsekhanov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: tsekhanov@yandex.ru

**Il'ya V. Kharchenko**, Graduate student, Crimean Engineering and Pedagogical University, Simferopol, Russia (8 Uchebnyy alley, Simferopol 295015, Russia), e-mail: ilya.kharchenko.33@mail.ru

**Ruslan M. Dzhemalyadinov**, Graduate student, Crimean Engineering and Pedagogical University, Simferopol, Russia (8 Uchebnyy alley, Simferopol 295015, Russia), e-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru

**Vladimir V. Skakun**, Graduate student, Crimean Engineering and Pedagogical University, Simferopol, Russia (8 Uchebnyy alley, Simferopol 295015, Russia), e-mail: vladimir.skakun.92@list.ru

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРОВОЛОКОЙ С ОСЕВОЙ ПОДАЧЕЙ ЭЛЕКТРОЛИТА

Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, О.Г. Шпилова, Д.Е. Крохин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** электрохимическая обработка проволокой в основном используется для резки обрабатываемых деталей с широким диапазоном толщин. Она имеет большое преимущество по сравнению с непрофилированным электродом при электроэрозионном методе, так как позволяет избежать зоны термического влияния в области обработки. Кроме того, проволочный электрод в электрохимической обработке может быть использован повторно, так как он не изнашивается. Титан и сплавы широко используются в аэрокосмической промышленности, в качестве деталей ракетных и авиационных двигателей, а также фюзеляжа, благодаря хорошему сочетанию высокой удельной прочности и коррозионной и жаростойкости. Титан и его сплавы считаются труднообрабатываемыми из-за ряда свойств этих материалов, таких как плохая теплопроводность, химическая реакционная способность и низкий модуль упругости. Рассмотрены осевая подача электролита для удаления продуктов электролиза при обработке титана, оптимизация параметров обработки, таких как скорость подачи, рабочее напряжение, концентрация электролита и т.д. Экспериментальные результаты показывают, что электрохимическая обработка с осевой подачей электролита является перспективным методом при обработке титанового сплава ОТ4. Рассматривается возможность многоэлектродной электрохимической обработки для повышения производительности обработки

**Ключевые слова:** электрохимическая обработка, титан, электрод-проволока

### Введение

Титан и его сплавы широко используются в аэрокосмической промышленности, в качестве деталей реактивных двигателей и фюзеляжа из-за хорошего сочетания высокой удельной прочности (отношения прочности к весу) и исключительной коррозионной и жаростойкости. Обрабатываемость титана и его сплавов считается низкой из-за ряда свойств этих материалов, таких как плохая теплопроводность, химическая реакционная способность и низкий модуль упругости.

Для обработки титана и его сплавов в свое время были разработаны различные методы, основанные на различных принципах, в их числе механическая обработка, лазерная обработка, электроэрозионная обработка (ЭЭО), электрохимическая обработка (ЭХО) и т.д. Титан является химически активными и, следовательно, имеет тенденцию к привариванию к режущему инструменту в процессе механической обработки, что приводит к скалыванию и преждевременному выходу из строя инструмента. Лазерная, электроэрозионная и механическая обработки обычно приводят к возникновению зоны термического влияния, что негативно влияет на механические свойства деталей. Еще одним способом для формообразования титана

является ЭХО, которая представляет собой электрохимическое растворение проводящих материалов на наноуровне независимо от их твердости и ударной вязкости на аноде в электролитической ячейке. По сравнению с конкурирующими технологиями, ЭХО предлагает ряд уникальных преимуществ, таких как отсутствие износа инструмента, зон термического влияния, остаточных напряжений, трещин, заусенцев и т.д., поэтому данная обработка перспективна при обработке титана и титановых сплавов.

Электрохимическая обработка проволокой (ЭХОП) представляет собой процесс резки, в котором заготовка выступает в качестве анода, а проволока в качестве катода [2]. Непрофилированный инструмент можно рассматривать как более выгодную альтернативу профилированного инструмента, так как позволяет осуществлять обработку сложных форм без мощных дорогостоящих блоков питания, специального конструирования электрода и гидравлических расчетов потока электролита. Схема ЭХОП аналогична электроэрозионной обработке проволокой, однако принципиально отличается от последней в части механизма съема материала. В первом случае удаление металла достигается за счет анодного растворения, а во втором это делается с помощью электроискровой эрозии. ЭХОП имеет большое преимущество перед электроэрозионной обработкой, так как отсутствует зона термического влияния в

месте резания. Кроме того, проволочный электрод в ОРЭМ может быть использован повторно, так как он не изнашивается.

Имеющиеся исследования показывают, что максимальная скорость обработки достигается при ЭХОП для низкоуглеродистых сталей, при использовании круглого электрода-инструмента и нитрата натрия в качестве электролита. В свое время проводились исследования влияния параметров обработки, таких как скорость потока электролита, диаметр сопла и плотность тока на максимальную скорость подачи резания во время ЭХОП [1,2]. Было исследовано влияние рабочего напряжения, скорости подачи проволоки, диаметра проволоки, скорости вращения заготовки, межэлектродного расстояния на скорость удаления металла, шероховатость поверхности, а также погрешности радиуса во время поворота проволоки при ЭХОП. В [3] приведены исследования по разработке вольфрамовой микропроволоки для ЭХО, толщина которой составляет 5 мкм и позволяет получить, например, щелевые отверстия с шириной менее 20 мкм. Система подачи электролита имеет важное значение для ЭХОП, так как эффективность удаления продуктов электролиза определяет точность обработки и стабильность процесса. Для этого, например, применяют вибрацию инструмента с низкой частотой и малой амплитудой [4]. Еще одним способом повышения технологических показателей ЭХОП является сочетание оптимальных параметров обработки и механизма подачи электролита в зону обработки.

#### Принцип электрохимической обработки проволоки с осевой подачей электролита

Рис. 1 иллюстрирует принцип электрохимической обработки проволокой с поливом электролитом. Проволока толщиной в несколько сотен микрон является катодом - инструментом, а обрабатываемая деталь соединена с анодом источника питания. Когда напряжение прикладывается к заготовке и электроду- проволоке, происходит растворение металла на аноде. Проволочный электрод движется по заданной траектории, и положение заготовки изменяется относительно расположения проволочного электрода. В процессе обработки продукты электролиза, такие как гидроксиды и газообразный водород, должны быть удалены, а электролит в зоне обработки должен постоянно обновляться. В про-

тивном случае будут происходить электрические короткие замыкания, в межэлектродном зазоре будут накапливаться продукты обработки и процесс будет нестабильным.

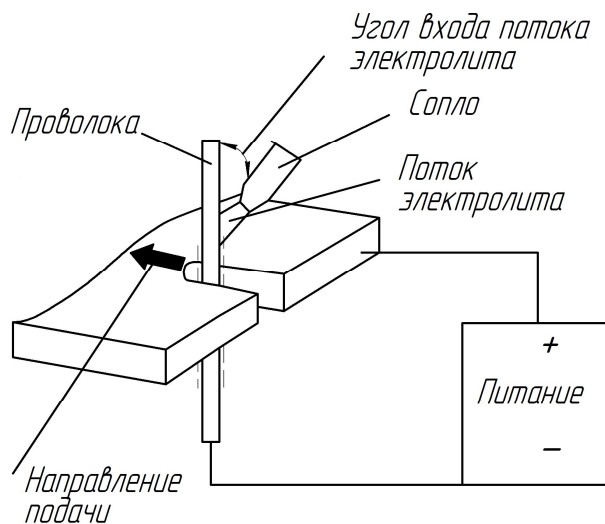


Рис. 1. Принципиальная схема электрохимической обработки проволоки с электролитом смыва

Подача электролита также возможна по осевой схеме, когда электролит течет вдоль оси проволочного электрода, что показано на рис. 2. В случае угла подачи потока электролита, отличающегося от  $0^\circ$ , электрод может смещаться за счет воздействия силы потока электролита, при этом стабильность обработки снижается. Для получения соосной подачи электролита разработано специальное приспособление, как показано на рис. 2 [5].

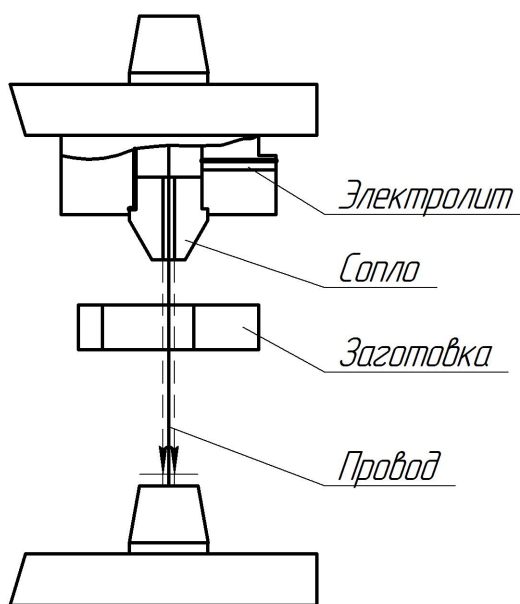


Рис. 2. Схема обработки при соосной подаче электролита



### Оптимальные параметры процесса

Боковой зазор играет важную роль в электрохимической обработке проволокой. Точность обработки может быть повышена за счет уменьшения межэлектродного зазора в процессе обработки. В данной работе эксперименты проводились по прорезанию прямых щелей в листе из титанового сплава ОТ4 толщиной 0,18 мм для исследования влияния параметров процесса на боковой зазор. Рис. 3 показывает принципиальную схему формирования бокового зазора.

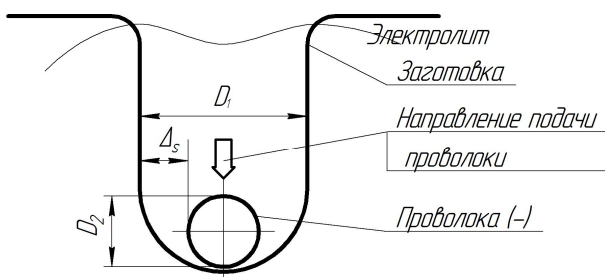


Рис. 3. Формирование бокового зазора при ЭХОП

На рис. 4 показано влияние диаметра сопла на величину бокового зазора, значения получены при рабочем напряжении 18 В [5]. Из рисунка видно, что боковой зазор становится большим с увеличением диаметра сопла. Боковой зазор составляет 191 мкм при диаметре сопла 0,2 мм и возрастает до 475 мкм при диаметре сопла 0,8 мм. В [5] показаны детали после резки соплами с диаметрами 0,2, 0,4 и 0,8 мм, соответственно. Травление за пределами зоны обработки очень мало при диаметре сопла 0,2 мм, но при увеличении диаметра сопла до 0,8 мм эта зона значительно возрастает. Это объясняется тем, что больший диаметр сопла снижает давление электролита и скорость потока, что приводит к распылению жидкости и, таким образом, электролит распределяется далеко от сопла по поверхности обрабатываемой детали. Очевидно, что чтобы получить малую величину бокового зазора, необходим малый диаметр сопла. По этой причине все последующие эксперименты проводились с соплом 0,2 мм в диаметре.

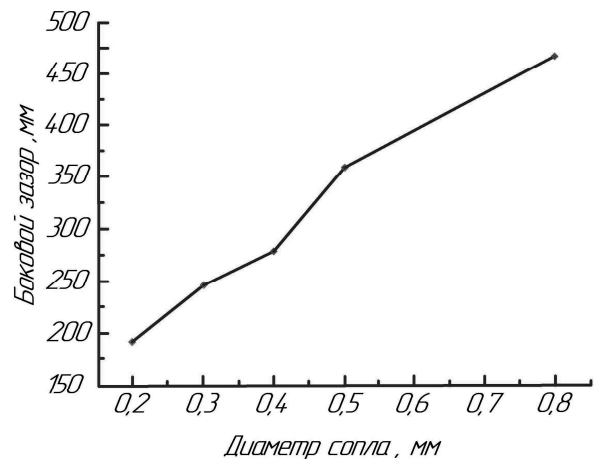


Рис. 4. Изменение бокового зазора в зависимости от диаметра сопла

### Оптимизация технологических параметров

В работе [5] рассмотрена оптимизация рассматриваемого технологического процесса с целью выбора сочетания параметров обработки, которые могут обеспечить меньший боковой зазор при стабильном процессе обработки. Рассматривались пять независимых параметров, таких как концентрация электролита, расстояние заготовки от сопла, расход электролита, рабочее напряжение и скорость подачи проволоки.

На рис. 5 показано влияние параметров обработки на боковой зазор.

Рис. 5 (д) показывает, что скорость подачи проволоки в большей степени влияет на величину бокового зазора, чем другие параметры. Боковой зазор уменьшается с увеличением скорости подачи проволоки и вместе с тем очевидно, что если скорость подачи электрода - проволоки достаточно высока, то фронтальный межэлектродный зазор может оказаться слишком мал для того, чтобы поток электролита попал между проволокой и заготовкой, поэтому будут происходить электрические короткие замыкания. Таким образом, для обеспечения точности скорости подачи можно повышать лишь при стационарном процессе обработки. В данной работе оптимальная скорость подачи проволоки составляет 1,8 мм / мин. Эксперименты показали, что если скорость подачи проволоки составляет более чем 1,8 мм / мин, то процесс обработки становится неустойчивым, так как часто возникают электрические короткие замыкания.

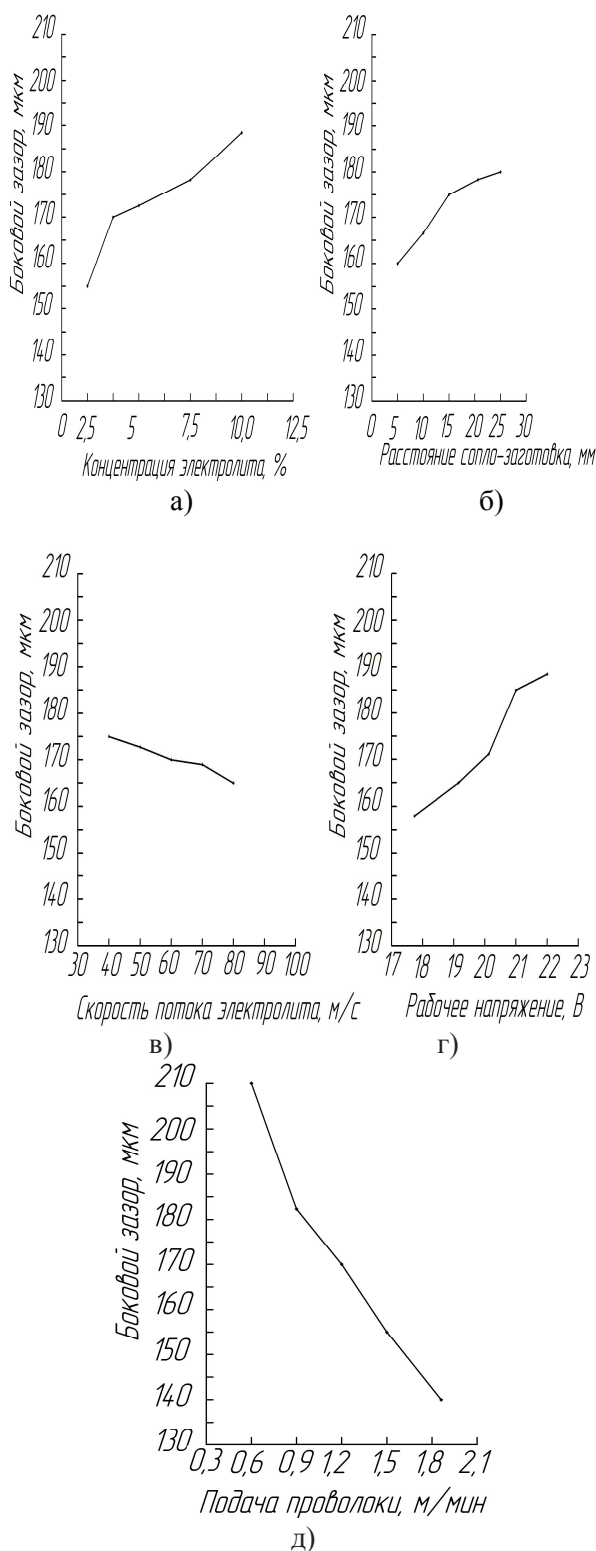


Рис. 5. Влияние параметров обработки на боковой зазор

График на рис. 5 (г) демонстрирует влияние рабочего напряжения на боковой зазор. Замечено, что боковой зазор увеличивается с ростом приложенного напряжения. В связи с увеличением напряжения сила тока также возрастает. Закон Фарадея гласит, что скорость уда-

ления материала пропорциональна силе тока. Таким образом, боковой зазор увеличивается с увеличением рабочего напряжения.

Также было рассмотрено влияние концентрации электролита на показатели обработки. Боковой зазор увеличивается с увеличением концентрации электролита, как это показано на рис. 5 (а). При увеличении концентрации электролита съём материала по краям зоны обработки идет интенсивнее, чем в других областях. Это объясняется тем, что плотность тока и концентрация ионов здесь больше, чем в других областях. Для ЭХОП, когда необходимо снизить боковой зазор, предпочтителен, соответственно, электролит с низкой концентрацией. Тем не менее, если концентрация слишком низкая, то проволока будет входить в контакт с заготовкой из-за снижения скорости анодного растворения.

График на рис. 5 (б) показывает, что боковой зазор увеличивается с увеличением расстояния между заготовкой и соплом. Как показано на рис. 6, величина рассеивания электролита будет принимать такие же значения, как и в случае использования сопла большого диаметра. В то же время, когда расстояние от сопла заготовки слишком мало, происходит короткое замыкание из-за скачка давления.

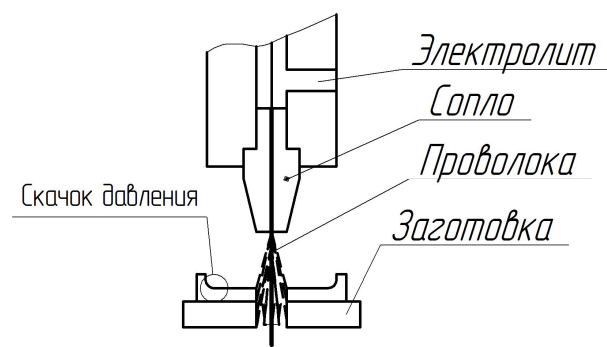


Рис. 6. Поток электролита

Боковой зазор уменьшается с увеличением скорости потока электролита, как это показано на рис. 5 (в). Высокая скорость потока обеспечивает равномерную струю электролита и необходимое удаление продуктов электролиза из зазора, что, в свою очередь, позволяет поддерживать стабильно низкий боковой зазор.

Оптимизация по методу Тагути, в итоге, позволяет определить оптимальный уровень комбинации параметров обработки: 2,5% NaCl + 2,5% NaNO<sub>3</sub>, 5 мм - расстояние от сопла заготовки, 8,7 м / с - скорость потока электроли-

та, 18 В - рабочее напряжение, и 1,8 мм / мин скорость подачи электрода-проволоки.

### Многоэлектродная электрохимическая обработка

В авиационно-космической технике применяются детали, в которых требуется выполнить массив некруглых отверстий в титановом сплаве. Для изготовления этих элементов по традиционной схеме обработки не удается обеспечить высокую производительность, поэтому можно предложить использовать многоэлектродную электрохимическую обработку проволокой с осевой подачей электролита (рис. 7). С помощью специального приспособления оси электродов находятся в одной плоскости. Во время процесса все электроды следуют по той же траектории при постоянной скорости подачи и обрабатывают заготовку одновременно. В [5] деталь, обработанная по схеме многоэлектродной обработки проволокой с осевой подачей электролита. Количество электродов было равно 5. Скорость подачи - 0,6 мм / мин, при этом суммарная скорость обработки достигала 3 мм / мин.

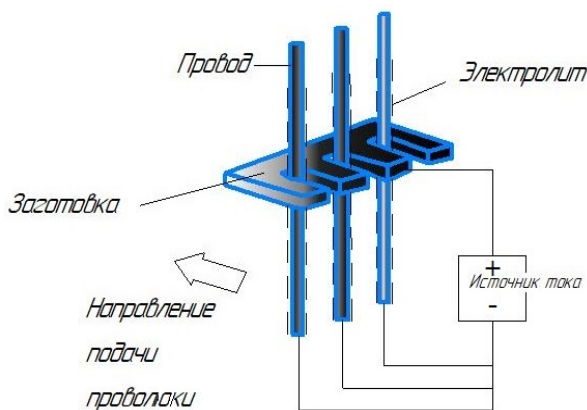


Рис. 7

### Выводы

В данной статье описываются метод электрохимической обработки проволокой с осевой подачей электролита и его апробация на деталях из титанового сплава (ОТ4). На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Электрохимическая обработка проволокой с осевой подачей электролита является перспективным способом при изготовлении деталей из титановых сплавов.

2. Наиболее важными параметрами для электрохимической обработки проволокой с осевой подачей электролита являются подача электрода-проволоки, рабочее напряжение, концентрация электролита, расстояние от сопла до заготовки и скорость потока электролита. Оптимальные параметры обработки: электролит 2,5% NaCl + 2,5% NaNO<sub>3</sub>, 5 мм расстояние от сопла заготовки, скорость потока электролита 8,7 м / с, рабочее напряжение 18 В, скорость подачи проволоки - 1,8 мм / мин.

3. Производительность электрохимической обработки проволокой может быть повышена за счет применения многоэлектродной схемы.

### Литература

1. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч I: Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. 248 с.
2. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
3. Zhu D., Wang K., Qu N.S. Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode //CIRP Ann – Manuf Technol. 2007. 56 (1). pp. 241–244.
4. El-Taweel T.A., Gouda S.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach //Int J Adv Manuf Technol. 53 (2011). pp. 181–190.
5. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy /Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu // Chinese Journal of Aeronautics. 2013. Volume 26. Issue 1. P. 224–229.

Поступила 10.10.2018; принята к публикации 13.11.2018

### Информация об авторах

**Смоленцев Евгений Владиславович** - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

**Грицюк Василий Григорьевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

**Шипилова Ольга Геннадьевна** - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Shipilova\_97@mail.ru

Крохин Дмитрий Евгеньевич - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Krochin.1993@mail.ru

## ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF TITANIUM ALLOYS WITH WIRE WITH AXIAL ELECTROLYTE FLOW

E.V. Smolentsev, V.G. Gritsyuk, O.G. Shipilova, D.E. Krokhin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** electrochemical wire processing is mainly used for cutting machined parts with a wide range of thicknesses. It has a great advantage in comparison with the non-profiled electrode in the electroerosion method, as it avoids the zone of thermal influence in the processing area. In addition, the wire electrode in the electrochemical processing can be reused, as it does not wear out. Titanium and alloys are widely used in the aerospace industry, as parts of rocket and aircraft engines, as well as the fuselage due to a good combination of high specific strength and corrosion and heat resistance. Titanium and its alloys are considered to be difficult to process due to a number of properties of these materials, such as poor thermal conductivity, chemical reactivity, and low modulus of elasticity. The article deals with the axial supply of electrolyte for the removal of electrolysis products. The axial flow of electrolyte to remove electrolysis products in the processing of titanium, the optimization of processing parameters such as feed rate, operating voltage, electrolyte concentration, etc. are considered. Experimental results show that electrochemical machining with axial electrolyte flow is a promising technique for machining titanium alloy OT4. The article also discusses the possibility of multielectrode electrochemical processing to improve processing performance

**Key words:** electrochemical processing, titanium, electrode wire

### References

1. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V., Smolentsev G.P., Koptev I.T. "Theory of electrical and physico-chemical processing methods. Part 1: Processing materials with the use of the tool" ("Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki. Ch I: Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2008, 248 p.
2. Smolentsev E.V. "Design of electrical and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 511 p.
3. Zhu D., Wang K., Qu N.S. "Micro wire electrochemical cutting by using in situ fabricated wire electrode", *CIRP Ann – Manuf Technol*, 2007, no. 56 (1), pp. 241–244.
4. El-Taweel T.A., Gouda S.A. "Performance analysis of wire electrochemical turning process—RSM approach", *Int J Adv Manuf Technol*, 2011, no. 53, pp. 181–190.
5. Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Zhu "Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloy", *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, vol. 26, issue 1, pp. 224–229.

Submitted 10.10.2018; revised 13.11.2018

### Information about the authors

**Evgeniy V. Smolentsev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

**Vasiliy G. Gritsyuk**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

**Ol'ga G. Shipilova**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Shipilova\_97@mail.ru

**Dmitriy E. Krokhin**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Krochin.1993@mail.ru

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА****Л.С. Печенкина, О.И. Попова, М.И. Попова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассмотрено применение комплексно-легированных сплавов для изготовления режущего инструмента. Одними из показателей, влияющих на параметры качества обработанной детали, которые необходимо учитывать при обработке крупногабаритных деталей, являются показатель ударной вязкости инструментального материала и продолжительность работы режущего инструмента. Применение в конструкциях режущего инструмента оптимизированных составов износостойких сплавов и способов их получения позволяет повысить износостойкость и сопротивляемость режущего инструмента ударной нагрузке. Для изготовления литого инструмента из новых комплексно-легированных сплавов использованы две принципиально различные технологические схемы: 1) отжиг литых заготовок, механическая обработка, высокотемпературная закалка, отпуск на вторичную твердость, доводка шлифованием; 2) получение точнолитых заготовок, их зачистка и доводка. Установлен рациональный химический состав комплексно-легированных сплавов (основа – железо), включающий: от 1,3% до 1,9% углерода, 3,6-5,3% молибдена, 3,4-6,1% ванадия, 4,0-5,5% хрома, до 1,3% кремния при ограниченном содержании марганца (до 1,2%), алюминия и редкоземельных элементов (до 0,15%). Использование в качестве инструментального материала новых литых комплексно-легированных сплавов обеспечивает режущему инструменту высокую стойкость и сопротивляемость ударной нагрузке, приводит к уменьшению стоимости, дает возможность изготавливать режущие инструменты, работающие при высоких ударных нагрузках, для обработки крупногабаритных деталей, зубчатых колес и других заготовок

**Ключевые слова:** режущий инструмент, ударная нагрузка, комплексно-легированные сплавы, износостойкость

**Введение**

Важным и актуальным в современном машиностроении является повышение эффективности механической обработки резанием. Решением этой проблемы является, во-первых, создание нового инструментального материала; во-вторых, создание новой геометрической формы режущего инструмента. При этом обязательно необходимо учитывать вопросы повышения стойкости, точности, прочности, производительности и экономический аспект, включающий в себя стоимость инструментального материала и изготовления режущего инструмента, а также его эксплуатацию.

Режущие инструменты, работающие при высоких ударных нагрузках, используют в тяжелой промышленности, судостроении и других отраслях, где производят обработку крупногабаритных деталей, зубчатых колес и других заготовок. Такие режущие инструменты характеризуются сложностью изготовления, связанной с повышенной точностью и высокой стоимостью.

Одними из показателей, влияющих на параметры качества обработанной детали, которые необходимо учитывать при обработке крупногабаритных деталей, являются показате-

ли надежности инструментального материала и продолжительность работы режущего инструмента. Показателем надежности инструментального материала, указывающим на его возможность сопротивляться разрушению, является ударная вязкость.

К материалу для режущего инструмента предъявляются высокие требования. Это объясняется тем, что рабочие поверхности инструментов работают при высоких контактных напряжениях, больших удельных давлениях и подвергаются износу и нагреву. Эти материалы должны обладать:

- повышенной прочностью;
- повышенной твердостью;
- повышенной стойкостью;
- повышенной теплостойкостью.

В процессе резания режущие кромки инструмента нагреваются, в результате чего уменьшается твердость инструментального материала и инструмент быстро выходит из строя. Поскольку устойчивость инструментальных материалов к действию тепла различна, например, одни при нагреве до температуры 200—250°C теряют свои режущие свойства, а другие сохраняют свои свойства при температуре до 1000°C и выше, поэтому с увеличением теплостойкости инструментального материала увеличивается стойкость инструмента.

### Постановка задачи

В результате периодических динамических и тепловых нагрузок происходит износ режущей части инструмента, зависящий от механических свойств материала, условий резания и геометрических параметров инструмента [1].

Одним из путей повышения износостойкости и сопротивляемости ударной нагрузке режущего инструмента является оптимизация составов сплавов и выбор технологии их получения.

Этого можно достичь, управляя процессами формирования структуры и свойств металла, соотношением в них основных химических элементов, комплексным легированием, модифицированием, режимами термической обработки.

Целью данной работы является повышение стойкости и сопротивляемости ударной нагрузке режущего инструмента, получаемого методами литья, за счет использования в качестве инструментального материала комплексно-легированных сплавов нового состава, конструкции фрез с разделенным припуском по высоте инструментальной рейки.

### Результаты работы

В настоящее время имеется много материалов для режущего инструмента, удовлетворяющих указанным выше требованиям. В табл. 1 представлен их анализ с учетом сплавов известных ранее и комплексно-легированных предлагаемого состава [2, 3].

Таблица 1

Виды инструментальных материалов

Название	Достоинства	Недостатки	Виды режущих инструментов
	2	3	4
Углеродистые стали	Высокая твердость после термической обработки. Низкая стоимость.	Низкая теплостойкость – 200-250°C. Работа с низкой скоростью резания. В отожженном состоянии инструмент имеет низкую твердость.	Режущие инструменты типа: «сверло», «метчик», «шабер», «развертка», «плашка», «фреза», «пила по металлу», «ножовочное полотно», «зубило».
Легированные стали	В сравнении с углеродистыми сталями обладают высокой вязкостью в закаленном состоянии и при закалке имеют меньшую склонность к трещинам и деформациям.	Низкая теплостойкость. Чувствительна к образованию карбидной сетки, которая способствует возникновению трещин и выкрашиванию режущей кромки инструмента. При повышении удельного давления – стойкость режущего инструмента уменьшается. Не обеспечивает высокую стойкость сложных фасонных инструментов.	Режущие инструменты типа: «круглая и ленточная пила», «нож для холодной резки», «зубило», «пуансон», «концевой режущий инструмент», «резец» и «фреза», для работы с небольшой скоростью резания, «спиральное сверло», «метчик», «развертка», «плашка», «гребенка», «протяжка» и другой режущий инструмент, работающий с ударными нагрузками.
Быстрорежущие стали	Высокая твердость, прочность, теплостойкость, износостойкость. Температурный режим работы до 600—650°C. Обладает высокой вязкостью, пригодна для работы с ударом. В сравнении с режущим инструментом из углеродистой стали имеет скорость резания в 2—4 раза больше, в 2-3 раза выше стойкость.	Чувствительность к перегреву. Высокая стоимость.	Режущие инструменты типа: «резец», «сверло», «фреза», «долбяк», «развертка», «зенкер», «метчик», «протяжка» и «плашка».

1	2	3	4
Твердые сплавы	Высокая твердость и износостойкость, уступающая только алмазу. Сохраняет режущие свойства во время работы при нагревании 800-900°C. Скорость резания в 3-4 раза больше скорости резания, допускаемой инструментами из быстрорежущей стали.	Повышенная хрупкость (ударная вязкость: 0,5...1,2 Дж/см <sup>2</sup> ). Низкая сопротивляемость к изменениям тепловой нагрузки. Высокая стоимость.	Режущие инструменты типа: «резец», «сверло», «фреза», «долбяк», «развертка», «зенкер», «метчик», «протяжка» и «плашка».
Керамические материалы	Высокая твердость. Температурный режим работы до 1200°C, что дает возможность проводить процесс резания с высокими скоростями.	Низкие механические свойства в сравнении с твердыми сплавами из-за высокой хрупкости и низкой сопротивляемости изгибающим нагрузкам.	Резцы с керамическими пластинками для получистовой и чистовой обработок при безударной нагрузке.
Алмазы	Высокая твердость и износостойкость. Химически мало активен. Небольшой коэффициент трения. Слабая склонность к налипанию стружек обрабатываемого материала.	Хрупкость. Низкая температуростойкость (750—850°). Высокая стоимость.	Алмазные резцы для финишной обработки цветных металлов, сплавов и неметаллических материалов.
Комплексно-легированные сплавы	Высокая твердость и износостойкость. Высокая ударная вязкость. Высокая сопротивляемость ударной нагрузке. Возможность резать металлы с высокими скоростями резания. Низкая стоимость по сравнению с инструментальными сталями и твердыми сплавами.	Низкая обрабатываемость лезвийным инструментом.	Литой режущий инструмент типа: «фасонный резец», «сверло», «фреза», «долбяк» и т.д.

Для увеличения периода стойкости режущего инструмента необходимо, чтобы материал режущей части обладал с увеличением температуры в зоне резания высокой сопротивляемостью изнашиванию; имел твердость больше твердости обрабатываемого материала; выдерживал высокие давления, ударные нагрузки, возникающие при резании без разрушения. Этим требованиям отвечают комплексно-легированные сплавы, которые дают возможность резать металлы с высокими скоростями резания.

Оптимизация составов сплавов для литого инструмента проведена исходя из того, что химический состав должен обеспечить: необходимую прокаливаемость сплавов; композиционное упрочнение; карбидное старение мартенсита и остаточного аустенита при малой склонности к коагуляции.

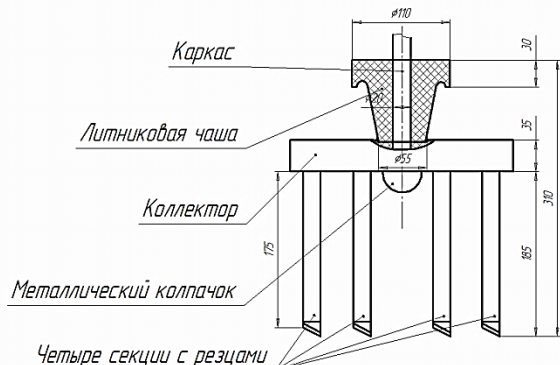
Для экспериментальной проверки свойств комплексно - легированных сплавов в качестве режущего инструмента выбран резец, литейная форма для которого проста в изготовлении (рисунок). Величина изнашивания рабочей поверхности резца, возникающая из-за трения

стружки о переднюю и заднюю его поверхности, позволяет установить его период стойкости.

Образцы из комплексно-легированных сплавов исследовались в литом состоянии, после отжига при 950°C, после закалки от 1170°C в масле и часового отпуска закаленных образцов в условиях следующих температурных режимов: 250, 450, 540°C.

Резцы из разработанных комплексно-легированных сплавов (полученные из заготовок в виде брусков 15\*15 и 30\*30 мм) испытывали точением заготовок из стали 45 при скорости резания 50 м/мин, глубине резания 1 мм и подаче 0,13 мм/об, без использования СОЖ.

Сопоставление свойств сплавов в литом состоянии проведено с быстрорежущей сталью P<sub>6</sub>M<sub>5</sub> в термообработанном состоянии (HRC<sub>э</sub> 63-64). Из табл. 2 видно преимущество разработанных комплексно-легированных сплавов с повышенным содержанием молибдена (сплавы 2-5) по сравнению с быстрорежущей сталью P<sub>6</sub>M<sub>5</sub> и сплавом 1 (с низким содержанием молибдена).



Эскиз модельного блока отливки «резец» и элементов ЛПС

Для изготовления литого инструмента из новых комплексно-легированных сплавов использованы два принципиально различных технологических варианта. Если необходимо получить инструмент, который работает в условиях высокой ударной нагрузки или требует большой обработки резанием, отливки подвергаются отжигу при 920...980°C. Необходимость отжига объясняется присутствием в микроструктуре литого комплексно-

легированного сплава сетки тройной эвтектики А+МС+МС<sub>3</sub>, которая уменьшает ударную вязкость металла высокой твердостью сплава (от 57 до 62 HRCэ). Отжиг разрушает сетку квазиэвтектики, частично происходит карбидное превращение из МС<sub>3</sub> в МС, выделяется большое количество мелких карбидов МС. При этом структура сплава становится более равномерной, заметно повышается ударная вязкость (до КС 20... 30 Дж/см<sup>2</sup> и более) и снижается его твердость (до 28...30 HRCэ). Пониженная твердость сплава обеспечивает возможность механической обработки отливок лезвийным инструментом. Затем осуществляется завершающая термическая обработка, которая представляет собой высокотемпературную закалку (от 1170- 1200°C) и отпуск в условиях 520-560°C (по 40 минут каждый), а затем доводка инструмента шлифованием до нужных размеров. После термической обработки в структуре сплава сохраняется 8...15% остаточного аустенита. Твердость инструмента составляет 62,0...65,0 HRCэ.

Химические составы исследованных сплавов и их некоторые свойства представлены в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав и свойства сплавов

Название	Содержание элементов, мас.%								Твердость в литом состоянии HRCэ в заготовках, мм		Время работы резцов до переточки, мин.	Ударная вязкость КС, Дж/см <sup>2</sup>
	C	Mo	Cr	V	Si	Mn	Al	PЗМ	15*15	30*30		
1	1.46	0.64	6.21	5.10	1.83	0.58	0.32	0.15	57-61	54-58	35-45	8-10
2	1.90	4.73	5.32	6.10	0.92	0.88	0.34	0.15	61-63	60-62	75-85	10-14
3	1.76	5.30	4.00	5.82	0.88	0.30	0.16	0.02	62-64	59-61	80-90	15-18
4	1.64	5.12	5.00	5.78	1.16	0.75	0.22	0.08	61-63	59-61	75-85	18-20
5	1.42	3.60	5.50	4.94	1.10	0.48	0.28	0.04	60-62	59-61	65-75	18-22
P <sub>6</sub> M <sub>5</sub>	В термообработанном состоянии HRCэ								-	63-64	45-60	-

Второй технологический вариант производства инструмента заключается в получении точности литой заготовки (например, по выплавляемым моделям), её зачистки, шлифования до требуемых размеров, отпуске на вторичную твердость. Инструмент, который изготавливается по этому варианту, характеризуется немного сниженной ударной вязкостью (из-за сохранения в структуре небольшого количества тройной квазиэвтектики в виде отдельных

изолированных участков), но по износостойкости и технологичности не уступает тому инструменту, который подвергался полной термической обработке. Такой технологический вариант предлагается применять при производстве сверл и концевых фрез диаметром 15...40 мм. В этом случае поверхностная твердость инструмента составляет 59.0...62.0 HRCэ, что вполне достаточно для его надежной работы. Инструмент, имеющий диаметр



меньше 15 мм, необходимо термически обработать, чтобы повысить ударную вязкость. Отлитый инструмент, имеющий диаметр больше 40 мм, без термической обработки характеризуется сниженной твердостью (в некоторых случаях меньше 57 HRCэ) из-за самоотпуска в результате охлаждения отливок в форме. Следовательно, для такого инструмента необходимо использование первой схемы.

Также для анализа условий получения литого инструмента была изготовлена концевая фреза.

В новой конструкции червячной фрезы с разделенным припуском по высоте инструментальной рейки, благодаря уменьшению рабочей высоты зуба для первого, второго и третьего проходов сокращается длина основания каждого зуба, что дало возможность, не уменьшая прочности зуба, уменьшить угловой шаг зубьев в торцевом сечении и образовать на том же внешнем диаметре червячной фрезы большее количество реек. Увеличение количества реек увеличивает количество профилирующих резцов, что позволило обеспечить повышение точности обработки, а также уменьшило неравномерность нарезания и динамические нагрузки [4].

Применение комплексно-легированных сплавов и предложенный способ изготовления можно использовать для червячных фрез с разделенным припуском по высоте, что улучшит эксплуатационные свойства фрезы и уменьшит стоимость изготовления.

### Заключение

Установлен рациональный химический состав комплексно-легированных сплавов (основа – железо), включающий: от 1,3% до 1,9% углерода, 3,6-5,3% молибдена, 3,4-6,1% ванадия, 4,0-5,5% хрома, до 1,3% кремния при ограниченном содержании марганца (до 1,2%), алюминия и редкоземельных элементов (до 0,15%).

Для изготовления литого инструмента из новых комплексно-легированных сплавов предложено использовать две принципиально различные технологические схемы:

- отжиг литых заготовок, механическая обработка, высокотемпературная закалка, отпуск на вторичную твердость, доводка с помощью шлифования;
- получение точнолитых заготовок, их зачистка и доводка шлифованием, отпуск на вторичную твердость.

Представленные сплавы и технологии могут быть востребованы при производстве литого металлорежущего инструмента (резцов, фрез, свёрл), проведены их испытания, показавшие высокую износостойкость и работоспособность изделий. Использование в качестве инструментального материала новых литых комплексно-легированных сплавов обеспечивает режущему инструменту высокую стойкость и сопротивляемость ударной нагрузке, приводит к уменьшению стоимости, дает возможность изготавливать режущие инструменты, работающие при высоких ударных нагрузках, для обработки крупногабаритных деталей, зубчатых колес и других заготовок.

### Литература

1. Попова О.И., Попова М.И., Печенкина Л.С. Пути повышения стойкости червячных фрез // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 134-139.
2. Афанасьев В.К., Кольба А.В. Разработка инструмента из белого чугуна без применения специального легирования // Металлообработка. 2011. № 2 (62). С. 41-48.
3. Печенкина Л.С. Оптимизация состава самозакаливающихся чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 117-121.
4. Попова О.И., Кривошея А.В., Попова М.И. Усовершенствование математических моделей формообразования червячных колес с учетом равномерного припуска при обработке // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 2. С. 114-122.

Поступила 14.09.2018; принята к публикации 14.11.2018

### Информация об авторах

**Печенкина Лариса Степановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pls-7@mail.ru

**Попова Ольга Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: olga\_10\_porova@mail.ru

**Попова Маргарита Ивановна** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

## APPLICATION OF INTEGRATED HYDRA METALS FOR THE CUTTING TOOL MANUFACTURING

L.S. Pechenkina, O.I. Popova, M.I. Popova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the article considers the use of complex alloys for manufacturing cutting tools. One of the indicators affecting the quality parameters of the machined part, which should be taken into account when machining large-sized parts, is the indicator of the toughness of the tool material and the cutting tool operation time. The use of optimized compositions of wear-resistant alloys and methods for their preparation allows one to increase the wear resistance and resistance of the cutting tool to shock load. For the manufacture of the cast tool from the new complex alloys, two fundamentally different technological schemes were used: 1) annealing of cast workpieces, mechanical processing, high-temperature hardening, tempering for secondary hardness, and finishing by grinding; 2) obtaining precise castings, stripping and finishing them. A rational chemical composition of complex alloys (base - iron) was established, including: from 1.3% to 1.9% carbon, 3.6-5.3% molybdenum, 3.4-6.1% vanadium, 4.0-5.5% chromium, up to 1.3% silicon with a limited content of manganese (up to 1.2%), aluminum and rare-earth elements (up to 0.15%). The use of new cast complex alloys as a tool material provides the cutting tool with high durability and resistance to shock load, leads to a reduction in cost, makes it possible to produce cutting tools operating at high shock loads, for machining large-sized parts, gears and other blanks

**Key words:** cutting tool, impact load, complex-alloyed alloys, wear resistance

### References

1. Popova O.I., Popova M.I., Pechenkina L.S. "Ways to increase the durability of worm cutters", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol.14, no. 4, pp.134-139.
2. Afanas'ev V.K., Kol'ba A.V. "Development of a tool made of white cast iron without special alloying", *Metalworking (Metalloobrabotka)*, 2011, no. 2 (62), pp. 41-48.
3. Pechenkina L.S. "Optimization of the composition of self-hardening cast irons", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp.117-121.
4. Popova O.I., Krivosheya A.V., Popova M.I. "Improvement of mathematical models of the formation of worm wheels, taking into account the uniform allowance during processing", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 2, pp.114-122.

Submitted 14.09.2018; revised 14.11.2018

### Information about the authors

**Larisa S. Pechenkina**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pls-7@mail.ru

**Ol'ga I. Popova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: olga\_10\_popova@mail.ru

**Margarita I. Popova**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ, ИЗГОТОВЛЯЕМОГО НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.П. Суворов, А.В. Кузовкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** актуальность исследования обоснована необходимостью модернизации технологии проектирования и изготовления электрода-инструмента для электрических методов обработки с целью снижения затрат в условиях опытно-конструкторского и единичного производств. Раскрыты возможности использования современных средств автоматизированного проектирования и технологии быстрого прототипирования для изготовления сложнопрофильного инструмента для единичного и опытно-конструкторского производств. В качестве подхода к исследованию данной проблемы используется расчет геометрии профиля рабочей поверхности комбинированного сложнопрофильного электрода-инструмента для электрических методов обработки с учетом его реализации на основе аддитивных технологий из диэлектрических материалов с последующим нанесением токопроводящего покрытия. Представлены методики определения габаритных размеров электрода-инструмента для электрических методов обработки с учетом износа и толщины токопроводящего покрытия при проектировании и изготовлении инструмента с помощью аддитивных технологий и использовании его в опытно-конструкторском и единичном производствах. Материалы статьи представляют практическую ценность для предприятий машиностроительного комплекса, так как позволяют производить изменения технологии проектирования и изготовления электродов-инструментов для электрических методов обработки и использовать современные системы автоматизированного проектирования и аддитивные технологии, что снижает себестоимость и повышает вариативность его применения

**Ключевые слова:** электрод-инструмент, электрохимическая обработка, аддитивные технологии

### Введение

Современное машиностроительное производство, производство средств транспорта, медицинского оборудования, строительные процессы и т.д. характеризуются активными изменениями, связанным с интегрированием в них генеративных технологий. Последние подразумевают под собой активное использование в проектировании и дизайне цифрового или физического продукта современных информационных технологий [1].

В связи с этим актуальным становится вопрос реализации деталей сложной формы с поверхностями, имеющими класс непрерывности G2 и выше. Такие поверхности могут быть получены исключительно в условиях применения дорогостоящих обрабатывающих пятикоординатных станков с ЧПУ. В силу высокой точности и хорошего качества поверхностного слоя, детали, выполненные на таких станках, не нуждаются в финишной обработке, но обладают высокой стоимостью. Как правило, это детали единичного производства, типа элементов пресс-форм, позволяющих в дальнейшем распределить их высокую стоимость на большое количество деталей, выпускаемых в массовом производстве. Кроме того, поверхности класса

G2 могут быть получены на основе применения бесконтактных электрических методов обработки (электрохимическая (ЭХО) и электроэрозионная (ЭЭО) обработки) [2]. В этом случае кривизна G2 обеспечивается не сложным движением осевого инструмента (как для случая механообработки на станках с ЧПУ), а простым поступательным или вращательным движением электрода-инструмента (ЭИ). Однако сам ЭИ должен иметь форму рабочей поверхности не только с кривизной G2, но и обратную эквидистантную обрабатываемой поверхности детали.

### Методы

Методика расчета геометрии инструмента для случая ЭХО описана в литературе и нашла свое отражение в серийном производстве для случая цельного инструмента, полностью выполненного из токопроводящего материала. Однако для изготовления комбинированного ЭИ на основе аддитивных технологий она нуждается в корректировке и уточнении.

Для решения этой задачи была предложена расчетная схема геометрии комбинированного ЭИ, представленная на рис. 1, на которой 1 – обрабатываемая деталь; 2 – комбинированный инструмент;  $L_{дет}$  – размер детали;  $L_{ЭИ}$  – размер комбинированного ЭИ;  $L_{мод}$  – размер модели после 3D-печати, но перед нанесением

токопроводящего покрытия;  $h_{\text{пок}}$  – толщина токопроводящего покрытия на торцевой части;  $h_{\text{покб}}$  – толщина токопроводящего покрытия на боковой поверхности ЭИ;  $S$  – устоявшийся торцевой межэлектродный промежуток;  $S_{\text{б}}$  – боковой МЭП при ЭХО полости.

Как видно из схемы, характерный размер модели комбинированного ЭИ, который необходим для осуществления 3D-печати, может быть определен по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}} - S - h_{\text{пок}}. \quad (1)$$

В выражении (1) величина  $L_{\text{дет}}$  является заданным параметром,  $h_{\text{пок}}$  – толщина токопроводящего покрытия будет определена исходя из электрических параметров обработки. Величина устоявшегося торцевого зазора определяется в соответствии с [3]:

$$S = \frac{\eta \cdot \varepsilon \cdot \chi \cdot U}{\rho \cdot v_u}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – выход по току, который зависит от обрабатываемого материала, плотности тока, скорости электролита и т.д. (конкретные данные приведены в [3, 4]);  $\varepsilon$  – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала;  $\chi$  – удельная проводимость, электролита;  $U$  – рабочее напряжение на электродах;  $\rho$  – плотность материала детали;  $v_u$  – скорость подачи ЭИ для поддержания  $S = \text{const}$ .

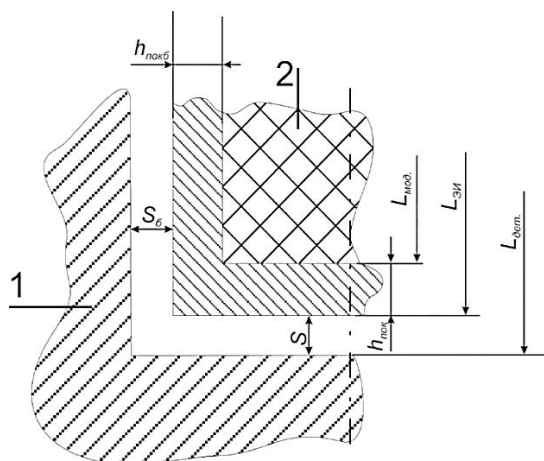


Рис. 1. Расчетная схема для проектирования комбинированного ЭИ

Толщина токопроводящего покрытия  $h_{\text{пок}}$  определяется исходя из подводимой электрической мощности, которая в соответствии с рекомендациями [3] определяется для каждого ЭИ индивидуально.

Современные источники питания электрохимического оборудования обеспечивают плотность технологического тока в диапазоне от 0,4 до 1 А/мм<sup>2</sup>. Этого достаточно для реали-

зации практически всех технологических схем. Величина постоянного технологического тока  $I_m$  в соответствии с рекомендациями определяется по выражению:

$$I_m = F_o \frac{\chi(U - \Delta U)}{S}, \quad (3)$$

где  $F_o$  – площадь обрабатываемой поверхности, мм;  $\Delta U$  – потеря напряжения в МЭП, по данным [3] они составляют ~5В. Учитывая, что для большинства материалов и схем обработки  $U = 10-18$  В, выражение (3) принимает вид:

$$I_m = F_o \frac{\chi^{0,7} U}{S}. \quad (4)$$

Исходя из чего можем выразить  $h_{\text{пок}}$

$$\begin{aligned} I_m \cdot (S + h_{\text{пок}}) &= F_o \cdot (S + h_{\text{пок}}) \frac{0,7\chi U}{S} \\ I_m \cdot (S + h_{\text{пок}}) &= \frac{0,7\chi U F_o}{S} \cdot (S + h_{\text{пок}}) \\ I_m S + I_m h_{\text{пок}} &= \frac{0,7\chi U F_o}{S} S + \frac{0,7\chi U F_o}{S} h_{\text{пок}} \\ I_m h_{\text{пок}} - \frac{0,7\chi U F_o}{S} h_{\text{пок}} &= \frac{0,7\chi U F_o}{S} S - I_m S \\ &= h_{\text{пок}} \left( I_m - \frac{0,7\chi U F_o}{S} \right) = S \left( \frac{0,7\chi U F_o}{S} - I_m \right) \\ h_{\text{пок}} &= \left| S \frac{(A - I_m)}{(I_m - A)} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

Обобщая приведенные выражения, можно сделать вывод о том, что геометрические размеры комбинированного ЭИ, реализуемого с помощью аддитивной печати, являются функцией геометрического размера детали, скорректированного на величину устоявшегося зазора и толщины покрытия, причем последние являются константами, определяемыми режимами обработки:

$$L_{\text{мод}} = f(L_{\text{дет}}, S, h_{\text{пок}}), \quad (6)$$

где  $S = \text{const}$ , определяемая из закона анодного растворения [см];  $h_{\text{пок}}$  – определяется по выражению (5).

Однако для электроэрозионной обработки (ЭЭО) данная методика не пригодна в связи с износом электрода-инструмента в процессе эксплуатации.

Следовательно, расчетная схема для определения параметров геометрии заготовки ЭИ примет вид, представленный на рис. 2, на которой 1 – обрабатываемая деталь; 2 – комбинированный ЭИ;  $L_{\text{дет}}$  – размер ЭИ с нанесенным покрытием;  $L_{\text{ЭИ}}$  – размер ЭИ с нанесенным покрытием;  $L_{\text{мод}}$  – размер модели после 3D-печати, но перед нанесением токопроводящего покрытия;  $h_{\text{пок}\Sigma}$  – суммарная толщина токопроводящего покрытия, состоящая из толщины  $h_{\text{покв}}$  покрытия, которое удалится за счет электрической

эрозии, и  $h_{\text{покI}}$  – толщины покрытия, необходимой для обеспечения протекания электрических процессов в МЭЗ;  $S$  – устоявшийся торцевой межэлектродный промежуток;  $S_{\text{б}}$  – боковой МЭЗ при ЭЭО отверстия/полости.

С учетом схемы, представленной на рис. 2, характерный размер  $L_{\text{мод}}$  для реализации 3D модели методами аддитивных технологий определяется по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}} - S - h_{\text{пок}\Sigma}, \quad (7)$$

где  $h_{\text{пок}\Sigma}$  определяется как:

$$h_{\text{пок}\Sigma} = h_{\text{покI}} + h_{\text{покV}}, \quad (8)$$

Из литературы [5] известно, что толщина токопроводящего слоя, гарантированно позволяющая реализовывать электрические параметры ЭЭО, должна обеспечивать пропускание суммарной энергии импульсов, участвующих в электроэрозионном процессе:

$$W_{\text{н}} = \frac{\rho}{f}, \quad (9)$$

где  $f$  – частота импульсов, Гц;  $\rho$  – мощность импульсов, определяющаяся по выражению [5]:

$$\rho = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}}, \quad (10)$$

где  $U_{\text{ср}}$  – напряжение в МЭЗ, которое находится в диапазоне  $0,5 \div 0,75 U_{\text{хх}}$  (напряжения холостого хода);  $I_{\text{ср}}$  – ток на электродах, который находится в диапазоне  $0,5 \div 0,75 I_{\text{кз}}$  (ток короткого замыкания).

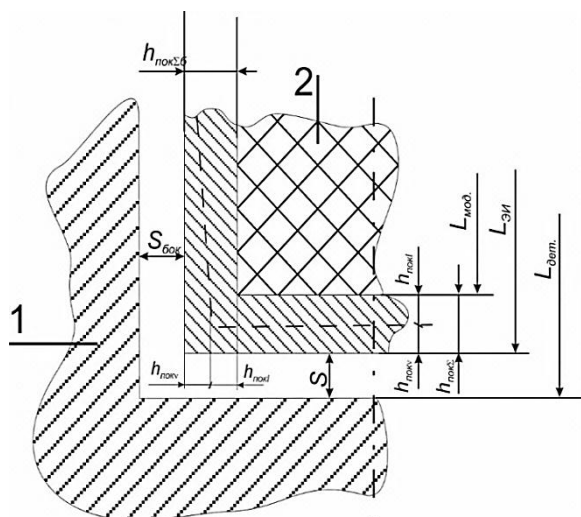


Рис. 2. Расчетная схема для проектирования комбинированного ЭИ с учетом износа токопроводящего материала за счет электрической эрозии

В связи с этим толщина покрытия, необходимого для обеспечения протекания электрических процессов в МЭЗ, может быть определена по формуле:

$$h_{\text{покI}} = \frac{2\rho}{W_{\text{н}}} L_{\text{ЭИ}}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление;  $L_{\text{ЭИ}}$  – длина электрода-инструмента.

В свою очередь,  $h_{\text{покV}}$  величину покрытия, которое удалится за счет электрической эрозии, по данным литературы [3] можно определить по формуле:

$$h_{\text{покV}} = t_u^{0,15} (k_3 + k_4 \ln I_m + k_5 \ln t_u), \quad (12)$$

где  $k_3$  – коэффициент, характеризующий разрушение материала электрода заготовки на единицу вводимой энергии;

$k_4$  – эмпирический коэффициент, характеризующий степень влияния силы тока на износ ЭИ;

$k_5$  – эмпирический коэффициент, характеризующий степень влияния времени импульса на износ ЭИ.

## Результаты

Предложенные методики расчета параметров рабочей поверхности ЭИ для электрических методов обработки были реализованы в виде программного средства «Подсистема параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки». Данное программное обеспечение было написано на языке VB.NET в программном модуле iLogic, который является удобным и гибким способом контроля параметров при проектировании деталей в системе автоматизированного проектирования Autodesk Inventor. На основе разработанного программного средства был спроектирован и реализован ЭИ для электроэрозионной обработки (рис. 3).

Полученные результаты были подтверждены в экспериментальных условиях:

- осуществлен расчет рабочей поверхности ЭИ;
- спроектирован ЭИ с использованием разработанного программного обеспечения;
- проведены испытания работоспособности комбинированного ЭИ для ЭЭО, которые показали его хорошую стойкость.

Для этого была выбрана обработка труднодоступных участков рабочего колеса турбо-насосного агрегата, производимая при силе тока 4А, скважности 2, частоте 440 кГц и площади обработки 100 мм<sup>2</sup>. В процессе эксперимента стойкость ЭИ составила более 30 минут, а шероховатость обработанной поверхности соответствовала значению Ra = 1,25 – 0,63 мкм.

## Выводы

Полученные результаты представляют интерес для различных отраслей производства. Внесение изменений в технологию проектирования и изготовления электродов-инструментов для электрических методов обработки существенно расширяет область их технологического использования за счет снижения себестоимости и повышения вариативности их применения.

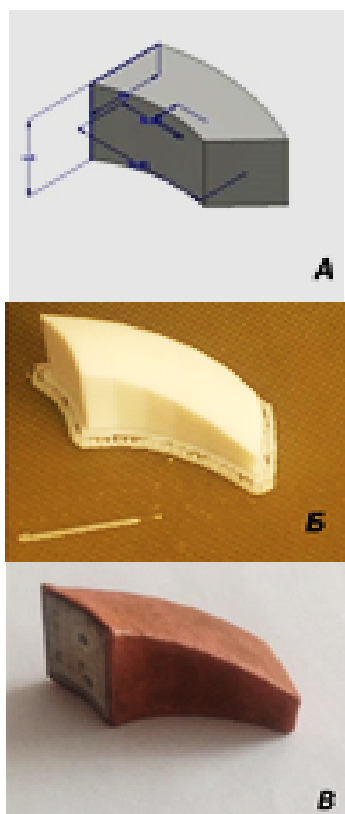


Рис. 3. Проектирование и изготовление комбинированного ЭИ: А – разработка цифрового прототипа, Б – создание заготовки ЭИ из токонепроводящих материалов, В – комбинированный ЭИ

## Литература

1. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 9-15.
2. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Параметрическое проектирование электрода-инструмента для электрообработки с помощью модуля ilogic // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 105-109.
3. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. М.: Высш. шк., 1983. 247 с.
4. Волосатов В.А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. М.: Машиностроение, 1988. 718 с.
5. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л.: Машиностроение, 1989.
6. Суворов А.П. Использование современных информационных технологий при разработке сложнопрофильного электрода-инструмента // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 4. С. 11.
7. Суворов А.П., Кретинин А.В., Кузовкин А.В. Методика изготовления сложнопрофильного электрода-инструмента по технологии быстрого прототипирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 11-14.
8. Suvorov A.P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD // Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2017. С. 148-152.
9. Смоленцев В.П., Кузовкин А.В., Поташников М.Г. Проектирование технологической оснастки для электрических методов обработки. Воронеж: ВГТУ, 2006. 149 с.

Поступила 03.09.2018; принята к публикации 13.11.2018

## Информация об авторах

**Суворов Александр Петрович** - старший преподаватель, кафедра графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (905) 049-86-43, e-mail: alex\_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>

**Кузовкин Алексей Викторович** - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (960) 131-41-63, e-mail: akuzovkin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9536-3928>

## FEATURES OF CALCULATION OF A COMBINED ELECTRODE-TOOL FOR ELECTRICAL METHODS FOR TREATMENT MANUFACTURED BASED ON ADDITIVE TECHNOLOGIES

A.P. Suvorov A.V. Kuzovkin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the relevance of the research is justified by the need to modernize the technology of designing and manufacturing an electrode tool for electrical processing methods in order to reduce costs in the conditions of experimental design and individual production. In this regard, the article is aimed at disclosing the possibilities of using modern computer-aided design tools and rapid prototyping technology for the manufacture of a complex profile tool for a single and pilot production. As an approach to the study of this problem, the geometry of the profile of the working surface of the combined complex-profile electrode-tool for electrical processing methods is used, taking into account its implementation based on additive technologies made of dielectric materials with subsequent application of a conductive coating. The article presents the methods for calculating the geometry of electrode tools, both for electrochemical and electroerosive processing methods, which are produced on the basis of additive technologies from dielectric materials with the subsequent application of a conductive coating, which served as the basis for identifying the basic laws governing the determination of the thickness of the conductive coating, which directly depends on the modes of use of the electrode tool. The materials of the article are of practical value for the enterprises of the machine-building complex in connection with the modernization of the manufacturing process of the electrode-tool for electrical processing methods, reducing its cost and increasing the variability of its manufacture

**Key words:** electrode-tool, electrochemical processing, additive technologies

### References

1. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. "Use of additive technologies in the production of shaped surfaces", *Bulletin of P.A. Solov'yev Rybinsk State Aviation Technological University (Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy universiteta im. P.A. Solov'yeva)*, 2017, no. 2, pp. 9-15.
2. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. "Parametric design of an electrode-tool for electrical processing using the ilogic module", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennoy tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, no. 3, pp. 105-109.
3. Smolentsev, V.P. "Electrophysical and electrochemical methods for processing materials" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, 247 p.
4. Volosatov V.A. "Reference book for electrochemical and electrophysical processing methods" ("Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki"), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 718 p.
5. Nemilov E.F. "Reference book for electrical discharge machining of materials" ("Spravochnik po elektroerozionnoy obrabotke materialov"), Leningrad, Mashinostroenie, 1989.
6. Suvorov A.P. "Use of modern information technologies in the development of a complex electrode tool", *Modeling, Optimization and Information Technologies (Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii)*, 2017, no. 4, p. 11.
7. Suvorov A.P., Kretinin A.V., Kuzovkin A.V. "Method of manufacturing a complex-profile electrode tool using rapid prototyping technology", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 2, pp. 11-14.
8. Suvorov A.P. "Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD", *Proc. of the Intern. scientific-practical conf.: Infographics and information design: data visualization in science (Infografika i informatsionnyy dizayn: vizualizatsiya dannykh v nauke: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf)*, Omsk, 2017, pp. 148-152.
9. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Potashnikov M.G. "Designing machining attachments for electrical processing methods" ("Proektirovanie tekhnologicheskoy osnastki dlya elektricheskikh metodov obrabotki"), Voronezh, VSTU, 2006, 149 p.

Submitted 03.09.2018; revised 13.11.2018

### Information about the authors

**Aleksandr P. Suvorov**, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), ORCID: 0000-0002-1482-3572

**Aleksey V. Kuzovkin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), ORCID: 0000-0001-9536-3928

УДК 539.216.2

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДОВ ВИСМУТА N-ТИПА ПРОВОДИМОСТИ С НАНОРАЗМЕРНОЙ ОКСИДНОЙ ФАЗОЙ

Ю.В. Панин, Ю.Е. Калинин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** рассмотрены вопросы повышения термоэлектрической добротности применяемых на практике термоэлектрических материалов. Существенный прорыв в повышении термоэлектрической добротности (ZT) термоэлектриков был осуществлен в 50-е годы прошлого века, благодаря реализации выдвинутой А.Ф. Иоффе концепции полупроводниковых твердых растворов на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ , которая в дальнейшем была реализована на практике. В настоящее время наметился новый прорыв в повышении ZT термоэлектрических материалов, основанный на применении наноструктурированных термоэлектрических материалов, а также введении в структуру термоэлектриков наночастиц других компонентов. С учетом последних тенденций повышения термоэлектрической добротности в работе исследованы термоэлектрические параметры композиционного материала на основе твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Se}_2\text{Te}_3$  n-типа проводимости, содержащего наноразмерную оксидную фазу основного полупроводникового материала. Образцы для исследований были синтезированы по керамической технологии с концентрацией наноразмерного оксидного наполнителя 0,1 - 0,12 масс. %. Установлено, что введение оксидного наноразмерного наполнителя приводит к увеличению отношения электропроводности к теплопроводности материала и росту термоэдс. Показано, что термоэлектрическая добротность получаемых композитов достигает максимального значения  $ZT = 1$  в интервале температур 500-600 К.

**Ключевые слова:** нанокompозиты, термоэдс, удельное электрическое сопротивление, коэффициент теплопроводности

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Создание высокотехнологичного производства автономных источников тока на основе термоэлектрических генераторных модулей нового поколения», реализуемого в рамках постановления № 218 03.G25.31.0246

### Введение

Эффективность работы термоэлектрических генераторов зависит от добротности термоэлектрического материала, из которого изготовлены ветви термоэлементов. Мерой термоэлектрической добротности материала является безразмерный коэффициент ZT.

$$ZT = (\alpha \cdot \sigma^2 / \lambda) \cdot T, \quad (1)$$

где Z - термоэлектрическая добротность, T - абсолютная температура,  $\alpha$  - коэффициент термоэдс,  $\sigma$  - электропроводность,  $\lambda$  - теплопроводность. Из приведенной формулы следует, что теплопроводность материала во многом определяет эффективность преобразования энергии.

Основной вид теплопроводности, на который есть возможность существенно влиять изменением технологии, не влияя на электропроводность, это фононная теплопроводность. Увеличить рассеяние фононов можно путём создания неоднородностей, формированием

новых фазовых границ или резонансных систем в материале [1-3].

В соответствии с законом Видемана-Франца коэффициент теплопроводности металлов пропорционален удельной электрической проводимости. Однако в наноразмерных гетерофазных материалах эта закономерность не выполняется. Решеточная теплопроводность в наноразмерном гетерофазном термоэлектрическом материале может быть снижена за счет рассеяния фононов на границах раздела фаз, а термоэдс в таких структурах может быть увеличена при изменении вида плотности состояний вблизи уровня Ферми или благодаря эффекту энергетической фильтрации носителей заряда [4].

В работе [5] показано, что теплопроводность композита матричного типа с монодисперсным сферическим наполнителем может быть выражена формулой

$$\frac{1}{\lambda_L} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{2R_K}{d}, \quad (2)$$



где  $\lambda_0$  – теплопроводность материала наполнителя,  $d$  – размер частиц наполнителя,  $R_K$  – тепловое сопротивление Капицы.

Из приведенной формулы следует, что эффективность снижения теплопроводности термоэлектрического материала определяется геометрическими параметрами частиц второй фазы, которая должна быть стабильной в контакте с матричным термоэлектрическим материалом и иметь размер  $d$  меньше, чем средняя длина свободного пробега фононов. В этом случае фононы будут интенсивно рассеиваться. Частицы размером больше, чем средняя длина свободного пробега фононов будут не эффективны.

Кроме того частицы должны быть равномерно распределены в объеме матрицы термоэлектрического материала и находиться на расстоянии друг от друга не более чем на порядок от величины средней длины свободного пробега фононов.

Расчёты показывают, что исходя из указанных требований, эффективное снижение теплопроводности будет обеспечиваться при размере частиц 0,01-0,05 мкм, при среднем расстоянии между частицами в пределах 0,1 – 0,5 мкм и их объёмном содержании не более 5 - 10 %.

Входящая в приведенную формулу собственная теплопроводность частиц  $\lambda_0$  не играет существенной роли. Так в работе [6] показано, что при наполнении диэлектрической матрицы многостенными углеродными нанотрубками, которые обладают высокой электропроводностью и теплопроводностью с концентрацией до 0,5 % электропроводность получаемого композита возрастает на 7 порядков, в то время как теплопроводность возрастает не более чем на 3 %, а при наполнении одностенными углеродными нанотрубками теплопроводность даже понижается (одностенные углеродные нанотрубки имели меньший размер  $d$ ). Объясняется данное явление тепловым сопротивлением Капицы  $R_K$ , оцениваемое для углеродных нанотрубок значением  $8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$  и практически мало зависящем от природы матрицы при условии отсутствия химического взаимодействия между частицами и матрицей.

В связи с этим в последнее время появился новый тип композиционных термоэлектрических материалов на основе халькогенидов

висмута, технология изготовления которых основана на армировании термоэлектрической матрицы наноразмерными частицами. Введение в матрицу такого термоэлектрического материала высокодисперсных наполнителей нанометрового размера преследует цель максимального повышения отношения электропроводности к теплопроводности синтезируемого композиционного материала за счёт преимущественного снижения по сравнению с подвижностью электронов теплопроводности решётки, обусловленной эффективным рассеиванием длинноволновых фононов.

Так в работе [7] предложен наноструктурный объёмный термоэлектрический материал, на основе теллурида висмута и дисперсного наполнителя. В качестве дисперсного наполнителя использованы наночастицы оксидов кремния, олова, алюминия, цинка, циркония, иттрия, фуллерены и углеродные нанотрубки. В работе [8] в качестве наполнителя термоэлектрического материала использовали высокодисперсный карбид кремния. Введение нанодисперсных наполнителей позволило повысить температуру рекристаллизации и снизить теплопроводность термоэлектрического материала с 1,5 Вт/м·К до 0,6 Вт/м·К за счёт рассеяния фононов на границах раздела фаз.

Однако, несмотря на достигнутые результаты, производство термоэлектрических композитов на основе халькогенидов висмута с различными нанодисперсными наполнителями не освоено. Основными причинами этого являются отсутствие совершенных способов изготовления. Анализ существующих способов изготовления показывает, что используемые технологии ограничены в управлении процессом формирования структуры термоэлектрического материала. Существует значительный резерв в дальнейшем повышении термоэлектрической добротности халькогенидов висмута путём разработки новых методов введения в термоэлектрическую матрицу армирующих компонентов различной природы, размера, формы и характера распределения в матричной фазе.

Эффективным методом дальнейшего повышения термоэлектрической добротности может стать синтез армирующих компонентов непосредственно в процессе изготовления термоэлектрического материала. Для реализации этого метода наиболее предпочтительными представляются химические реакции in-

situ, приводящие к образованию в матрице собственных оксидных фаз, не имеющих загрязнений на поверхности и обладающие хорошими межфазными свойствами. При этом по аналогии с дисперсно-упрочнёнными композитами повышаются твёрдость, жёсткость и жаропрочность получаемого термоэлектрического материала, что позволяет надеяться на расширение температурного диапазона его эксплуатации. В работе [9] такой подход позволил установить, что введение в состав традиционно применяемого термоэлектрического материала  $\text{Bi}_0,5\text{Sb}_1,5\text{Te}_3$  р-типа проводимости оксидного наполнителя собственного окисла с концентрацией 0,1-0,3 масс. % повышает термоэлектрическую эффективность материала до  $ZT = 1,2-1,4$ .

Целью данной работы является исследование влияния оксидного наполнителя полупроводникового материала матрицы на термоэлектрические параметры композитов с матрицей на основе твердых растворов халькогенидов висмута n-типа проводимости в интервале температур 300-600 К.

### Образцы и методика эксперимента

Образцы для исследований термоэлектрических параметров получали по стандартной керамической технологии, которая включала несколько этапов с применением холодного и горячего прессования. Применительно к стандартному термоэлектрическому материалу состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости были проведены исследования по формированию в нём оксидной фазы в количестве 0,1-0,12 масс. %. Выбор такого содержания окисла был связан с оптимальным составом оксидной фазы для термоэлектрического материала состава  $\text{Bi}_0,5\text{Sb}_1,5\text{Te}_3$  р-типа проводимости [9]. После этого образцы подвергали горячему прессованию при температуре  $T = 643 - 653$  К и давлении  $P = 500$  МПа с выдержкой в течение 10 мин. с получением брикетов размером  $34 \times 28 \times 15$  мм<sup>3</sup>. Из полученных брикетов вырезались экспериментальные образцы для исследования термоэлектрических свойств на установке АЛТЕК – 10001.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Температурные зависимости термоэлектрических свойств синтезированных образцов приведены на рис. 1-5. На рис. 1 представлены температурные зависимости термоэдс для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1) и синтезированного образца после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 % (кривая 2). Представленные на рис. 1 температурные зависимости термоэдс исследуемых образцов проходят через максимум, который смещается в область более высоких температур при проведении предварительной термической обработки холоднопрессованной заготовки. Причем после предварительной термической обработки холоднопрессованной заготовки термоэдс в области максимума возрастает.

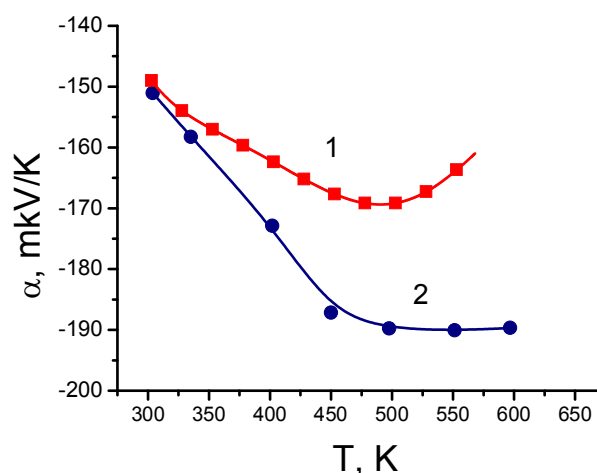


Рис. 1. Температурные зависимости термоэдс для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1), и после окисления холоднопрессованной заготовки в количестве 0,11 % (кривая 2)

Температурные зависимости электропроводности (рис. 2) экспериментальных образцов, представленных на рис. 1, носят одинаковый монотонно убывающий характер. Но их значения у образцов, полученных после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 % (кривая 2), заметно ниже, чем у образца, полученного по стандартной технологии (кривая 1).

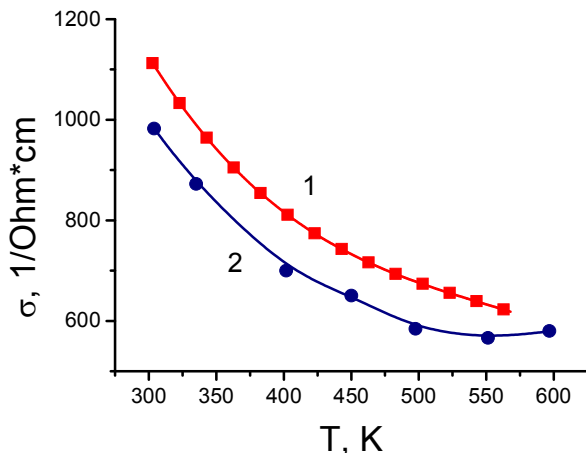


Рис. 2. Температурные зависимости электрической проводимости для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1), и после окисления холоднопрессованной заготовки в количестве 0,11 % (кривая 2)

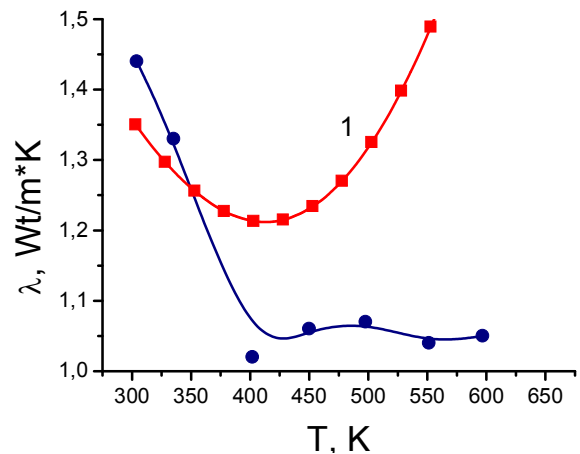


Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1), и после окисления холоднопрессованной заготовки в количестве 0,11 % (кривая 2)

Температурные зависимости теплопроводности для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1) и после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 % (кривая 2), представлены на рис. 3. Наблюдается кардинальное различие кривых теплопроводности исследованных образцов: если у образца, полученного по стандартной технологии, теплопроводность при увеличении температуры от 300 до 600 К изменяется по кривой с резким минимумом (кривая 1), то у образца, полученного после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 %, теплопроводность снижается от 1.45 Вт/(см К) до 1.05 Вт/(см К) при температуре  $T \sim 400$  К и затем медленно растет с ростом температуры (кривая 2).

Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $Z$  исследуемых образцов, рассчитанные по уравнению

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент термоэдс;  $\sigma$  - удельная электрическая электропроводность;  $\lambda$  - теплопроводность представлены на рис. 4. Если при комнатной температуре величина термоэлектрической добротности образца, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ», выше (кривая 1), то при повышении температуры для образца, полученного после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 %, ситуация меняется (кривая 2). Заметное повышение термоэлектрической добротности для образца, полученного после предварительной термической обработки, связано как с увеличением термоэдс образцов, так и с существенным значением теплопроводности вследствие рассеяния фононов на границах зерен, имеющих окисные слои.

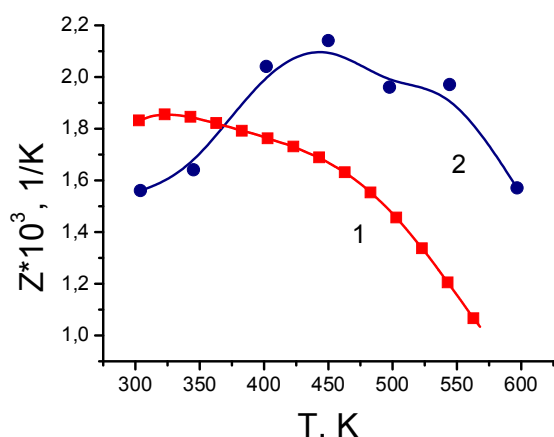


Рис. 4. Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $Z$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1), и после окисления холоднопрессованной заготовки в количестве 0,11 % (кривая 2)

Температурные зависимости безразмерного параметра  $ZT$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1) и после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 % (кривая 2), представлены на рис. 5. Данные зависимости практически повторяют данные рис. 4, однако максимум на зависимости  $ZT(T)$  смещается к более высокой температуре  $T \sim 550$  К и носит более выраженный характер по сравнению с кривой 2 рис. 4.

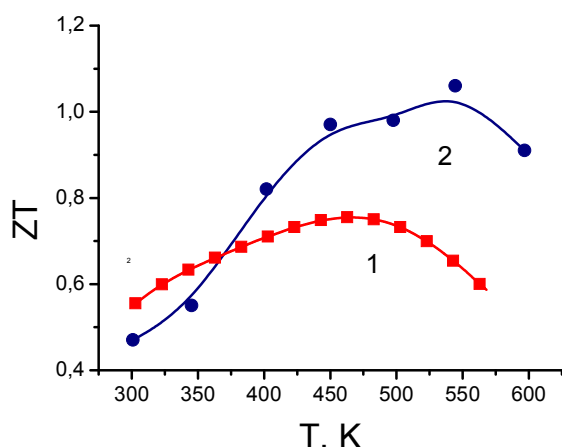


Рис. 5. Температурные зависимости термоэлектрической добротности  $ZT$  для образцов термоэлектрика состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-типа проводимости, полученного по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ» (кривая 1), и после окисления холоднопрессованной заготовки в количестве 0,11 % (кривая 2)

Обсудим полученные результаты. Для улучшения термоэлектрических свойств материалов продуктивным направлением в области увеличения термоэлектрической добротности является наноструктурирование, позволяющее квазинезависимо регулировать термоэдс, электро- и теплопроводность благодаря проявлению квантовых эффектов. В настоящее время предложено несколько физических механизмов, позволяющих улучшить термоэлектрическую добротность в объемных наноструктурных поликристаллических термоэлектриках: дополнительное фоновое рассеяние на границах нанозерен, туннелирование электронов между наноструктурными элементами, фильтрация энергии носителей заряда за счет потенциального барьера между нанозернами [10-12].

Снижение теплопроводности кристаллической решетки можно получить при введении наночастиц по границам зерен матричного материала. Такие системы отличаются большой стабильностью наноструктурного состояния из-за эффекта подавления роста зерен. Однако способ непосредственного формирования оксидных наночастиц на поверхности зерен в процессе получения нанопорошка показал очевидные преимущества перед методом добавления уже готовых оксидных наночастиц. Жао и др. формировали наночастицы оксида  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  на поверхности частиц  $\text{Yb}_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$  методом контролируемого окисления порошка  $\text{Yb}_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$  с избытком  $\text{Yb}$ . Наночастицы  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  располагались по границам и внутри гранул  $\text{Yb}_x\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ , приводя к значительному рассеянию фононов, при относительно слабом уменьшении подвижности электронов, что позволило увеличить  $ZT$  до 1,3 [13]. Сформировавшаяся на поверхности пор оксидная плёнка наноразмерной толщины на стадии горячего прессования разрушается на отдельные фрагменты, размер, форма и равномерность распределения которых в объёме матричного материала и определяет термоэлектрические характеристики получаемого композита, способствуя повышению термоэлектрической добротности.

Анализ полученных в данной работе результатов по исследованию термоэлектрических свойств показывает, что в интервале температур 300 – 500 К отношение электропроводности к теплопроводности для образцов, полученных по стандартной технологии, применяемой на «Корпорации НПО «РИФ», и после окисления холоднопрессованной заготовки со степенью окисления 0,11 %, практически не

изменилось и рост термоэлектрической добротности в последнем образце связан в основном с ростом термоэдс (кривая 2 на рис. 1). В интервале температур 500 – 600 К наблюдается повышение отношения электропроводности к теплопроводности синтезированного композиционного материала за счёт преимущественного снижения по сравнению с подвижностью электронов теплопроводности решётки, обусловленной эффективным рассеиванием длинноволновых фононов.

Таким образом, введение в термоэлектрическую матрицу окисного наполнителя позволяет сохранить отношение электропроводности к теплопроводности получаемого композиционного материала в интервале температур 300-500 К и повысить его при более высоких температурах за счёт преимущественного снижения по сравнению с подвижностью электронов теплопроводности решётки, обусловленной эффективным рассеиванием длинноволновых фононов.

### Заключение

Методом двухстадийного прессования (холодного и горячего) получены образцы термоэлектрического композиционного материала состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости с концентрацией окисдного наполнителя 0,11 %. Исследовано влияние температуры на термоэлектрические параметры (термоэдс, электрическую проводимость, коэффициент теплопроводности и термоэлектрическую добротность) синтезированных образцов в интервале температур 300-600 К.

Установлено, что введение в состав термоэлектрического материала состава  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости окисдного наполнителя с концентрацией 0,11 масс. % позволяет повы-

сить термоэлектрическую эффективность материала до  $ZT \sim 1$ .

### Литература

1. Шевельков А.В. Химические аспекты создания термоэлектрических материалов // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 1. С. 3-21.
2. Slack G.A. Thermoelectric Handbook (Ed. D.M. Rowe) // CRC Press, Boca Raton, FL., 1995.
3. Nolas G.J., Sharp J.W., Goldsmid H.J. Thermoelectric: Basics Principles and New Materials Developments // Springer-Verlag, New York, 2001.
4. Pichanusakorn P., Bandaru P. Nanostructured thermoelectric // Material Science and Engineering R. 2010. Vol. 67. P. 19-63.
5. Nan C.W., Birringer R. Determining the Kapitza resistance and the thermal conductivity of polycrystals: a simple model // Phys. Rev. 1998. Vol. 57. P. 8264–8268.
6. Evaluation and Identification of Electrical and Thermal Conduction Mechanisms in Carbon Nanotube. / F.N. Gojny, M.H.G. Wichmann, B. Fiedler et al. // Epoxy Composites. Polymer. 2006. 47. P. 2036-2045.
7. Патент США №7309830, H01L 35/26, от 18.12.2007 Nanostructured bulk thermoelectric material.
8. Патент Китая CN 1807666, C22C 1/05, C22C 29/00, B22F 29/04, от 26.07.2006.
9. Влияние наноразмерного окисдного наполнителя на свойства халькогенидов висмута p-типа проводимости / Ю.В. Панин, И.С. Ильяшев, Ю.Е. Калинин, А.А. Камынин, К.Г. Королев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 151-155.
10. A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery / R. Ovik et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. V. 64. P. 635-659.
11. Энергетическая фильтрация носителей тока в наноструктурированном материале на основе теллурида висмута / Л.П. Булат, И.А. Драбкин, В.В. Каратаев, В.Б. Освенский, Ю.Н. Пархоменко, Д.А. Пшенай-Северин, Г.И. Пивоваров, Н.Ю. Табачкова // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 1. С. 29-34.
12. Non-equilibrium processing leads to record high thermoelectric figure of merit in  $\text{PbTe-SrTe}$  / Tan G. et al. // Nature Communications, 2016. 7. 12167.
13. Synthesis of  $\text{Yb}_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}/\text{Yb}_2\text{O}_3$  composites and their thermoelectric properties / X.Y. Zhao, X. Shi, L.D. Chen et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 89. P. 092121.

Поступила 02.10.2018; принята к публикации 29.11.2018

### Информация об авторах

**Панин Юрий Васильевич** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(919)237-58-42, e-mail: yu.panin62@yandex.ru  
**Калинин Юрий Егорович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 7(473)246-66-47, e-mail: kalinin48@mail.ru

## THERMOELECTRIC MATERIAL BASED ON CHALCOGENIDES OF BISMUTH AND THE N-TYPE CONDUCTIVITY WITH NANOSCALE OXIDE PHASE

Yu.V. Panin, Yu.E. Kalinin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the paper deals with the issues of improving the thermoelectric quality factor of thermoelectric materials used in practice. A significant breakthrough in the improvement of thermoelectric Q (ZT) was made in the 1950s, thanks to the implementation of the concept of solid solutions based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, put forward by the A. F. Ioffe, which was later implemented in practice. In recent years, there has been a new breakthrough in increasing the ZT of thermoelectric materials, based on the concept of creating nanostructured thermoelectric materials. Taking into account the latest trends of thermoelectric q-factor increase, thermoelectric characteristics of the composite material based on solid solutions of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Se<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> n-type conductivity containing nanoscale oxide phase of the main semiconductor material are investigated. Samples for research were synthesized by ceramic technology with a concentration of nanoscale oxide filler 0.1-0.12 mass. %. It was found that the introduction of oxide nanoscale filler leads to an increase in the ratio of electrical conductivity to the thermal conductivity of the material and the growth of thermal e.m.f. It is shown that the thermoelectric quality factor of the obtained composites reaches a maximum value of ZT = 1 in the temperature range of 500-600 K

**Key words:** nanocomposites, thermal e.m.f., resistivity, thermal conductivity coefficient

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the project "Creation of a high-tech production of autonomous current sources based on new generation thermoelectric generator modules", implemented within the framework of the resolution no. 218 03.G25.31.0246

### References

1. Shevel'kov A.V. "Chemical aspects of designing thermoelectric materials", *Russian Chemical Review (Uspekhi khimii)*, 2008, vol. 77, no. 1, p. 3-21.
2. Slack G.A., ed. Rowe D.M. "Thermoelectric handbook", CRC Press, Boca Raton, FL., 1995.
3. Nolas G.J., Sharp J.W., Goldsmid H.J. "Thermoelectric: basics principles and new materials developments", Springer-Verlag, New York, 2001.
4. Pichanusakorn P., Bandaru P. "Nanostructured thermoelectric", *Material Science and Engineering R*, 2010, vol. 67, pp. 19-63.
5. Nan C.W., Birringer R. "Determining the Kapitza resistance and the thermal conductivity of polycrystals: a simple model", *Phys. Rev.*, 1998, vol. 57, pp. 8264-8268.
6. Gojny F.N., Wichmann M.H.G., Fiedler B. et al. "Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube", *Epoxy Composites. Polymer*, 2006, vol. 47, pp. 2036-2045.
7. Patent of the USA #7309830, "Nanostructured bulk thermoelectric material", H01L 35/26, 18.12.2007.
8. Patent of China CN 1807666, C22C 1/05, C22C 29/00, B22F 29/04, 26. 07. 2006.
9. Panin Yu.V., Il'yashev I.S., Kalinin Yu.E., Kamynin A.A., Korolev K.G. "Effect of nanosized oxide filler on the properties of bismuth chalcogenides p-type conductivity", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik voronezhskogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 6, pp. 151-155.
10. Ovik R. et al. "A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 64, pp. 635-659.
11. Bulat L.P., Drabkin I.A., Karataev V.V., Osvenskiy V.B., Parkhomenko Yu.N., Pshenay-Severin D.A., Pivovarov G.I., Tabachkova N.Yu. "Energy filtration of charge carriers in nanostructured material based on bismuth telluride", *Solid State Physics (Fizika tverdogo tela)*, 2011, vol. 53, no. 1, pp. 29-34.
12. Tan G. et al. "Non-equilibrium processing leads to record high thermoelectric figure of merit in PbTe-SrTe", *Nature Communications*, 2016, vol. 7, pp. 12167.
13. Zhao X.Y., Shi X., Chen L.D. et al. "Synthesis of Yb<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>Sb<sub>1/2</sub>/Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites and their thermoelectric properties", *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 092121.

Submitted 02.10.2018; revised 29.11.2018

### Information about the authors

**Yuriy V. Panin**, Cand. Sc. (Technical), Leading Scientist, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: threeroad@rambler.ru

**Yuriy Ye. Kalinin**, Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kalinin48@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ ПРИ ГОРЯЧЕМ ПРЕССОВАНИИ  
НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТелЛУРИДА ВИСМУТА**А.А. Гребенников<sup>1</sup>, А.И. Бочаров<sup>1</sup>, В.В. Бавыкин<sup>1</sup>, И.В. Извекова<sup>2</sup><sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия<sup>2</sup>АО «Корпорация НПО „РИФ”», г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследовано влияние режимов горячего прессования (давления прессования и времени выдержки под давлением) на термоэлектрические свойства теллурида висмута  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  n-типа проводимости, легированного каломелью  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . Образцы получены по технологии порошковой металлургии – синтез химического соединения с последующим горячим прессованием. Установлено, что изменение режимов горячего прессования незначительно влияет на коэффициент термо-ЭДС – численные значения практически совпадают при температурах больших  $200\text{ }^\circ\text{C}$  и различаются не более чем на 3% при температурах менее  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Проводимость образцов не зависит от давления прессования и времени выдержки. До температуры  $200\text{ }^\circ\text{C}$  температурные зависимости проводимости практически совпадают, при более высокой температуре различие в проводимости не превышает 5%. Изменение режима горячего прессования влияет, прежде всего, на величину теплопроводности. Причем как увеличение давления прессования, так и увеличение времени выдержки под давлением приводят к снижению теплопроводности материала. Таким образом, увеличивая давление прессования, время выдержки под давлением или одновременно оба параметра, можно увеличить термоэлектрическую добротность теллурида висмута. В исследованных образцах рост термоэлектрической добротности составил 15%

**Ключевые слова:** термоэлектричество, теллурид висмута, электропроводность, теплопроводность, термо-ЭДС

**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**

Теллурид висмута и твердые растворы на его основе широко используются в промышленности для изготовления термоэлементов р- и n-типа. Это обусловлено, прежде всего, дешевизной исходных компонент, простой технологией изготовления, не требующей дорогостоящего оборудования, хорошими термоэлектрическими свойствами, обусловленными высокой концентрацией носителей заряда (как правило  $\sim 10^{19}\text{ см}^{-3}$ ). Однако входящий в их состав теллур опасен как для работников производства, так и для окружающей среды. Попытка найти экологически чистый материал, способный заменить теллурид висмута не дала результата, поэтому внимание исследователей было сосредоточено на поиске технологий, позволяющих улучшить их термоэлектрические свойства.

На сегодняшний день наиболее перспективными являются методы искрового лазерного спекания (SPS) и спиннингования расплава (MS). Добротность (ZT) образцов теллурида висмута n-типа, получаемых этими методами, близка к 0,9 [1], а в некоторых случаях превы-

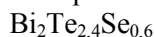
шает 1 [2]. В то же время их внедрение в производство сопряжено с рядом трудностей, наиболее значимые из которых – изменения техпроцесса и переобучение персонала. Кроме того, результаты, получаемые разными авторами на образцах SPS и MS, могут существенно отличаться (см., например, [3] и [4]), в связи с чем необходимо тщательно отработать данные методы перед внедрением в производство. Поэтому актуальной задачей является улучшение свойств теллурида висмута путем внесения небольших изменений в используемую промышленностью двухстадийную технологию изготовления. Для этого, в частности, необходимо выявить влияние режимов горячего прессования (давления прессования (p), температуры прессования (T), времени выдержки (t)) на термоэлектрические свойства теллурида висмута.

**Методика**

В качестве объектов исследования использовались образцы  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  легированные каломелью. Образцы в количестве 4 шт. были получены по двухстадийной технологии порошковой металлургии – синтез химического соединения с последующим горячим прессованием – на предприятии АО «Корпорация НПО

„РИФ“». Режимы горячего прессования каждого образца приведены в таблице, где  $T$  – температура прессования,  $p$  – давление прессования,  $t$  – время выдержки под давлением.

Режимы горячего прессования образцов



№ образца	Режим горячего прессования		
	$T$ , °C	$p$ , т/см <sup>2</sup>	$t$ , мин.
1	400	5	5
2	400	5	20
3	400	5,5	10
4	400	5,5	20

Теплопроводность образцов исследовалась на установке Netzsch LFA 467, проводимость и коэффициент термо-ЭДС – на установке Netzsch SBA 458 в интервале температур 30 – 300 °C.

### Результаты

Температурные зависимости коэффициента термо-ЭДС образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$  представлены на рис. 1. Качественно полученные зависимости одинаковы. Их внешний вид характерен для вырожденных полупроводников [5].

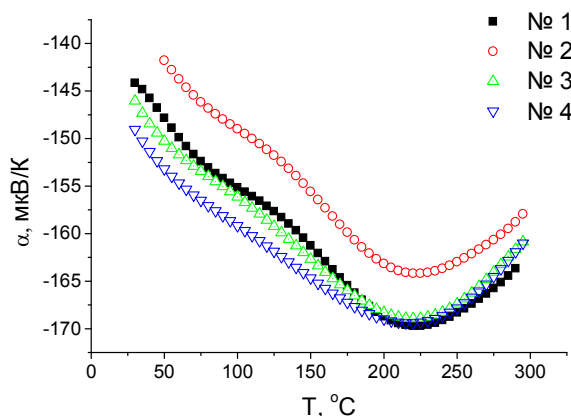


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента термо-ЭДС образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$

Отрицательные значения коэффициента термо-ЭДС означают, что основными носителями заряда являются электроны, следовательно, образцы № 1-4 представляют собой термоэлектрический материал n-типа проводимости. Рост (абсолютных значений) коэффициента термо-ЭДС при увеличении температуры связан с ростом энергии основных носителей заряда [5]. При температуре более 200 °C появляется собственная проводимость, что приводит к

уменьшению абсолютной величины коэффициента термо-ЭДС.

Численные значения коэффициента термо-ЭДС практически совпадают для образцов № 1, 3, 4 при температурах больших 200 °C и различаются не более чем на 3% при температурах менее 200 °C. Кривая  $\alpha(T)$  образца № 2 отличается от остальных меньшими (по абсолютному значению) значениями  $\alpha$ . Однако в относительном выражении разница не превышает 8%. Таким образом, изменение режимов горячего прессования незначительно влияет на коэффициент термо-ЭДС образцов теллурида висмута.

Как следует из рис. 2, температурные зависимости проводимости образцов № 1, 3, 4 практически совпадают. Проводимость образца № 2 больше, чем в № 1, 3, 4, на величину около 10%. Как известно [5], в легированных полупроводниках большие значения проводимости при меньших величинах коэффициента термо-ЭДС связаны с большей концентрацией носителей заряда.

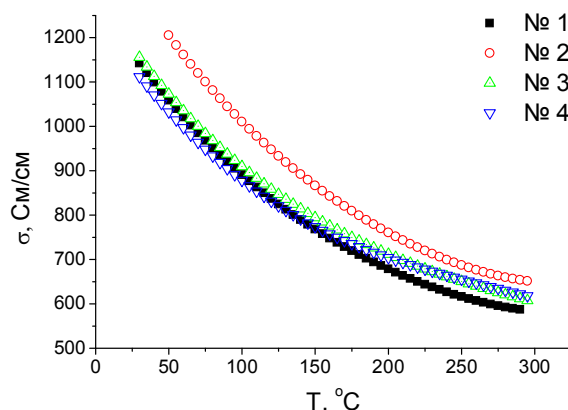


Рис. 2. Температурные зависимости удельной проводимости образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$

Для всех образцов величина проводимости убывает с ростом температуры. Такая зависимость наблюдается в полупроводниках при наличии сильного легирования [6]. В этом случае вырождение полупроводника происходит при криогенных температурах и материал начинает проявлять свойства, близкие к металлу. При этом в вырожденном полупроводнике концентрация примесей настолько велика, что собственные свойства практически не проявляются, а проявляются в основном свойства примеси.

Анализ температурной зависимости проводимости позволяет определить температурные интервалы, в которых преобладает при-



месный или собственный механизм проводимости, а также определить механизмы рассеяния носителей заряда. В легированных полупроводниках при наличии вырождения изменение величины проводимости с температурой происходит так же, как и в металле, – обратно пропорционально температуре, т.е. зависимость  $\sigma(1/T)$  линейна.

На рис. 3 приведена зависимость  $\sigma(1/T)$  для образца № 1. До температуры 145 °С (на рис. 3 обозначена пунктиром) зависимость  $\sigma(1/T)$  имеет линейный характер. В этом интервале реализуется примесная проводимость. При температурах более 145 °С наблюдается отклонение зависимости от линейной, что соответствует появлению в образце собственной проводимости. Аналогично была определена температура возникновения собственной проводимости для образцов № 2, 3, 4, которая составила 155 °С, 100 °С, 95 °С соответственно.

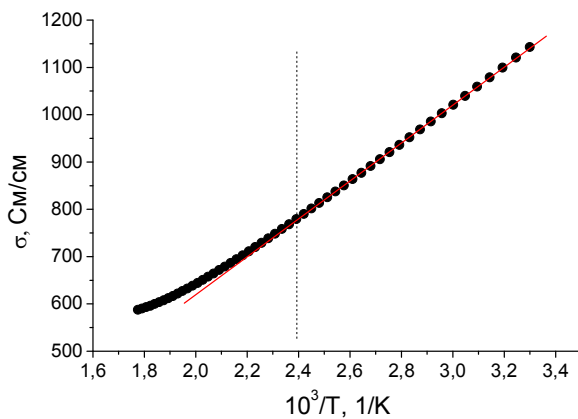


Рис. 3. Зависимость проводимости от  $1/T$  образца № 1. Пунктиром показана температура начала собственной проводимости

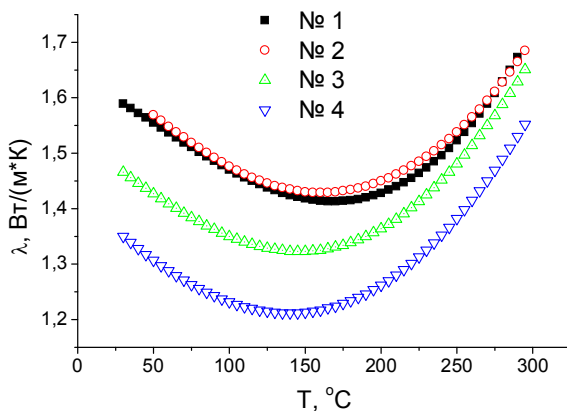


Рис. 4. Температурные зависимости теплопроводности образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$

Температурные зависимости теплопроводности образцов № 1-4 имеют вид парабол с ветвями, направленными вверх (рис. 4). Минимум теплопроводности смещается от 160 °С для образца № 1 до 130 °С для образца № 4. Уменьшение теплопроводности с ростом температуры до 100-130 °С связано с увеличением поля фононов и, как следствие, увеличением рассеяния электронов на тепловых колебаниях решетки, что также приводит к снижению проводимости образцов в рассматриваемом интервале температур (рис. 2). При температуре близкой к минимуму теплопроводности начинается влияние собственной проводимости материала. В этом случае большой вклад в теплопроводность начинает вносить биполярная диффузия электронов и дырок, заключающаяся в диффузии электронно-дырочных пар с горячего конца на холодный. Это приводит к росту теплопроводности при температурах более 160 °С.

Температурные зависимости теплопроводности образцов № 1 и 2 совпадают. Для образцов № 3 и 4 значения теплопроводности во всем исследованном интервале температур ниже, чем для № 1 и 2, при этом увеличение времени выдержки при более высоком давлении приводит к большему уменьшению  $\lambda(T)$  (образцы № 3 и 4). Учитывая, что различие в значениях электропроводности и коэффициента термо-ЭДС для исследованных образцов невелико (см. рис. 1 и 2), можно сделать вывод, что изменение режима горячего прессования влияет прежде всего на теплопроводность, причем как увеличение давления прессования, так и увеличение времени выдержки приводит к снижению теплопроводности материала.

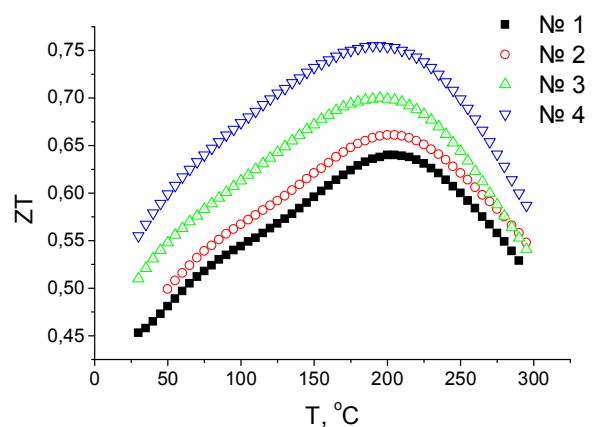


Рис. 5. Температурные зависимости термоэлектрической добротности образцов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,4}\text{Se}_{0,6}$

Различие величины теплопроводности исследованных образцов обусловило различие в термоэлектрической добротности (рис. 5). Качественно вид температурных зависимостей термоэлектрической добротности характерен для полупроводниковых материалов n-типа на основе теллурида висмута. Кривая  $ZT(T)$  имеет вид параболы с ветвями вниз. Максимум термоэлектрической добротности наблюдается при температуре около 200 °С, что соответствует температуре, при которой начинается собственная проводимость. Количественно разница между максимальной величиной  $ZT$  образца № 1 и № 4 составляет 15%, что близко к разнице между величинами теплопроводности.

### Заключение

1. Изменение давления или времени выдержки при горячем прессовании незначительно влияет на проводимость и коэффициент термо-ЭДС термоэлектрического материала n-типа  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ , легированного каломелью.

2. Как увеличение давления, так и увеличение времени выдержки при горячем прессо-

вании снижает теплопроводность термоэлектрического материала n-типа  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$ , легированного каломелью.

### Литература

1. Control of oxygen content of n-type  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  based compounds by sintering process and their thermoelectric properties / J.K. Lee, J.H. Son, S.D. Park, S. Park, M.W. Oh // *Materials Letters*. 2018. V. 230. P. 211-214.
2. Термоэлектрические свойства твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  различного гранулометрического состава / Л.Д. Иванова, Ю.В. Гранаткина, Л.И. Петрова, И.Ю. Ниhezина // *Физика и техника полупроводников*. 2017. Т. 51. Вып. 8. С. 1044-1047.
3. Enhanced thermoelectric cooling properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_{3-x}\text{Se}_x$  alloys fabricated by combining casting, milling and spark plasma sintering / S.T. Han, P. Rimal, C.H. Lee, H.S. Kim, Y. Sohn, S.J. Hong // *Intermetallics*. 2016. V. 78. P. 42-49.
4. Kim H.S., Hong S.J. Thermoelectric properties of n-type 95% $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -5% $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  compounds fabricated by gas-atomization and spark plasma sintering // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 586. P. S428-S431.
5. Стильбанс Л.С. Физика полупроводников. М.: Советское радио, 1967. 452 с.
6. Гольцман Б.М., Кудинов В.А., Смирнов И.А. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . М.: Наука, 1972. 320 с.

Поступила 08.10.2018; принята к публикации 29.11.2018

### Информация об авторах

**Гребенников Антон Александрович** – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: anton18885@yandex.ru

**Бочаров Алексей Игоревич** – ведущий инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: lekha.bocharoff@yandex.ru

**Бавыкин Владимир Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: threeroad@mail.ru

**Извекова Ирина Валентиновна** – начальник цеха, АО «Корпорация НПО „РИФ”» (394062, г. Воронеж, ул. Дорожная, 17/2), e-mail: threeroad@mail.ru

## INFLUENCE OF PRESSURE AND HOLDING TIME AT HOT PRESSING ON THERMOELECTRIC PROPERTIES OF BISMUTH TELLURID

A.A. Grebennikov<sup>1</sup>, A.I. Bocharov<sup>1</sup>, V.V. Bavykin<sup>1</sup>, I.V. Izvekova<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>“RIF Corporation”, Voronezh, Russia

**Abstract:** the influence of the hot-pressing regimes (pressure and holding time under pressure) on the thermoelectric properties of bismuth telluride  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2.4}\text{Se}_{0.6}$  n-type conduction doped with calomel  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  was investigated. Four samples were obtained at the “RIF Corporation”, using a two-stage technology that includes synthesis followed by hot pressing. It was established that a change in the hot-pressing modes has little effect on the thermo-emf coefficient – the numerical values almost coincide at the temperatures higher than 200 °С and differ by less than 3% at the temperatures less than 200 °С. The conductivity of the samples does not depend on the pressure and holding time. The temperature dependences of conductivity practically coincide up to the temperature of 200 °С; the difference in conductivity does not exceed 5% at a higher temperature. Changing the hot pressing mode affects primarily on the thermal conductivity. Both an increase in the pressure and an increase in the holding time under pressure leads to a decrease in the thermal conductivity of the material. Thus, increasing the pressure, holding time under pressure, or both parameters can increase the thermoelectric figure of merit of bismuth telluride. The growth of thermoelectric figure of merit in the investigated samples was 15%

**Key words:** thermoelectricity, bismuth telluride, electrical conductivity, thermal conductivity, thermal electromotive force

**Acknowledgments:** the work was carried out with financial support of the Ministry of education and science of the Russian Federation in accordance with the Decree of the Russian Federation Government dated 09.04.2010 no. 218 (agreement no. 03.G25.31.0246)

### References

1. Lee J.K., Son J.H., Park S.D., Park S., Oh M.W. "Control of oxygen content of n-type Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> based compounds by sintering process and their thermoelectric properties", *Materials Letters*, 2018, vol. 230, pp. 211-214.
2. Ivanova L.D., Granatkina Yu.V., Petrova L.I., Nikhezina I.Yu. "Thermoelectric properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.4</sub>Se<sub>0.6</sub> solid solutions of different particle-size composition", *Physics and techniques of Semiconductors (Fizika i tekhnika poluprovodnikov)*, 2017, vol. 51, pp. 1002-1005.
3. Han S.T., Rimal P., Lee C.H., Kim H.S., Sohn Y., Hong S.J. "Enhanced thermoelectric cooling properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3-x</sub>Se<sub>x</sub> alloys fabricated by combining casting, milling and spark plasma sintering", *Intermetallics*, 2016, vol. 78, pp. 42-49.
4. Kim H.S., Hong S.J. "Thermoelectric properties of n-type 95%Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-5%Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> compounds fabricated by gas-atomization and spark plasma sintering", *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 586, pp. S428-S431.
5. Stilbans L.S. "Semiconductor physics" ("Fizika poluprovodnikov"), Moscow, Sovetskoe Radio, 1967, 452 p.
6. Holtzman B.M., Kudinov V.A., Smirnov I.A. "Semiconductor thermoelectric materials based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>" ("Poluprovodnikovye termoelektricheskie materialy na osnove Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>"), Moscow, Nauka, 1972, 320 p.

Submitted 08.10.2018; revised 29.11.2018

### Information about the authors

**Anton A. Grebennikov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of laboratory, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: anton18885@yandex.ru

**Aleksey I. Bocharov**, Lead engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: lekha.bocharoff@yandex.ru

**Vladimir V. Bavykin**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: threeroad@mail.ru

**Irina V. Izvekova**, Machine-shop Manager, "RIF Corporation" (17/2 Dorozhnaya st., Voronezh 394062, Russia), e-mail: threeroad@mail.ru

## ДЕКРЕМЕНТ ЗАТУХАНИЯ И ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ СТРУНЫ

А.Т. Косилов, В.А. Юрьев, Р.Б. Калинин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** показана связь между уравнением внутреннего трения материала струны и собственной частотой ее колебаний, применен метод затухания колебаний струны для нахождения уровня внутреннего трения. Резонансная частота основной изгибной моды колебаний близка к резонансной частоте второй струнной моды колебаний нити, что позволяет осуществить управляемое демпфирование нити. Проведен аналитический расчет демпфирующих свойств натянутой струны с известной величиной внутреннего трения материала, из которого она изготовлена. Учитывая потери энергии в струне и не останавливаясь на каком-либо конкретном механизме диссипации энергии, можно сказать, что в целях сохранения общности рассуждений величина внутреннего трения материала струны будет характеризоваться углом сдвига фаз между напряжением и деформацией. Для решения волнового уравнения применен метод Боголюбова. При определении величины декремента затухания, пропорциональной истинному уровню внутреннего трения, следует всегда помнить, что коэффициент пропорциональности в зависимости от условий нагружения струны может изменяться в широких пределах. Поэтому применять метод затухания колебаний струны для нахождения уровня внутреннего трения следует с большой осторожностью, определяя каждый раз величину напряжения

**Ключевые слова:** внутреннее трение, сдвиг фаз, напряжение, деформация

## Введение

Механические струнные резонаторы, основанные на колебаниях натянутой струны, находят применение в разных областях науки и техники. Они позволяют контролировать раскрытие деформационных швов строительных сооружений, напряженно-деформированное состояние гидротехнических сооружений, создавать на их основе гироскопы, подвесы пробных масс интерферометрических гравитационно-волновых детекторов, механические спектрометры для анализа мод колебаний элементов конструкции приборов машиностроения. [1-3]. Одни из этих применений не требуют высокой степени добротности струнного датчика, другие, наоборот, для понижения уровня теплового шума, достижения высокой степени разрешения и повышения точности измерений необходима высокая добротность моды колебаний струны. Так, величина внутреннего трения  $1,2 \times 10^{-7}$  достигнута на макете пробной массы гравитационной антенны при использовании кварцевой нити в вакууме  $10^{-6}$  торр [1]. Спектр струнных мод колебаний нити неэквидистантный. Это предотвращает возбуждение мод колебаний высших порядков. Резонансная частота основной изгибной моды колебаний близка к резонансной частоте второй струнной моды колебаний нити, что позволяет осуществить управляемое демпфирование нити.

Объяснение столь высокого уровня добротности обычно связывают с высокой добротностью плавленого кварца, то есть материала, из которого изготовлена струна. Однако исследования внутреннего трения кварца [3] указывают на то, что эта величина не превышает  $10^{-5}$ .

## Постановка задачи

В настоящей работе проведен аналитический расчет демпфирующих свойств натянутой струны с известной величиной внутреннего трения материала, из которого она изготовлена, с целью установления однозначного соответствия между декрементом затухания струны и величиной внутреннего трения материала струны.

## Описание зависимостей

Величина внутреннего трения  $Q^{-1}$  в работах [5-8] определялась широко применяемым в практике металлофизических исследований способом нахождения логарифмического декремента затухания  $\delta$  колебаний струны:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_k}{A_{k+1}}$ ,  $A_k$  и  $A_{k+1}$  амплитуда  $k$ -го и  $k+n$ -го колебаний;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между напряжением и деформацией.

Соотношение (1) справедливо для изолированной системы, частота колебаний которой

определяется только ее упругими константами и инерциальными свойствами [9].

Частота колебаний идеальной струны, согласно формуле Рэлея-Ритца [10], определяется внешним приложенным статическим напряжением  $\sigma_0$  и не зависит от модуля упругости материала:

$$\omega_0 = \frac{\pi n}{l} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}},$$

где  $l$  – длина образца;  $\rho$  – плотность материала струны;  $n$  – номер гармоники.

В таком случае корректность формулы (1) для струны оказывается сомнительной, а известная в теории внутреннего трения взаимосвязь между дефектом модуля  $\Delta M$  материала струны и величиной внутреннего трения остается нераскрытой.

Волновое уравнение струны с учетом линейного отклонения из положения равновесия запишется в виде:

$$\rho \frac{d^2 u(\xi, t)}{dt^2} = \{\sigma_0 + \tilde{\sigma}(t)\} \frac{d^2 u(\xi, t)}{d\xi^2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала струны;

$$\tilde{\sigma}(t) = \{\tilde{\xi}(t) - \tilde{\xi}_a(t)\}M, \quad (3)$$

где  $\tilde{\xi}(t)$  – составляющая обратимой деформации;  $M$  – нерелаксированный модуль упругости струны.

Пусть в покоящейся струне после релаксации установилось напряжение  $\sigma_0$ . Отклонение ее из положения равновесия в процессе колебаний приводит к появлению упругой  $\tilde{\xi}_e(t)$  и неупругой  $\tilde{\xi}_a(t)$  составляющих обратимой деформации  $\tilde{\xi}(t)$  и соответствующего дополнительного напряжения  $\tilde{\sigma}(t)$ .

Рассмотрим более подробно составляющую  $\tilde{\sigma}(t)$ .

Для малых амплитуд колебаний можно записать:

$$\tilde{\xi}(t) = \frac{\Delta l}{l} = \int_0^l \left(\frac{du(\xi, t)}{d\xi}\right)^2 d\xi, \quad (4)$$

где  $l$  – длина струны;  $\xi$  – отклонение центра струны от положения равновесия.

То есть, полученная система уравнений (2), (4), (5) однозначно описывает поведение функции  $u(\xi, t)$ .

Частное решение уравнения (2) запишется в виде:

$$u(\xi, t) = \alpha(t) \sin \frac{\pi \xi}{l}, \quad (5)$$

где  $\alpha(t)$  – временная зависимость отклонения центра струны от положения равновесия.

Подставив (5) в уравнения (2) и (4), получим:

$$\frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha(t) = -\frac{\pi^2}{l^2} \frac{\tilde{\sigma}(t)}{\rho} \alpha(t), \quad (6)$$

$$\tilde{\xi}(t) = \frac{1}{4} \frac{\pi^2}{l^2} \alpha^2(t), \quad (7)$$

где  $\omega_0 = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{4\nu}}$

В качестве первого приближения решение уравнения (6) запишем в виде (для временной зависимости отклонения центра струны):

$$\alpha(t) = a(t) \cos \psi(t), \quad (8)$$

Тогда обратимая деформация (7) принимает вид:

$$\tilde{\xi}(t) = \frac{1}{4} \frac{\pi^2}{l^2} a^2 \cos^2 \psi \quad (9)$$

или

$$\tilde{\xi}(t) = \frac{1}{8} \frac{\pi^2}{l^2} a^2 (1 + \cos 2\psi).$$

Если учитывать потери энергии в струне и не останавливаться на каком-либо конкретном механизме диссипации энергии, то в целях сохранения общности рассуждений величина внутреннего трения материала струны будет характеризовать углом  $\varphi$  сдвига фаз между напряжением и деформацией.

Тогда напряжение  $\sigma(t)$  можно записать в виде:

$$\tilde{\sigma}(t) = \frac{1}{2} \hat{\sigma}(t) \{1 + \cos(2\psi(t) + \varphi)\} \quad (10)$$

или

$$\tilde{\sigma}(t) = \hat{\sigma}(t) \cos^2 \left(\psi + \frac{\varphi}{2}\right),$$

где  $\hat{\sigma}(t)$  – максимальное приращение напряжения за счет отклонения колеблющейся струны.

После подстановки (9) в (6) окончательно получим уравнение:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \omega_0^2 \alpha = -\mu \alpha \cos^2 \left(\psi(t) + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (11)$$

где  $\mu = \hat{\omega}^2 = \frac{\pi^2}{l^2} \frac{\hat{\sigma}}{\rho}$  – малый параметр.

### Решение уравнения колебания струны

Применяя метод Боголюбова [11] для решения уравнения (11), функции  $a(t)$  и  $\psi(t)$  в виде (9) будем искать при условии:

$$\frac{da}{dt} = \widehat{\omega}^2 A_1(a) \quad (12)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega_0 + \widehat{\omega}^2 B_1(a) \quad (13)$$

$$A_1(a) = -\frac{h_1(a)}{2\omega_0}, \quad (14)$$

$$B_1(a) = -\frac{q_1(a)}{2a\omega_0},$$

где  $q_1(a)$  и  $h_1(a)$  – коэффициенты разложения в ряд Фурье функции

$$f_0(a \cos \psi; \varphi) = a \cos \psi \cos^2 \left( \psi + \frac{\varphi}{2} \right)$$

для  $n=1$ .

Найдем  $q_1(a)$  и  $h_1(a)$ .

$$q_1(a) = -\frac{3}{4}a \left( 1 - \frac{2}{3} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)$$

и

$$h_1(a) = -a \left( -\frac{1}{4} \sin \varphi \right) = \frac{a}{4} \sin \varphi \quad (15)$$

В результате уравнения (13) и (14) преобразуются к виду:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{a \widehat{\omega}^2}{8 \omega_0} \sin \varphi \quad (16)$$

$$\frac{d\psi}{dt} \equiv \omega = \omega_0 + \frac{3 \widehat{\omega}^2}{8 \omega_0} \left( 1 - \frac{2}{3} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right) \quad (17)$$

Интегрируя уравнение (16) за период и принимая во внимание малую величину угла потерь  $\varphi$ , получим:

$$\delta \equiv \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{\pi \widehat{\sigma}}{4 \sigma_0} \sin \varphi \approx \frac{\pi \widehat{\sigma}}{4 \sigma_0} \operatorname{tg} \varphi, \quad (18)$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_0} \equiv \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{1}{4} \frac{\widehat{\sigma}}{\sigma_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \cos \varphi \right) \approx \frac{3}{8} \frac{\widehat{\sigma}}{\sigma_0} \left( 1 - \frac{1}{6} \operatorname{tg}^2 \varphi \right), \quad (19)$$

Выражение (18) с учетом (19) можно записать также в форме:

$$\delta \approx \frac{2 \Delta \omega}{3 \sigma_0} \operatorname{tg} \varphi \quad (20)$$

Формула (19) устанавливает взаимосвязь между уравнением внутреннего трения материала струны и собственной частотой ее колебаний. Говорить об однозначном соответствии между этими величинами как в линейной теории внутреннего трения для струны можно лишь при известных значениях  $\frac{\widehat{\sigma}}{\sigma_0}$ .

Как следует из формул (1) и (18), логарифмический декремент затухания струны уже не отражает с точностью до постоянного множителя  $\pi$  уровень внутреннего трения материала.

### Заключение

Зависимость от величины статического  $\sigma_0$  и амплитуды переменного  $\widehat{\sigma}$  напряжения лишает  $\frac{\delta}{\pi}$  того физического смысла, который вкладывается в понятие внутреннего трения.

Можно говорить о  $\delta$  как о величине, пропорциональной истинному уровню внутреннего трения, но при этом всегда помнить, что коэффициент пропорциональности в зависимости от условий нагружения струны может изменяться в широких пределах. Поэтому применять метод затухания колебаний струны для нахождения уровня внутреннего трения следует с большой осторожностью, определяя каждый раз величину  $\frac{\widehat{\sigma}}{\sigma_0}$  (или  $\frac{\Delta \omega}{\omega_0}$ ) и используя формулу (19) или (20) для вычислений  $\operatorname{tg} \varphi$ .

### Литература

1. Characterization and optimization of scan speed for tapping-mode atomic force microscopy / T. Sulchck, G.G. Yaralioglu, C.F. Quale, S.C. Minne // Review of Scientific Instruments. 2002. Vol. 73. № 8. P. 2928.
2. A study on resonant frequency and Q factor tunings for MEMS vibratory gyroscopes/ C. Leong, S. Seok, B. Lee et al. // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2004. Vol. 14. № II. P. 1530-1536.
3. Controlling the quality factor of a tuning-fork resonance between 9 and 300 K for scanning-probe microscopy/ G. Ctistis, E.H. Prater, S.R. Huisman et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. Vol. 44. № 37. P. 37.
4. Лунин Б.С., Торбин С.Н. О механизме внутреннего трения в поверхностном слое резонаторов из кварцевого стекла // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2000. Т. 41. № 4. С. 224–227.
5. Дмитриев А.В. Управляемое демпфирование колебаний высокочастотных механических резонаторов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. М., 2014
6. Пинс Б.Я., Андрохов В.И., Рабухин В.Б. Струнный метод измерения плотности облучаемых металлических кристаллов // Заводская лаборатория. 1969. № 6. С. 741.
7. Андрохов В.И. Механические свойства и внутреннее трение нитевидных кристаллов меди: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07. Харьков, 1970.
8. Гарбер Р.И., Рабухин В.Б., Ашанин В.С. Прочность и пластичность тонких поликристаллических нитей меди // ФТТ. 1973. Т. 35. С. 1303-1304.
9. Гарбер Р.И., Рабухин В.Б., Ашанин В.С. Нитевидные кристаллы и тонкие нити // Релаксационные явления в твердых телах: материалы 2-й Всесоюз. конф. Воронеж, 1975. С. 262.
10. Новин А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах // Атомиздат. 1975. Т. 3. № 6. С. 472.
11. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974. Т. 1. С. 248.

Поступила 26.10.2018; принята к публикации 14.11.2018

### Информация об авторах

**Косилов Александр Тимофеевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры материаловедения и физики металлов, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14).

**Юрьев Владимир Александрович** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры материаловедения и физики металлов, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-950-765-31-46, e-mail: yuryevva@gmail.com

**Калинин Роман Борисович** - аспирант кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-904-294-08-69, e-mail: 21923@mail.ru

## DAMPING DECREMENT AND INTERNAL FRICTION OF THE FILAMENT

**A.T. Kosilov, V.A. Yuriev, R.B. Kalinin**

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

**Abstract:** the connection between the equation of internal friction of the filament material and the natural frequency of its oscillations is shown; the method of damping of the string vibrations is applied to find the level of internal friction. The resonant frequency of the main bending mode of oscillations is close to the resonant frequency of the second string mode of the oscillations of the filament, which allows one to perform controlled damping of the filament. An analytical calculation of the damping properties of a tensioned filament with a known value of internal friction of the material from which it is made is carried out. Taking into account the energy losses in the filament and not limiting by any particular mechanism of energy dissipation, we can say that in order to preserve the generality of reasoning, the amount of internal friction of the filament material will characterize the phase angle between stress and strain. The Bogolyubov method is used to solve the wave equation. When determining the value of the damping factor proportional to the true level of internal friction, it should always be remembered that the coefficient of proportionality, depending on the loading conditions of the string, can vary within wide limits. Therefore, the method of damping the oscillations of the string should be applied to find the level of internal friction with great care, each time determining the voltage value

**Key words:** internal friction, phase shift, tension, deformation

### References

1. Sulchek T., Yaralioglu G.G., Quale C.F., Minne S.C. "Characterization and optimization of scan speed for tapping-mode atomic force microscopy", *Review of Scientific Instruments*, 2002, vol. 73, no. 8, p. 2928.
2. Leong C., Seok S., Lee B. et al. "A study on resonant frequency and Q factor tunings for MEMS vibratory gyroscopes", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, vol. 14, no. II, pp. 1530-1536.
3. Ctistis G., Prater E.H., Huisman S.R. et al. "Controlling the quality factor of a tuning-fork resonance between 9 and 300 K for scanning-probe microscopy", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 37, p. 37.
4. Lunin B.S., Torbin S.N. "On the mechanism of internal friction in the surface layer of quartz glass resonators", *Bulletin of Moscow University, Series 2: Chemistry (Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya)*, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 224–227.
5. Dmitriev A.V. "Controlled vibration damping of high-quality mechanical resonators: Cand. phys. math. sci. diss." ("Upravly-aemoe dempfirovaniye kolebaniy vysokodobrotnykh mekhanicheskikh rezonatorov: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk"), Moscow, 2014.
6. Pins B.Ya., Androkhov V.I., Rabukhin V.B. "Filament method for measuring the density of irradiated metal crystals", *Factory Laboratory (Zavodskaya laboratoriya)*, 1969, no.6, p. 741.
7. Androkhov V.I. "Mechanical properties and internal friction of threadlike crystals of copper: cand. phys. and math. sci. diss." ("Mekhanicheskie svoystva i vnutrennee trenie nitevidnykh kristallov medi: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk"), Kharkov, 1970.
8. Garber R.I., Rabukhin V.B., Ashanin V.S. "Strength and plasticity of thin polycrystalline copper filaments", *FTT*, 1973, vol. 15, pp. 1303-1304.
9. Garber R.I., Rabukhin V.B., Ashanin V.S. "Filamentary crystal and fine filaments", *Proc. of the 2nd All-Union Conference: Relaxation Phenomena in Solids (Relaksatsionnye yavleniya v tverdykh telakh: materialy 2-oy Vsesoyuz. konf.)*, Voronezh, 1975, p. 262.
10. Novin A., Berry B. "Relaxation phenomena in crystals", *Atomizdat*, 1975, vol. 3, no. 6, p. 472.
11. Bogolyubov N.N., Mitropoliskiy Yu.A. "Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations", Moscow, *Nauka*, 1974, vol. 1, p. 248.

Submitted 26.10.2018; revised 14.11.2018

### Information about the authors

**Aleksandr T. Kosilov**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia)

**Vladimir A. Yur'ev**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics) Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: yuryevva@gmail.com

**Roman B. Kalinin**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: 21923@mail.ru

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДА СВИНЦА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В.В. Бавыкин, Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, В.А. Юрьев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** исследовано влияние легирования серебром и углеродом на электрические свойства тонких пленок теллурида свинца PbTe, полученных методом ионно-лучевого напыления. Структура пленок характеризуется фазой PbTe с кубической решеткой типа NaCl, сильной текстурой с осью  $\langle 100 \rangle$ , перпендикулярной плоскости подложки. Легирование теллурида свинца 2,7-2,8 ат. % Ag и 9,7-11 ат. % C приводит к росту концентрации и подвижности носителей заряда по сравнению с чистыми пленками PbTe. При концентрациях Ag более 2,8 ат. % и C более 11 ат. % происходит образование двухфазных композитов PbTe-C и PbTe-Ag<sub>2</sub>Te, что приводит к уменьшению концентрации носителей заряда и их подвижности с увеличением содержания легирующего элемента. Рассчитаны максимально достигнутые в данной работе значения фактора термоэлектрической мощности для тонких пленок PbTe - C и PbTe - Ag, которые составили 0,768 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup> и 1 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup> для образцов с 11 ат. % C и 3 ат. % Ag соответственно, что вдвое больше значения, полученного для чистых пленок PbTe при тех же условиях напыления (0,584 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup>)

**Ключевые слова:** теллурид свинца, электросопротивление, тонкие пленки, термоэдс, эффект Холла

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Создание высокотехнологичного производства автономных источников тока на основе термоэлектрических генераторных модулей нового поколения», реализуемого в рамках постановления № 218 03.G25.31.0246

### Введение

Теллурид свинца – перспективный термоэлектрический материал для применения в термоэлектрических генераторах электроэнергии в области средних температур (500 – 750 К) [1, 2]. Ширина запрещенной зоны PbTe при 300 К составляет ~ 0,32 эВ, что приводит к большему значению термоэдс, чем у теллурида висмута. Эффективное использование PbTe возможно при концентрациях носителей заряда  $n \sim 2 \cdot 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , получить которые удастся путем легирования различными примесями, например, Na, K (р-типа проводимости), I, Br, Ge (n-тип проводимости). Известны соединения на основе PbTe и Ag, например, кубические четверные соединения с общими формулами  $\text{Ag}_n\text{Pb}_m\text{M}_n\text{Te}_{m+2n}$  (M = Sb, Bi) (LAST-m), обладающие как правило электронным типом проводимости и их аналог р-типа  $\text{NaPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$  (SALT-m), кристаллизующиеся по типу NaCl [3, 4]. Так, для составов  $\text{AgPb}_{10}\text{SbTe}_{12}$  и  $\text{NaPb}_{20}\text{SbTe}_{22}$  сообщается об экстремально высоких значениях ZT ~ 2 при 675 К.

Существует возможность получения ZT больше единицы в структурно разупорядоченных сплавах  $\text{AgSbTe}_2$  и GeTe, известных как TAGS (сплавов, содержащих Te, Ag, Ge, Sb) [5], однако из-за проблемы высокотемператур-

ной стабильности эти материалы пока не нашли широкого применения на практике, и только для состава  $p\text{-(GeTe)}_{0,85}(\text{AgSbTe})_{0,15}$  с ZT ~ 1,2 сообщается об успешном длительном применении в качестве генераторного материала [4, 6].

В то же время из литературных источников известно [7], что добавление более дешевого по сравнению с серебром углерода в тонкие пленки на основе теллурида висмута может приводить к существенным изменениям электрических свойств, что позволяет повысить значения добротности ZT в термоэлектрическом материале.

Исходя из этого, в данной работе было проведено сравнительное исследование влияния легирования серебром и углеродом на электрические свойства тонких пленок теллурида свинца PbTe.

### Методика эксперимента

Тонкие пленки PbTe, PbTe-C и PbTe-Ag были получены методом ионно-лучевого распыления в атмосфере аргона с давлением  $P_{\text{Ar}} = 3,6 \times 10^{-4}$  Торг керамической мишени из PbTe. Для легирования серебром и углеродом на поверхности мишени PbTe неравномерно закреплялись навески углерода и серебра, что позволило в одном цикле напыления получить набор образцов с различной концентрацией легирующего элемента. Напыление проводили



при комнатной температуре на диэлектрическую подложку из ситалла СТ-50. Толщина полученных пленок менялась от 0,4 до 1,6 мкм, измерение проводилось на интерферометре МИИ-4.

Химический состав образцов контролировали с помощью энергодисперсионной приставки INCA X-MAX (Oxford Instruments) к растровому электронному микроскопу CARL ZEISS EVO MA 10. Структуру исследовали методами дифракции рентгеновских лучей на дифрактометре Bruker D2 Phaser с применением программы Bruker DIFFRAC EVA 3.0.

Зависимость термоэдс образцов была получена измерением каждого образца при комнатной температуре методом горячего зонда. Материалом холодного и горячего зондов служила серебряная проволока чистотой 99,99 %.

Зависимости удельного электрического сопротивления были измерены двухзондовым методом на постоянном токе при помощи универсального цифрового мультиметра В7-78/1. Относительная погрешность измерения электрического сопротивления не превышала 2 %, а термоэдс - не более 3 %.

Измерение эффекта Холла методом Ван дер Пау проводили на установке ЕСОPIA 5500 базового научно-образовательного центра ВГТУ «Физика и техника термоэлектрических явлений».

### Результаты эксперимента

Рентгеноструктурный фазовый анализ тонких пленок PbTe, PbTe-C и PbTe-Ag показал, что все образцы характеризуются фазой PbTe, обладающей кубической решеткой типа NaCl, при этом все образцы обладают сильной текстурой с осью <100>, перпендикулярной плоскости подложки (рис. 1). Других кристаллических фаз обнаружено не было.

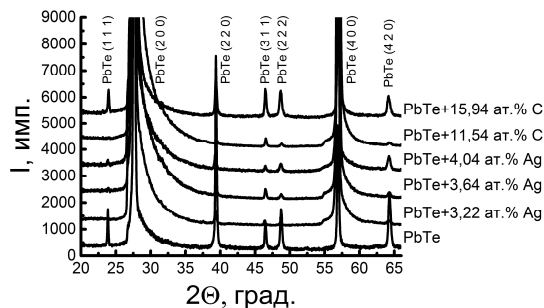


Рис. 1. Картины дифракции рентгеновских лучей ( $\lambda_{CuK\alpha} = 1,54 \text{ \AA}$ ) от тонких пленок PbTe-C и PbTe-Ag

Для изучения влияния серебра и углерода на электрические свойства тонких пленок PbTe-Ag и PbTe-C были исследованы концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления и термоэдс полученных образцов (рис. 2). Из графика концентрационной зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) (рис. 2а) видно, что  $\rho$  тонких пленок PbTe-C в изученном диапазоне концентраций углерода изменяется немонотонно и достигает минимума при  $\sim 11$  ат. % C. При концентрациях углерода более 11 ат. % C наблюдается возрастание удельного электросопротивления почти на порядок величины по отношению к значению, измеренному для тонкой пленки чистого PbTe, полученной при аналогичных условиях напыления.

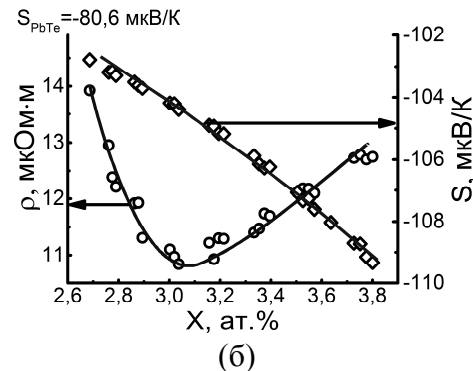
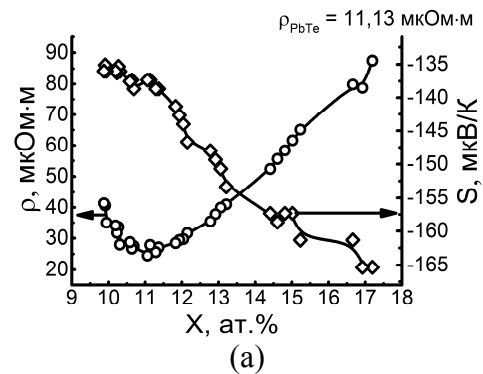


Рис. 2. Зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и термоэдс ( $S$ ) тонких пленок PbTe-C от содержания углерода (а) и тонких пленок PbTe-Ag от содержания серебра (б)

Для определения типа доминирующих носителей заряда и уточнения особенностей их переноса в тонких пленках PbTe-C была исследована зависимость термоэдс ( $S$ ) от содержания углерода (рис. 2а). Отрицательный знак  $S$  свидетельствует об электронном типе проводимости для всех изученных образцов. С увеличением содержания углерода значения термоэдс

возрастают практически линейно.

Для образцов PbTe-Ag концентрационная зависимость удельного электросопротивления (рис. 2б) имеет схожий с PbTe-C вид и имеет минимум в 11,03 мкОм·м при 2,8 ат. % Ag. Дальнейшее увеличение содержания Ag в образцах приводит к увеличению электросопротивления до 13,57 мкОм·м, при 3,8 ат. % Ag.

Знак термоэдс (рис. 2б) тонких пленок PbTe-Ag так же, как и для пленок PbTe-C, имеет отрицательный знак, а значения увеличиваются с увеличением содержанием Ag в образцах до 109 мкВ/К при 3,8 ат. % Ag. Концентрационная зависимость термоэдс для тонких пленок PbTe-Ag практически линейна (как и в случае тонких пленок PbTe-C), что одновременно с ростом удельного электрического сопротивления может свидетельствовать о таких изменениях, как уменьшение концентрации свободных носителей или их подвижности по причине дополнительного рассеяния на атомах примеси.

Для выяснения справедливости высказанного предположения для тонких пленок PbTe-C и PbTe-Ag также были проведены измерения эффекта Холла методом Ван дер Пау, с последующим расчетом зависимостей концентрации (n) и подвижности (μ) носителей заряда от содержания легирующего элемента (рис. 3).

Коэффициент Холла для всех изученных образцов имел отрицательный знак, что согласуется с результатами измерения термоэдс и подтверждает доминирующий вклад электронов в электрическую проводимость. Концентрация носителей заряда при увеличении содержания углерода в образцах изменяется с максимумом в  $12 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при содержании углерода 11 ат. % (рис. 3а). Зависимость подвижности носителей заряда также немонотонна, при добавлении углерода подвижность растет до максимального значения  $62,4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 11,5 ат. % углерода, а затем спадает до значения  $42 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 15,9 ат. % углерода.

Зависимости концентрации и подвижности носителей заряда тонких пленок PbTe-Ag (рис. 3б) от содержания Ag так же, как и зависимости тонких пленок PbTe-C, имеют максимумы при 2,9 ат. % и 3,3 ат. % Ag соответственно.

### Обсуждение полученных результатов

Анализ концентрационных зависимостей удельного электросопротивления, термоэдс, концентрации и подвижности носителей заряда

для тонких пленок PbTe-C и PbTe-Ag выявил ряд особенностей, характерных для обеих систем, что свидетельствует об одинаковой физической природе влияния этих примесей на электрические свойства тонких пленок PbTe.

Из зависимостей концентрации свободных носителей заряда (рис. 3) следует, что добавление легирующего элемента до определенного содержания (11 ат. % C и 2,9 ат. % Ag) приводит к увеличению концентрации электронов. Одновременно с этим растут также значения их подвижности.

Из литературных источников известно, что Ag в PbTe является как донорной, так и акцепторной примесью. Отличительной чертой легирования теллурида свинца серебром является крайне малое значение предельной растворимости (менее 0,003 ат. %). При концентрации Ag до 0,003 ат. % серебро является акцепторной примесью, увеличение содержания серебра более 0,003 ат. % приводит к донорной проводимости, а при очень высоких концентрация Ag – к выделению фазы  $\text{Ag}_2\text{Te}$  [9].

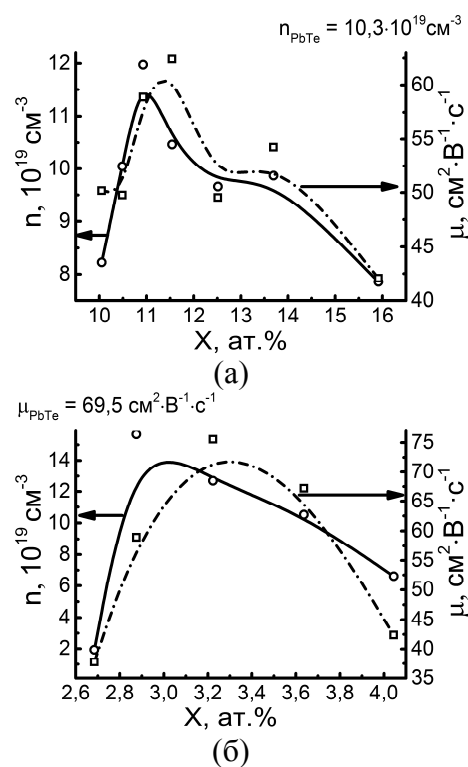


Рис. 3. Зависимости подвижности (μ) и концентрации (n) носителей заряда (электронов) в тонких пленках PbTe-C от содержания углерода (а) и в тонких пленках PbTe-Ag от содержания серебра (б)

Причина донорного воздействия Ag заключается в том, что при сильном легировании

PbTe атомами Ag образуется нейтральный димерный дефект (Ag-Ag) в позициях Pb [9]. В результате PbTe вокруг дефекта обогащается Pb, что приводит к образованию вакансий теллура, выступающих в роли доноров.

Соединение PbTe относится к полупроводникам типа  $A^{IV}B^{VI}$  и углерод как элемент IV группы периодической таблицы должен выступать в роли изовалентной примеси. К сожалению, в литературе отсутствуют какие-либо данные по легированию углеродом PbTe или твердых растворов на его основе, однако известно, что растворимость С в Pb ничтожно мала и изменяется от  $7 \cdot 10^{-20}$  до  $8 \cdot 10^{-5}$  в интервале температур 327,5 – 1740 °С [10]. Вероятно, в неравновесных условиях ионно-лучевого напыления, углерод так же, как и серебро, занимает положения атомов Pb, приводя к увеличению концентрации вакансий теллура, что так же, как и в случае легирования Ag, приводит к росту концентрации носителей заряда. Увеличение подвижности носителей заряда при указанных концентрациях легирующей примеси (менее 11 ат. % С и 2,9 ат. % Ag), вероятно, связано с изменениями фононного спектра в полученных тонких пленках из-за рассеяния последних на дефектах кристаллической решетки и нановключениях.

Добавление легирующего элемента в количествах выше 11 ат. % С для тонких пленок PbTe-С и 3 ат. % Ag для тонких пленок PbTe-Ag приводит к уменьшению концентрации электронов и их подвижности, что может быть связано с образованием двухфазных систем PbTe –  $Ag_2Te$  [9] и PbTe-С. Отсутствие на рентгеновской дифрактограмме (рис. 1) пиков от углерода может объясняться тем, что при ионно-лучевом напылении углерод имеет аморфную структуру [8], а отсутствие рефлексов от содержащих серебро фаз обусловлено тем, что включения фазы  $Ag_2Te$ , вероятно, находятся в мелкодисперсном состоянии с размером частиц порядка нескольких нанометров [3, 4] и, следовательно, являются рентгеноаморфными.

В результате образования двухфазных систем электрическое сопротивление тонких пленок растет, а термоэдс падает (рис. 2).

Таким образом, добавление легирующей примеси в процессе напыления тонких пленок PbTe-С и PbTe-Ag при малых содержаниях Ag и С приводит к легированию PbTe путем управления количеством вакансий теллура, выступающих в роли донорной примеси, а при больших концентрациях Ag и С происходит

образование двухфазных композитов PbTe-С и PbTe-Ag. При этом точки экстремумов на зависимостях концентрации носителей заряда и их подвижности приблизительно соответствуют переходу к проводимости по фазе аморфного углерода и фазе  $Ag_2Te$ .

Для оценки влияния легирующей примеси на термоэлектрические свойства тонких пленок PbTe-С и PbTe-Ag из значений удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и термоэдс ( $S$ ) были рассчитаны значения фактора термоэлектрической мощности  $P=S^2/\rho$  (рис. 4).

Из полученных зависимостей видно, что при комнатной температуре для тонких пленок PbTe-С наибольшее значение фактора термоэлектрической мощности  $0,768 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$  достигается при 11 ат. % С. Для тонких пленок PbTe-Ag увеличение содержания серебра приводит к росту фактора мощности до значения  $P = 1 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$  при 3 ат. % Ag, затем  $P$  незначительно снижается при увеличении доли серебра более 3,2 ат. %.

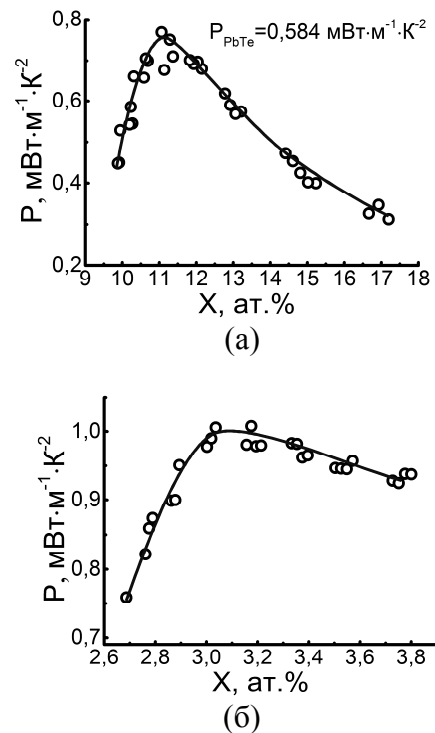


Рис. 4. Зависимости фактора мощности тонких пленок PbTe-С от содержания углерода (а) и тонких пленок PbTe-Ag от содержания серебра (б)

Следует отметить, что полученные значения фактора термоэлектрической мощности почти в два раза выше величины, полученной для чистых пленок PbTe ( $0,584 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$ ), что может свидетельствовать о перспективно-

сти легирования тонких пленок PbTe не только серебром, но также и более дешевым углеродом.

### Заключение

1. Методом ионно-лучевого распыления синтезированы тонкие пленки PbTe, PbTe-C и PbTe-Ag.

2. Методом дифракции рентгеновских лучей исследована структура синтезированных тонких пленок PbTe-C и PbTe-Ag. Для всех изученных образцов анализ дифрактограмм показал наличие единственной фазы PbTe, обладающей кубической решеткой типа NaCl.

3. Установлено, что максимумы на зависимостях концентрации носителей заряда и их подвижности приблизительно соответствуют проводимости по сеткам аморфного углерода и фазе Ag<sub>2</sub>Te.

4. Значения фактора мощности тонких пленок PbTe-C и PbTe-Ag достигают максимальных значений в 0,768 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup> и 1 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup>, что больше значения, полученного для чистых пленок PbTe (0,584 мВт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-2</sup>).

### Литература

1. Rowe D.M. Thermoelectric handbook: macro to nano // New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 954 p.
2. Карчевский А.И. Термоэлектрические материалы и преобразователи. М.: МИР, 1964. 352 с.
3. Cubic AgPb<sub>m</sub>SbTe<sub>2-m</sub>: bulk thermoelectric materials with high figure of merit / K.F. Hsu, S. Loo, F. Gao, W. Chen, J.S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E.K. Polychroniadis, M. Kanatzidis // Science. 2004. V. 303. P. 818.
4. New and old concepts in thermoelectric materials / J.R. Sootsman, D.Y. Chung, M.G. Kanatzidis // Angewandte Chemie-International Edition. 2009. V. 48. P. 8616-8639.
5. Bulusu A., Walker D.G. Review of electronic transport models for thermoelectric materials // Superlattices and Microstructures. 2008. N. 44. P. 1-36.
6. Wood C. Materials for thermoelectric energy conversion // Rep. Prog. Phys. 1988. V. 51. P. 459-539.
7. Влияние термообработки на структуру и термоэлектрические свойства тонких пленок Sb<sub>0,9</sub>Bi<sub>1,1</sub>Te<sub>2,9</sub>Se<sub>0,1</sub> и композитов на их основе / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 1. С. 23-29.
8. Электрические свойства тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого напыления / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 11. С. 1722-1728.
9. Ryu B., Oh M.-W., Lee J. K. Defects responsible for abnormal n-type conductivity in Ag-excess doped PbTe thermoelectrics // Journal Of Applied Physics. 2015. V. 118. P. 015705.
10. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник в 3 томах. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 996 с.

Поступила 27.10. 2018; принята к публикации 29.11.2018

### Информация об авторах

**Бавыкин Владимир Владимирович** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +8(919)237-58-42, e-mail: threeroad@rambler.ru

**Калинин Юрий Егорович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-66-47, e-mail: kalinin48@mail.ru

**Макагонов Владимир Анатольевич** – канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vlad\_makagonov@mail.ru

**Панков Сергей Юрьевич** – инженер-исследователь научно-исследовательского сектора кафедры «Физика твердого тела», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(952)554-12-00, e-mail: srgrank@mail.ru

**Юрьев Владислав Александрович** – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +8(910)281-52-96, e-mail: vladislav-al1003@rambler.ru

## THERMOELECTRIC PROPERTIES PbTe THIN FILMS PREPARED BY ION-BEAM SPUTTERING

V.V. Bavykin, Yu.E. Kalinin, V.A. Makagonov, S.Yu. Pankov, V.A. Yur'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the effect of silver and carbon doping on the electrical properties of PbTe thin films, prepared by ion-beam sputtering was studied. The structure of the films is characterized by a PbTe phase with a cubic lattice of the NaCl type, with a strong texture with an axis <100> perpendicular to the substrate plane. It was established that doping of 2,7-2,8 at. % Ag and 9,7-11 at. % C leads to increasing of the charge carriers concentration and mobility of PbTe thin films. At concentrations more than 2,8 at. % for Ag and 11 at. % for C the formation of two-phase composites PbTe-C and PbTe-Ag<sub>2</sub>Te occurs and it leads to decrease in carriers' concentration and mobility with increasing in content of the doping element. The maximum values of the thermoelectric power fac-

tor for thin PbTe-C and PbTe-Ag films obtained in this investigation were  $0,768 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$  and  $1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ , respectively. This is twice as high as value for pure PbTe films prepared at the same sputtering conditions ( $0,584 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ )

**Key words:** lead telluride, resistivity, thin films, thermos emf, Hall effect

**Acknowledgements:** work was carried out with the financial support of the project "Creation of high technology production of Autonomous sources of electricity based on the thermoelectric generator modules of the new generation", implemented in the framework of the resolution no. 218 03.G25.31.0246

### References

1. Rowe D.M. "Thermoelectric handbook: macro to nano", New York, Taylor& Francis Group, LLC, 2006, 954 p.
2. Karchevsky A.I. "Thermoelectric Materials and Converters" ("Termoelektricheskie materialy i preobrazovateli"), Moscow, Mir, 1964, 352 p.
3. Hsu K.F., Loo S., Gao F., Chen W., Dyck J.S., Uher C., Hogan T., Polychroniadis E.K., Kanatzidis M. "Cubic  $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2-m}$ : bulk thermoelectric materials with high figure of merit", *Science*, 2004, vol.303, pp. 818.
4. Sootsman J. R., Chung D. Y., Kanatzidis M. G. "New and old concepts in thermoelectric materials", *Angewandte Chemie-International Edition*, 2009, vol. 48, pp. 8616-8639.
5. Bulusu A., Walker D.G. "Review of electronic transport models for thermoelectric materials", *Superlattices and Microstructures*, 2008, no. 44, pp. 1-36.
6. Wood C. "Materials for thermoelectric energy conversion", *Rep. Prog. Phys.*, 1988, vol. 51, pp. 459-539.
7. Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Makagonov V.A., Pankov S.Yu., Sitnikov A.V. "Effect of heat treatment on the structure and the thermoelectric properties of  $\text{Sb}_{0,9}\text{Bi}_{1,1}\text{Te}_{2,9}\text{Se}_{0,1}$  thin films and composites based on them", *Physics of The Solid State (Fizika tverdogo tela)*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 21-27.
8. Kalinin Yu.E., Kashirin M.A., Makagonov V.A., Pankov S.Yu., Sitnikov A.V. "Electrical properties of thin films of amorphous carbon obtained by ion-beam deposition", *Journal of Technical Physics (Zhurnal tekhnicheskoy fiziki)*, 2017, vol. 62, no. 11, pp. 1724-1730.
9. Ryu B., Oh M.-W., Lee J. K. "Defects responsible for abnormal n-type conductivity in Ag-excess doped PbTe thermoelectrics", *Journal Of Applied Physics*, 2015, vol. 118, pp. 015705.
10. Lyakishev N.P. "Diagrams of the states of double metallic systems: reference book" ("Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih sistem: spravochnik v 3 tomakh."), Moscow, Mashinostroenie, 1997, Book 1, vol. 3, 996 p.

Submitted 27.10.2018; revised 29.11.2018

### Information about the authors

**Vladimir V. Bavykin**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: threeroad@rambler.ru

**Yuriy E. Kalinin**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kalinin48@mail.ru

**Vladimir A. Makagonov**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Junior Researcher, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vlad\_makagonov@mail.ru

**Sergey Yu. Pankov**, engineer-researcher, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: srgpank@mail.ru

**Vladislav A. Yur'ev**, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: threeroad@rambler.ru

## МОДУЛЬ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТ С КАСКАДОМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

А.В. Сергеев<sup>1</sup>, И.М. Голев<sup>2</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:** предложена конструкция преобразователя частот на основе высокотемпературного сверхпроводника системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O. В качестве охлаждающего устройства предлагается к использованию микрокриогенная система, работающая по обратному циклу Стирлинга. Описано устройство микрокриогенной системы. Такая система способна обеспечивать термостабилизацию объекта на температурном уровне  $T=80\pm 120\text{K}$  с точностью  $\pm 0,5\text{K}$ , что является недостаточным для преобразователя частот на основе Bi-ВТСП. Для повышения точности термостабилизации и снижения инерционности системы, в конструкции применяется термоэлектрический холодильный модуль. Дополнительная стабилизация температуры преобразователя частот обеспечивается термоэлектрическим холодильным модулем, работа которого основана на эффекте Пельтье. В качестве материалов для термоэлектрического холодильного модуля, работающего при криогенных температурах, предлагается использовать для п-ветви сплав Bi-Sb, для р-ветви –  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . По оценкам, в предлагаемой конструкции термоэлектрический холодильный модуль способен обеспечивать термостабилизацию объекта на уровне  $0,05\text{K}$ . Описаны конструкция и принцип работы преобразователя частот. В работе обоснована возможность применения сверхпроводящих материалов на основе висмута в качестве нелинейного преобразователя. Описана технология получения материалов методом твердофазного синтеза. Приведены прекурсоры для конечного материала. Показаны результаты исследования микроструктуры и результаты рентгеноструктурного анализа

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, термоэлектрический холодильный модуль, преобразователь частот, микрокриогенная система, нелинейная среда, микроструктура

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 (договор № 03.G25.31.0246)

### Введение

Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в радиотехнических устройствах, системах связи, вычислительной и измерительной технике позволяет создавать приборы с уникальными параметрами [1-4]. Это обусловлено тем, что в сверхпроводящем состоянии проявляются макроскопические квантовые эффекты, где характерные особенности квантовой механики непосредственно проявляются в поведении макроскопических объектов. Для сверхпроводников характерны следующие эффекты: Мейснера, Джозефсона, квантование магнитного потока. Использование подобных эффектов в устройствах слаботочной электроники позволяет создавать устройства с предельно возможными параметрами. Так, использование явления «нулевого электрического сопротивления» для тока, протекающего в объеме сверхпроводника (по величине меньше критического), и эффекта Мейснера позволяет создавать измерительные

устройства без дрейфа нуля и с минимальными внутренними электрическими шумами. Например, сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД), работа которого основана на эффекте Джозефсона, имеет рекордно высокую чувствительность: по магнитному полю до  $10^{-18}$  Тл энергетическое разрешение  $5 \cdot 10^{-33}$  Дж/Гц, по напряжению  $10^{-13}$  В/ $\sqrt{\text{Гц}}$  [5-7]. Еще одной важной особенностью ВТСП-материалов является то, что при определенных внешних условиях (температура  $T$ , магнитное поле  $B$  и транспортный ток  $J$ ) сверхпроводники являются нелинейными средами, где их проводимость  $\sigma$  зависит от внешних воздействий

$$\sigma = f(T^n, B^m, J^k), \quad (1)$$

где  $n$ ,  $m$ ,  $k$  – коэффициенты, определяемые экспериментально. В работах [8-9] показано, что нелинейные электрические и магнитные свойства определяются в основном микроструктурой ВТСП-материала. На основе ВТСП системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O возможно создавать

слаботочные криогенные устройства с заданной величиной нелинейности.

### Схема устройства

На рис. 1 приведена принципиальная схема преобразователя частот на основе ВТСП системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O, охлаждение которого до рабочей температуры обеспечивается микрокриогенной системой [10], а стабилизация температуры обеспечивается термоэлектрическим холодильным модулем (ТХМ), работа которого основана на эффекте Пельтье.

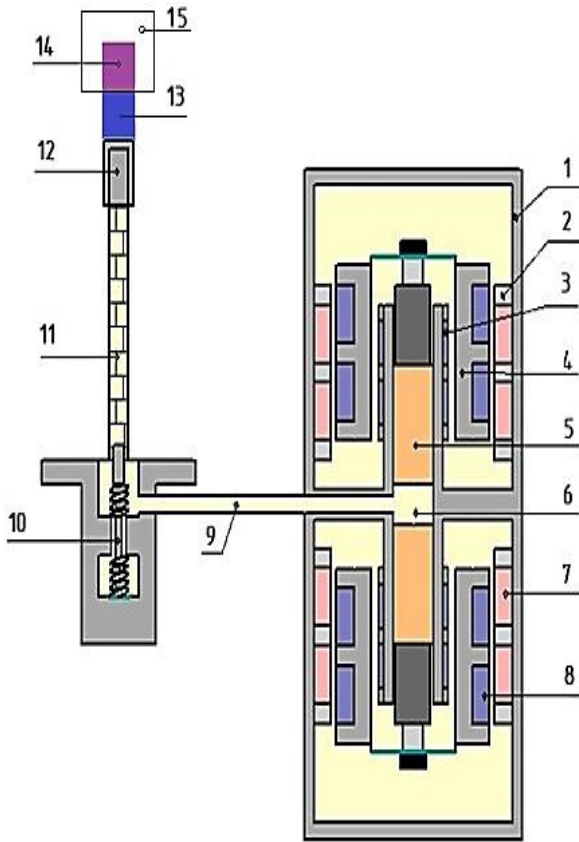


Рис. 1. Схема устройства:

- 1 – корпус; 2 – статор; 3 – датчик перемещения; 4 – якорь;
- 5 – поршень; 6 – полость сжатия; 7 – катушка;
- 8 – подвижный магнит; 9 – трубка; 10 – шток;
- 11 – вытеснитель; 12 – головка гильзы;
- 13 – термоэлектрический холодильный модуль;
- 14 – преобразователь частот на основе высокотемпературного сверхпроводника;
- 15 – термостабилизируемый объем

Микрокриогенная система (МКС) работает по обратному циклу Стирлинга [11]. В качестве криоагента используется гелий высокой чистоты. МКС состоит из оппозитного компрессорного агрегата и охладителя. Компрессорный

агрегат имеет два линейных электродвигателя постоянного тока, обеспечивающих синхронное перемещение поршней в цилиндре. Каждый из электродвигателей в свою очередь состоит из статора, катушек и якоря с подвижными магнитами.

Движение якорей обеспечивается электронным блоком управления компрессорного агрегата на основе данных с датчиков перемещения. Поддержание температуры на заданном уровне обеспечивается на основе данных с датчика температуры, установленного на головке гильзы (на рисунке не показан). Технические характеристики МКС могут зависеть от объемной подачи компрессорного агрегата, диаметра/длины вытеснителя, рабочей температуры головки гильзы. Такая система способна обеспечивать термостабилизацию объекта на температурном уровне  $T=80 \div 120$  К с точностью  $\pm 0,5$  К, что является недостаточным для преобразователя частот на основе Bi-ВТСП. Для повышения точности термостабилизации и снижения инерционности системы в конструкции применяется ТХМ.

Горячий спай ТХМ устанавливается на охлаждаемую головку гильзы МКС, а холодный спай на термостатируемый объект – преобразователь частот на основе Bi-ВТСП. В качестве материалов для ТХМ, работающих при криогенных температурах, используются для р-ветви сплав Bi-Sb [12-13], для p-ветви –  $Bi_2Te_3$  [14]. По оценкам, при таком режиме работы ТХМ обеспечивает термостабилизацию объекта на уровне 0,05 К.

Преобразователь частот на основе высокотемпературного сверхпроводника предназначен для переноса спектра сигнала из одной частотной области в другую. В предлагаемом устройстве диапазон частот первого и второго не превышает  $10^4$  Гц. При протекании тока через первую катушку возбуждения (рис. 2)

$$i_1(t) = I_1 \cos(\omega_1 t), \quad (2)$$

и соответственно через вторую катушку

$$i_2(t) = I_2 \cos(\omega_2 t), \quad (3)$$

в объеме сверхпроводника индуцируются токи с частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

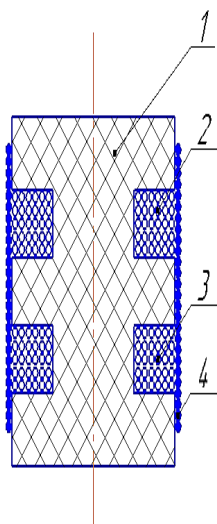


Рис. 2. Преобразователь частот на основе высокотемпературного сверхпроводника: 1 – высокотемпературный сверхпроводник; 2 – катушка 1; 3 – катушка 2; 4 – катушка 3

Так как проводимость сверхпроводника является нелинейной, то в результате нелинейных процессов образуются комбинационные частоты ( $k\omega_1 \pm l\omega_2$ ). Из экспериментов следует, что наибольшие амплитуды имели нечетные гармоники сигналов [8-9] (рис. 3). Наибольшими по амплитуде являются комбинационные составляющие не этих гармоник, а сигналы с частотами  $(2\omega_1 + \omega_2)$  и  $(\omega_1 + 2\omega_2)$ . Амплитуды этих сигналов превышали все остальные комбинационные частоты более чем на 30 дБ. Коэффициент преобразования не менее 0,2. Преобразователь обладает большим динамическим диапазоном до 78дБ.

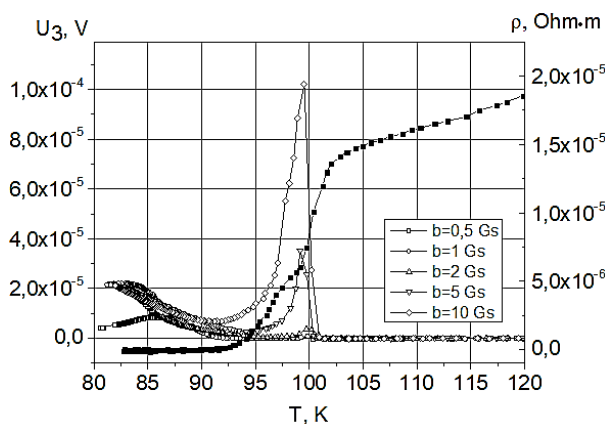


Рис. 3. Температурная зависимость третьей гармоники сигнала отклика сверхпроводника системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O

### Сверхпроводящий материал на основе висмута

В качестве нелинейной среды для преобразователя частот перспективен к применению высокотемпературный сверхпроводник системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O с фазовым составом Bi-2223 (53% по массе) и Bi-2212 (47% по массе). Материал такого состава был получен методом твердофазного синтеза. В качестве прекурсоров были  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , PbO, CuO,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$  марки ЧДА.

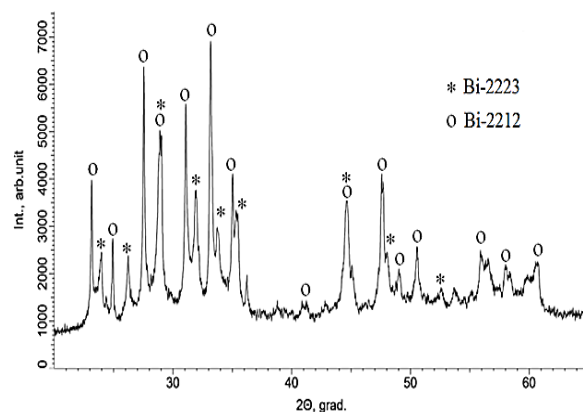


Рис. 4. Рентгенограмма сверхпроводника системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O

Предварительно просушенные прекурсоры измельчались и смешивались в стехиометрическом соотношении, затем полученная шихта засыпалась в прессформу и прессовалась, после производилась операция синтеза в муфельной печи в течение 20 часов в среде воздуха при температуре 700 °С.

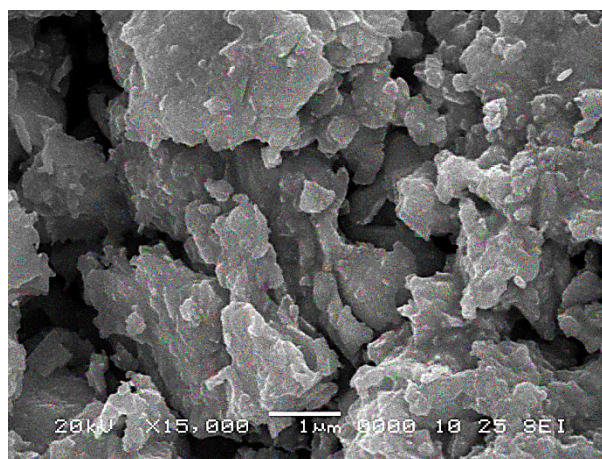


Рис. 5. Микроструктура сверхпроводника системы Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O



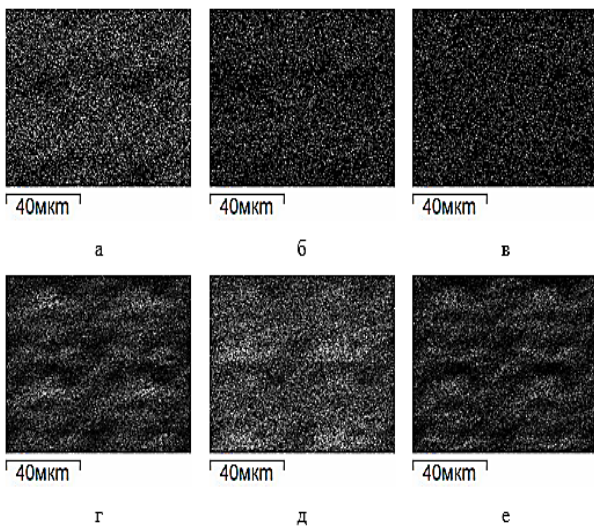


Рис. 6. Карта распределения элементов Bi, Pb, Sr, Ca, Cu в области исследования для полученного сверхпроводника: а – распределение Bi; б – распределение Pb; в – распределение Sr; г – распределение Ca; д – распределение Cu; е – распределение O

Образовавшийся твердый спек охлаждался со скоростью 100 град/ч до комнатной температуры, после чего повторно механически измельчался, прессовался и отжигался в течение 60 часов в воздушной среде при температуре 845 °С. Далее следовал процесс охлаждения со скоростью 100 град/ч до комнатной температуры и отжиг в течение 120 часов в воздушной атмосфере при температуре 855 °С, после чего материал охлаждался с печи. Плотность полученного материала составила  $\rho=4,1 \text{ г/см}^3$ , ширина сверхпроводящего перехода  $\Delta T > 5 \text{ К}$ , значение критического тока при температуре жидкого азота  $J_k \approx 33 \text{ кА/м}^2$ . На рис. 4 приведена рентгенограмма сверхпроводника, а на рис. 5 фотография микроструктуры. Также были проведены исследования распределения элементов (картирование) в объеме образца (рис. 6). Анализируя результаты картирования, можно отметить равномерное распределение элементов.

### Заключение

Очевидно, что стабильность преобразователя определяется точностью поддержания рабочей температуры. При стабильности температуры  $\pm 0,05 \text{ К}$  дрейф выходного напряжения не превышает 2 мкВ.

В заключение следует отметить, что в настоящее время существует широкий класс сверхпроводников, обладающих уникальными

электрофизическими свойствами и работающих в диапазоне температур 77-120 К. С другой стороны, в настоящее время для охлаждения стали доступны микрокриогенные системы. Совокупность этих факторов открывает большие возможности внедрения сверхпроводящих устройств в технические системы, работающие при комнатных температурах.

### Литература

1. Катков А.С., Герасименко В.В. Состояние и тенденции развития эталонов на эффекте Джозефсона // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 49-52.
2. Эффект Джозефсона в s/f-контактах с неоднородным s/f-интерфейсом / М.Ю. Куприянов, Н.Г. Пугач, М.М. Хапаев и др. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 2. С. 165-168.
3. Катков А.С. Перспективы использования эффекта Джозефсона в области измерений переменного напряжения // Приборы. 2011. № 11 (137). С. 26-29.
4. Назаренкова А.А. Высокотемпературная сверхпроводимость и её значимость в повседневной жизни // Теория и практика современной науки. 2018. № 1 (31). С. 367-370.
5. Высокочувствительный градиентометр на базе трех сквид-магнитометров из высокотемпературных сверхпроводников / Е.В. Бурмистров, Ю.В. Масленников, В.Ю. Слободчиков и др. // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 9. С. 1140-1146.
6. Великанов Д.А. Сквид-магнитометр для исследования магнитных свойств материалов в интервале температур 4,2-370 К // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 2 (48). С. 176-181.
7. Сверхвысокочувствительная детектирующая система сквид – магнестриктор / А.И. Головашкин, Л.Н. Жерихина, А.М. Цховребов, Г.Н. Измайлов // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 12. С. 1140-1146.
8. Specifics of Third-Harmonic Generation in Bi–Sr–Ca–Cu–O Superconductors in the Region of Superconducting Transition Temperatures / I.M. Golev, A. V. Sergeev, V. G. Kadmenskiy, and O.V. Kalyadin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. Vol. 80. № 9. pp. 1077–1079.
9. Golev I.M., Sergeev A.V., Kalyadin O.V. Nonlinear Properties of Multiphase High-Temperature Superconductors of the Bi–Sr–Ca–Cu–O System in the Temperature Range of the Superconducting Transition // Physics of the Solid State. 2017. Vol. 59. № 1. pp. 16–20.
10. Липин М.В., Громов А.В. Результаты разработки ряда модульных МКС Сплит – Стирлинг для криостатирования ФПУ 1-го и 2-го поколений // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 110 – 119.
11. Архаров И.А., Навасардян Е.С., Антонов Е.А. Моделирование работы микрокриогенной машины, работающей по обратному циклу Стирлинга // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014. № 6 (99). С. 107-115.
12. Максимум в зависимости диффузионной термо-ЭДС от магнитного поля для полупроводниковых сплавов N-Bi-Sb / В.Д. Каган, Н.А. Редько, Н.А. Родионов, В.И.

Польшин // Физика твердого тела. 2000. Т. 42. № 8. С. 1376-1383.

13 Анатычук Л.И., Вихор Л.Н. Пределы термоэлектрического охлаждения для фотоприемников // Термоэлектричество. 2013. № 5. С. 62-68.

14. Грабов В.М., Бочегов В.И., Парахин А.С. Расчет термоэлектрических параметров материалов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  р-типа // Термоэлектрики и их применения: сб. докл. XV Межгосударственной конф. 2017. С. 64-71.

Поступила 27.10.2018; принята к публикации 29.11.2018

#### Информация об авторах

**Сергеев Александр Викторович** – канд. физ.-мат. наук, инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4417-1480

**Голев Игорь Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: imgolev@gmail.com

### MODULE OF SUPER-CONDUCTING FREQUENCY CONVERTER WITH CASCADE OF THERMOELECTRIC COOLER

A.V. Sergeev<sup>1</sup>, I.M. Golev<sup>2</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 design of a frequency converter based on a high-temperature superconductor of the Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O system was proposed. As a cooling device, it was proposed to use a microcryogenic system operating on the reverse Stirling cycle. The device of the microcryogenic system was described. Such a system is able to provide thermal stabilization of an object at the temperature level of  $T = 80 \div 120\text{K}$  with the accuracy of  $\pm 0.5\text{ K}$ , which is insufficient for a frequency converter based on Bi-HTSC. To improve the accuracy of thermal stabilization and reduce the inertia of the system, a thermoelectric refrigeration module was used in the design. Additional stabilization of the temperature of the frequency converter was provided by a thermoelectric refrigeration module, which is based on the Peltier effect. As materials for a thermoelectric refrigeration module operating at cryogenic temperatures, it was proposed to use Bi-Sb alloy for the n-branch and  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  - for the p-branch. According to estimates, the thermoelectric refrigeration module in the proposed design is capable of providing the object with thermal stabilization at the level of 0.05 K. The design and operation principle of the frequency converter was described. The paper substantiates the possibility of using bismuth-based superconducting materials as a nonlinear converter. The technology of obtaining materials by the method of solid-phase synthesis was described. The precursors for the final material are given. The results of microstructure research and the results of X-ray structural analysis are shown

**Key words:** high-temperature superconductor, thermoelectric refrigeration module, frequency converter, microcryogenic system, nonlinear medium, microstructure

**Acknowledgments:** the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the Decree of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010 no. 218 (agreement no. 03.G25.31.0246)

#### References

1. Katkov A.S., Gerasimenko V.V. “The state and development trends of standards on the Josephson effect”, *Measuring equipment (Izmeritel'naya tekhnika)*, 2016, no. 8, pp. 49-52.
2. Kupriyanov M.Yu., Pugach., N.G., Khapaev M.M. et al. “Josephson effect in sifs-contacts with inhomogeneous s/f interface”, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya)*, 2008, vol. 72, no. 2, pp. 165-168.
3. Katkov A.S. “Prospects for using the Josephson effect in the field of ac voltage measurements”, *Devices (Pribory)*, 2011, no. 11 (137), pp. 26-29.
4. Nazarenkova A.A. “High-temperature superconductivity and its importance in everyday life”, *Theory and Practice of Modern Science (Teoriya i praktika sovremennoy nauki)*, 2018, no. 1 (31), pp. 367-370.
5. Burmistrov E.V., Maslennikov Yu.V., Slobodchikov V.Yu. et al. “Highly sensitive gradiometer based on three SQUID magnetometers from high-temperature superconductors”, *Radio Engineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*, 2010, vol. 55, no. 9, pp. 1140-1146.
6. Velikanov D.A. “Squid magnetometer for studying the magnetic properties of materials in the temperature range 4.2-370 K”, *Bulletin of Academician M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva)*, 2013, no. 2(48), pp. 176-181.

7. Golovashkin A.I., Zherikhina L.N., Tskhovrebov A.M., Izmaylov G.N. "Ultra-high-sensitivity detection system squid – magnetostrictor", *Quantum Electronics (Kvantovaya elektronika)*, 2012, vol. 42, no. 12, pp. 1140-1146.
8. Golev I.M., Sergeev A.V., Kadmenskiy V.G., Kalyadin O.V. "Superconductors in the region of superconducting transition temperatures", *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2016, vol. 80, no. 9, pp. 1077-1079.
9. Golev I.M., Sergeev A.V., Kalyadin O.V. "High-temperature super-conductors of the Bi-Sr-Ca-Cu-O", *Physics of the Solid State*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 16-20.
10. Lipin M.V., Gromov A.V. "The results of the development of a number of modular ISS Split - Stirling for cryostatting of FPU of the 1st and 2nd generations", *Applied Physics (Prikladnaya fizika)*, 2007, no.2, pp. 110-119.
11. Arkharov I.A., Navasardyan E.S., Antonov E.A. "Modeling of the operation of a microcryogenic machine operating on the reverse Stirling cycle", *Bulletin of the N.E. Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering (Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroyeniye)*, 2014, no. 6 (99), pp. 107-115.
12. Kagan V.D., Red'ko N.A., Rodionov N.A., Pol'shin V.I. "Maximum in the dependence of diffusion thermos emf on the magnetic field for semiconductor alloys N-Bi-Sb", *Solid State Physics (Fizika tverdogo tela)*, 2000, vol. 42, no. 8, pp. 1376-1383.
13. Anatyshuk L.I., Bohegov L.N. "Limits of thermoelectric cooling for photodetectors", *Thermoelectricity (Termoelektrichestvo)*, 2013, no. 5, pp. 62-68.
14. Grabov V.M., Bohegov V.I., Parakhin A.S. "Calculation of thermoelectric parameters of Bi-Te3 p-type materials", *Proc. of the XV Interstate Conference: Thermoelectrics and Their Applications (Termoelektriki i ikh primeneniya: sb. dokl. XV Mezhgosudarstvennoy konf.)*, 2017, pp. 64-71.

Submitted 27.10. 2018; revised 29.11.2018

#### Information about the authors

**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, ORCID: 0000-0002-4417-1480  
**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" (54 "A" Starikh Bolshevikov Street, Voronezh 394064, Russia), e-mail: imgolev@gmail.com

## СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПАКТИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОГО РАСТВОРА $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ , ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ОБРАБОТОК ПОВЕРХНОСТИ

В.А. Дыбов, Д.В. Сериков, Е.Н. Федорова, Д.А. Синецкая, П.С. Мозговой, М.С. Дякина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

**Аннотация:** эффективность термоэлектрических генераторных батарей определяется как объемными свойствами полупроводника (в первую очередь, термоэлектрической добротностью), так и контактными свойствами границы раздела полупроводник-коммутирующий слой (контактное сопротивление, адгезия). Первые зависят от способа изготовления материала, вторые – от способа обработки поверхности материала перед формированием коммутирующих слоев. Цель настоящей работы – установление закономерностей формирования структуры и фазового состава полупроводниковых материалов р-типа на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  в результате горячего прессования, а также в результате различных технологических вариантов обработки поверхности материала. Методами рентгеновской дифрактометрии (РД), сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), растровой электронной микроскопии (РЭМ) и наноиндентирования исследованы фазовый состав, структура и механические свойства (твердость, модуль упругости) образцов компактных полупроводниковых материалов р-типа проводимости на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ , полученных в процессе горячего прессования до и после разных вариантов подготовки поверхности (механическое полирование, электрохимическая полировка, импульсная фотонная обработка). Установлено, что в процессе горячего прессования в объеме полупроводникового материала на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  формируется текстура с осью зоны  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ , параллельной оси прессования; для приповерхностной области (на глубине до 200 мкм) характерна текстура с осью зоны  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ , нормальной поверхности. Механическое полирование и импульсная фотонная обработка образцов материала вызывают в нем субструктурные изменения, связанные с возрастанием доли межзеренных границ и повышением дисперсности зеренной структуры. Установлено, что механическое полирование образцов материала упрочняет приповерхностный слой толщиной до 2 мкм, фотонная обработка приводит к упрочнению более глубоких слоев материала, а электрохимическое полирование приводит к снижению величины твердости и модуля упругости

**Ключевые слова:** термоэлектричество, теллурид висмута, горячее прессование, текстура, твердость

**Благодарность:** 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

Наиболее очевидными направлениями повышения КПД термоэлектрических устройств являются разработка термоэлектрических материалов с повышенной добротностью, а также разработка новых технологий коммутации полупроводников. Развитие первого направления связано как с созданием новых материалов, так и с модификацией структуры известных материалов, в частности, с формированием анизотропной субструктуры. Развитие второго направления связано в немалой степени с модификацией рельефа поверхности полупроводников и с повышением их прочностных свойств.

Известно, что с точки зрения формирования субструктуры материалов на основе теллурида висмута целесообразно получение такой текстуры, при которой зерна ориентированы параллельно плоскостями спайности (001)  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Известно, что при расположении плоскостей спай-

ности вдоль токового направления наблюдается снижение теплопроводности и повышение электрической проводимости [1]. Иными словами, структурная анизотропия ромбоэдрической кристаллической решетки теллурида висмута позволяет реализовать анизотропию электрофизических свойств. Предельно текстурированными являются монокристаллы теллурида висмута. Приближаются к ним по термоэлектрическим свойствам образцы, полученные зонной перекристаллизацией или экструзией [2], [3]. Однако прочностные свойства таких материалов крайне низки вследствие склонности к разрушению при приложении нагрузки вдоль плоскостей спайности [4]. В этой связи целесообразным является формирование более дисперсной (микроструктурной и субмикроструктурной) субструктуры полупроводникового материала при сохранении высокой степени его текстурированности. При наличии в научной литературе публикаций, посвященных исследованию закономерностей формирования субструктуры термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута в процессе экструзии в матрицу переменного се-

чения [5], [6], [7], практически отсутствуют сведения о формировании субструктуры материала в процессе горячего прессования в матрице постоянного сечения.

Согласно требованиям к барьерной металлизации на термоэлектрических ветвях из теллурида висмута, контакты должны иметь прочность сцепления не менее  $8 \text{ Н/мм}^2$  [8]. Величина адгезии металлизации на поверхности полупроводниковых термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута зависит от субструктуры приповерхностных слоев полупроводника, а также рельефа поверхности. Так, в [9] в результате электрохимической полировки образцов твердых растворов халькогенидов висмута адгезия металлизации была повышена до  $19 \text{ Н/мм}^2$ . В работе [10] показан способ снижения шероховатости поверхности полупроводниковой ветви до 2 нм. Такая шероховатость целесообразна для термоэлементов, используемых в микроэлектронике. Напротив, в ветвях высокоомных термогенераторных батарей развитый рельеф поверхности может быть более эффективен, поскольку с увеличением площади контакта возможно повышение не только адгезии коммутационного слоя, но и добротности термоэлемента [11]. Решая задачу повышения адгезии, необходимо уделить внимание повышению механических свойств поверхностных слоев полупроводниковых ветвей. В [12], [13] было проведено исследование влияния различных способов подготовки поверхности ветвей *n*-типа проводимости на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  на адгезионную прочность барьерной металлизации на основе молибдена и никеля. Показано, что механическая полировка термоэлектрических ветвей повышает твердость приповерхностного слоя ветвей *n*-типа и повышает адгезию слоя металлизации  $\text{Mo/Ni}$  в 4 раза. Также показана эффективность импульсной фотонной обработки (ИФО) как способа модификации поверхности компактных полупроводниковых материалов на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  *n*-типа.

Поэтому цель настоящей работы – установление закономерностей формирования структуры и фазового состава полупроводниковых материалов *p*-типа на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  в результате горячего прессования, а также в результате различных технологических вариантов обработки поверхности материала.

### Методика эксперимента

Образцы полупроводниковых материалов *p*-типа проводимости на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  получали путем холодного

прессования (удельное давление прессования  $2,0 \pm 0,5 \text{ т/см}^2$ , время прессования  $7,5 \pm 2,5 \text{ с}$ ) и последующего горячего (удельное давление прессования  $5,5 \pm 0,5 \text{ т/см}^2$ , температура  $400 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , время прессования 20 мин.) изостатического прессования в вакууме ( $10^{-2} \text{ Па}$ ) порошков соответствующего состава и отжига полупроводниковых заготовок материала при  $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 24 ч. в вакууме ( $10^{-1} \text{ Па}$ ).

Способы подготовки поверхности образцов приведены в табл. 1. Для проведения исследований модифицировали поверхности образцов, параллельные оси прессования. Это связано с тем, что данные поверхности являются контактными при изготовлении термоэлектрических батарей.

Сначала все образцы подвергали механической обработке наждачной бумагой с карбидокремниевым абразивом различной зернистостью (от P2000 до P5000). После МП очистку поверхности образцов проводили в дистиллированной воде с помощью ультразвукового диспергатора УЗД-2Т.

Таблица 1  
Способы обработки поверхности образцов полупроводниковых материалов

Номер группы	Обработка
1	МП
2	МП + ИФО
3	МП + ЭХП

МП - механическое полирование;  
ИФО - импульсная фотонная обработка;  
ЭХП - электрохимическая полировка.

Часть образцов подвергали импульсной фотонной обработке (излучение ксеноновых ламп с длиной волны 0,2 - 1,2 мкм) в атмосфере  $\text{Ag}$  в следующем режиме: двукратное облучение за 0,8 с, соответствующее энергии излучения, поступающей на образец ( $E_{\text{и}}$ ),  $\sim 80 \text{ Дж/см}^2$ .

С целью удаления деформированного в результате механической обработки поверхностного слоя полупроводника часть образцов подвергали ЭХП. ЭХП проводили в электролите следующего состава:  $\text{KOH} - 90 \text{ г/л}$ ;  $\text{H}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 - 65 \text{ г/л}$ , дистиллированная вода 840 г/л [10]. В качестве катодов использовали графитовые электроды. Режимы ЭХП: время 2 мин., плотность тока  $110 \text{ мА/см}^2$ , напряжение 10 В. Для удаления продуктов реакции образцы подвергали ультразвуковой обработке в изопропиловом спирте и дистиллированной воде.

Исследование кристаллической структуры образцов проводили методом РД (Bruker D2 Phaser). Рельеф поверхности исследовали методом сканирующей зондовой микроскопии (Solver P47, NT-MDT). Твердость и модуль

упругости образцов определяли методом наноиндентирования (нанотвердомер Nano Hardness Tester, CSM Instruments) с алмазным индентором Берковича. Величина нагрузки на индентор составляла 10,0 мН и 200,0 мН. Величину твердости по Мейру и модуля упругости поверхностного слоя образцов определяли по методу Оливера и Фара (ГОСТ Р 8.748-2011).

### Результаты и обсуждение

**Фазовый состав и структура.** На рис. 1 приведены рентгеновские дифрактограммы, полученные от полупроводниковых материалов до и после различных вариантов обработки.

На дифрактограмме исходного образца (кривая 1) наблюдаются отражения, соответствующие решетке  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ . Относительно высокая интенсивность отражений (006) и (0 0 15)  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  указывает на наличие преимущественной текстуры с осью зоны <001>. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) плоскостями (015)  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  составляет около 75 нм. Также на дифрактограмме наблюдаются отражения, соответствующие гексагональной решетке Te. Присутствие отражений от Te может быть обусловлено массопереносом Te в результате сублимации и последующей его конденсации на поверхность образцов в процессе термического отжига в вакууме.

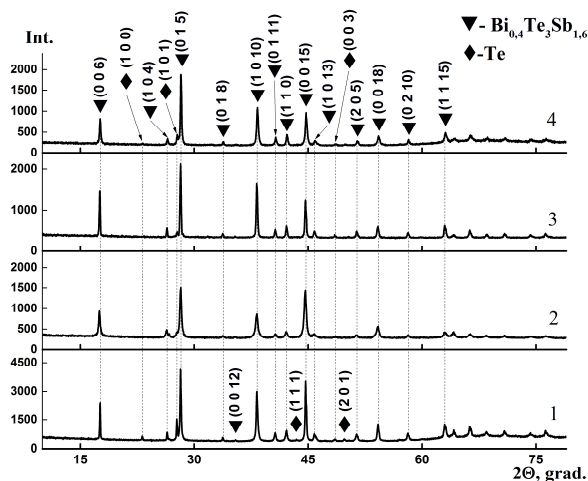


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов полупроводниковых материалов на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ - $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (p-тип) до (кривая 1) и после МП (кривая 2), МП +ЭХП (кривая 3) и МП +ИФО (кривая 4)

Как видно из рис. 1, для образцов, прошедших МП поверхности, наблюдается уширение дифракционных пиков и уменьшение интенсивности пика (006). Данные изменения свидетельствуют о том, что в приповерхностном слое

происходит уменьшение размера зерен (размер ОКР плоскостями (015)  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  составил около 40 нм) и появление зерен произвольной ориентации. Уширению дифракционных максимумов также могут способствовать напряжения, возникающие в приповерхностных слоях в результате их деформации.

На дифрактограммах образцов после МП с последующей ЭХП наблюдаются отражения, соответствующие только решетке  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ . Отсутствие пиков, соответствующих решетке Te, свидетельствует об удалении с поверхности включений данной фазы в указанных процессах. Сужение пиков, соответствующих решетке  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  (размер ОКР для отражения (015)  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  составил около 85 нм), свидетельствует об удалении с поверхности высокодисперсного наклепанного слоя.

На дифрактограммах образцов, прошедших МП с последующей ИФО, наблюдается незначительное уменьшение ширины пиков (размер ОКР для отражения (015)  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  составил около 55 нм) и появление пиков, соответствующих кристаллической решетке Te. Рост зерен  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$  связан с процессами рекристаллизации, происходящими на поверхности образцов (при ИФО на поверхности образцов создается температура ~800 К). Выделение фазы Te в приповерхностной области полупроводникового материала при ИФО может быть связано с пересыщением твердого раствора при нагреве по теллуру, выделением его по границам зерен и «заморозкой» такой гетероструктуры при относительно быстром охлаждении.

**Структура.** На рис. 2 представлено РЭМ-изображение поверхности поперечного скола образца полупроводникового материала после горячего прессования и последующего изотермического отжига. Как видно на рисунке, в объеме образца на расстоянии от поверхности, параллельной оси прессования, не менее 100 мкм (область А) наблюдается относительно упорядоченная структура, сформированная плоскостями спайности, нормальными оси прессования. Ориентация неоднородностей соответствует экструзии материала в процессе прессования. По данным РЭМ в приповерхностном слое толщиной до 100 мкм в процессе прессования сформирована характерная неупорядоченная структура (С), представленная плоскостями спайности с изломами. На расстоянии 100-200 мкм от поверхности (рис. 2 область В) наблюдается слой, представленный преимущественно плоскостями спайности, параллельными оси прессования. Наличие такого слоя коррелирует с данными РД, свидетельствующими о повышении степени тек-

стирования поверхностного слоя материала вдоль оси  $\langle 001 \rangle$ , нормальной поверхности, в результате ЭХП, приводящего к полному или частичному удалению слоя С.

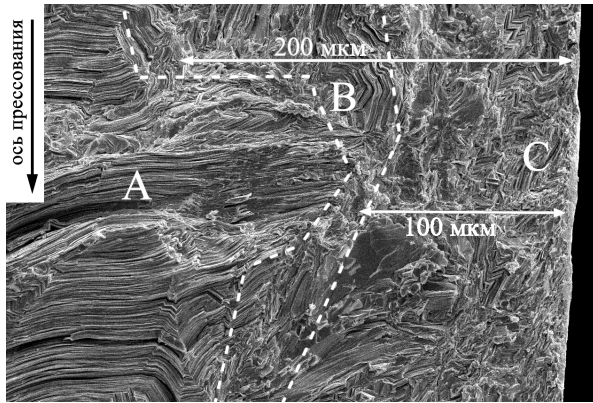


Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности поперечного скола образца полупроводникового материала, полученного в процессе горячего прессования

Формирование в процессе горячего прессования таких областей, как В и С может быть связано с пластическим течением материала вдоль поверхности пресс-формы.

**Рельеф поверхности.** На рис. 3 приведены СЗМ сканы и гистограммы распределения высоты для исходных образцов и образцов, прошедших различные варианты обработки. Результаты сканирования приведены в табл. 2.

По данным СЗМ, исходная поверхность образцов представлена неоднородностями размером до 1 мкм в латеральном направлении и до 0,5 мкм по высоте. Рельеф поверхности может быть обусловлен конденсацией Те в процессе отжига образцов либо пластической деформацией (экструзией) в пресс-форме, когда изменение геометрии и размеров кристаллитов влечет изменение структуры и шероховатости поверхности. Кроме того, рельеф поверхности образцов может наследовать неровности (шероховатость) пресс-формы.

На СЗМ скане (рис. 3в) поверхности образцов, подвергнутых ЭХП, выявлены протяженные углубления с перепадом высоты до 0,5 мкм. При этом характер выступов и углублений непрямолинейный, характерный для электрохимического травления, отличающегося селективной скоростью по поверхности образца. Следы механической полировки отсутствуют. Асимметрия гистограммы распределения высоты рельефа указывает на преобладание протяженных выступов над другими неоднородностями поверхности.

В результате МП поверхность образцов имеет неоднородный рельеф (см. рис. 3б), пе-

репад высоты не превышает 0,4 мкм. Асимметрия гистограммы указывает на доминирование впадин над выступами, следовательно, полировка привела к исчезновению элементов рельефа в виде выступов над поверхностью материала. Артефактами механической полировки являются царапины, а также частицы субмикронного размера на поверхности образцов.

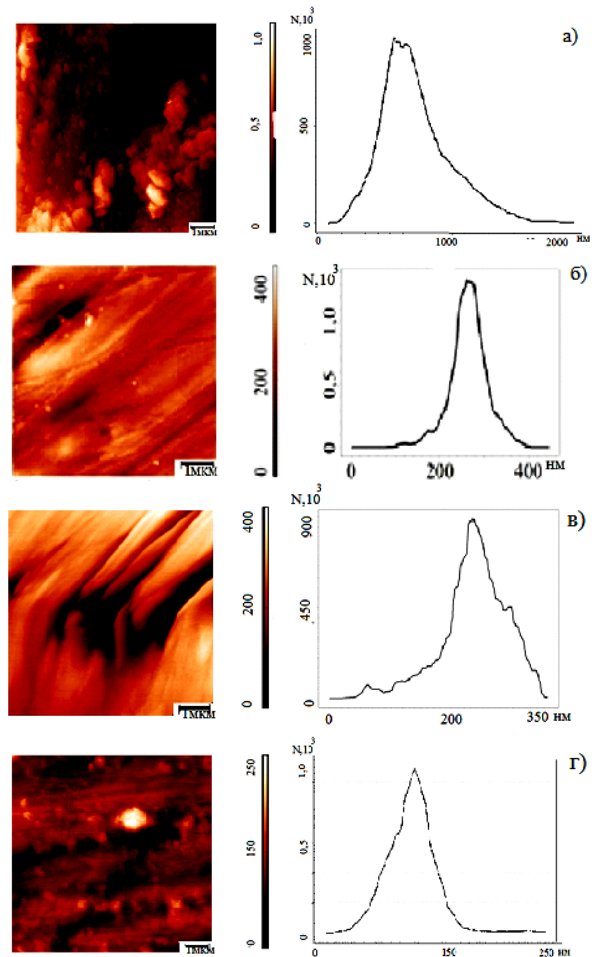


Рис. 3. СЗМ сканы и гистограммы распределения высоты поверхности исходных полупроводниковых образцов (а), изготовленных горячим прессованием, и поверхности образцов, подготовленных МП (б), МП + ЭХП (в) и МП + ИФО (г)

Таблица 2

Параметры рельефа поверхности полупроводниковых образцов, параллельной оси прессования, до и после обработок

Способ обработки поверхности	Перепад высоты, нм	Шероховатость на площади 0,01мм <sup>2</sup> , нм
Исходный образец	1400	120
МП	450	35
МП + ЭХП	400	30
МП + ИФО	150	25

В результате ИФО механически полированных образцов (рис. 3г) происходит формирование рельефа, содержащего дефекты в виде неоднородностей сферической формы, возможная природа появления которых – рекристаллизация кристаллитов в приповерхностном слое и конденсация теллура в процессе ИФО.

**Механические свойства.** В табл. 3 приведены твердость (Н) и модуль упругости (Е) поверхностного слоя образцов полупроводниковых материалов, прошедших различные виды обработки.

Известно, что твердость высокодисперсных покрытий из твердых растворов на основе теллурида висмута до 2,5 раз выше твердости монокристаллов соответствующего состава [14]. Модуль упругости в компактном  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с одноосной текстурой  $\langle 001 \rangle$  минимален вдоль направления  $[001]$  и составляет около 32 ГПа; а в нетекстурованном  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с высокодисперсной зеренной структурой (размер зерен менее 0,2 мкм) модуль упругости составляет около 48 ГПа [15].

Таблица 3

Твердость и модуль упругости поверхностного слоя образцов полупроводниковых материалов после различных способов обработки

F, мН	10		200	
	H, ГПа	E, ГПа	H, ГПа	E, ГПа
Без обработки	1,3	33,5	1,0	31,2
МП	1,5	36,8	0,8	29,7
МП + ЭХП	1,0	28,6	0,7	25,9
МП + ИФО	1,1	31,8	1,0	29,2

Как следует из табл. 3, после механической полировки наблюдается возрастание твердости и модуля упругости поверхностного слоя образцов (до 2 мкм по результатам анализа глубины проникновения индентора) при индентировании с нагрузкой 10 мН и их снижение при нагрузке 200 мН (глубина проникновения индентора 3-4 мкм) по сравнению с немодифицированным образцом. Полученный результат можно объяснить удалением в результате МП сформированного в процессе прессования «нарушенного» слоя в приповерхностной области исходных образцов и формированием относительно тонкого (1-2 мкм) слоя с дисперсной зеренной структурой. При нагрузке на индентор, равной 200 мН, вклад в величины Н и Е вносят внутренние слои с крупнозеренной структурой, что объясняет

снижение прочностных характеристик по сравнению с исходным образцом.

ЭХП приводит к удалению деформированного приповерхностного слоя, поэтому наблюдаемые при обеих нагрузках величины Н и Е отражают упругие свойства слоев образца, состоящих из микрочастиц с плоскостями спайности, параллельными поверхности (области А и В на РЭМ-изображении).

ИФО механически полированных образцов приводит к рекристаллизации и формированию приповерхностных слоев с произвольной ориентацией зерен относительно большей толщины по сравнению с глубиной проникновения индентора. Следствием этого являются близкие для обеих нагрузок индентирования величины Н. При этом при нагрузке на индентор 200 мН величина Н выше по сравнению с образцами, обработанными МП и МП с последующей ХП.

## Выводы

В процессе горячего прессования в объеме полупроводникового материала на основе твердого раствора  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  формируется текстура с осью зоны  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ , параллельной оси прессования; для приповерхностной области (на глубине до 200 мкм) характерна текстура с осью зоны  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ , нормальной поверхности.

Механическое полирование и импульсная фотонная обработка образцов материала вызывают в нем субструктурные изменения, связанные с возрастанием доли межзеренных границ и повышением дисперсности зеренной структуры.

Механическое полирование образцов материала упрочняет приповерхностный слой толщиной до 2 мкм, фотонная обработка приводит к упрочнению более глубоких слоев материала, а электрохимическое полирование приводит к снижению величины твердости и модуля упругости.

## Литература

1. Влияние условий выращивания слитков твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$  на анизотропию физических свойств / В.Т. Бублик, А.И. Воронин, Е.А. Выговская, В.Ф. Пономарев, Н.Ю. Табачкова, О.В. Торопова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2010. № 1. С. 58-62.
2. Texture and thermoelectric properties of hot-extruded  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  compound / S. Miura, Y. Sato, K. Fukuda, K. Nishimura, K. Ikeda // Materials Science and Engineering A. 2000. V. 277. I.1-2. P. 244-249.
3. Thermoelectric Properties of n-type Bismuth Telluride Based Alloys Prepared by Hot Pressing and Zone Melting Method / H.P. Ha, Y.J. Oh, D.B. Hyun, E.P. Yoon // Inter-



national Journal of the Society of Materials Engineering for Resources. 2002. V. 10. I. 2. P. 130-134.

4. Kim S.S., Aizawa T. Crystallographic Anisotropy Control of n-type Bi-Te-Se Thermoelectric Materials via Bulk Mechanical Alloying and Shear Extrusion // Materials Transaction. 2004. V. 45. № 3. P. 918-924.

5. Extrusion Behavior and Thermoelectric Properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>2.85</sub>Se<sub>0.15</sub> Thermoelectric Materials / Z.-L. Wang, K. Matsuoka, T. Araki, T. Akao, T. Onda, Z.-C. Chen // Procedia Engineering. 2014. V. 81. P. 616-621.

6. Формирование структуры в процессе горячей экструзии стержней термоэлектрических твердых растворов на основе халькогенидов висмута / В.Т. Бублик, В.В. Каратаев, В.Б. Освенский, Ю. Табачкова // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2009. № 2. С. 49-52.

7. Простомолотов А.И., Везуб Н.А. Динамическое моделирование пластического формования термоэлектрического материала методом горячей экструзии // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 818-821.

8. Shtern Yu.I., Shtern M.Yu., Sherchenkov A.A. // Russ. Microelectron. 2012. 393 с.

9. Technology and Investigation of Ohmic Contacts to Thermoelectric Materials / Y.I. Shtern, R.E. Mironov, M.Y. Shtern, A.A. Sherchenkov, M.S. Rogachev // Acta physica polonica A. 2016. V.129. № 4. P.785-787.

10. Studies on surface preparation and smoothness of nanostructured Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-based alloys by electrochemical and mechanical methods / H.-P. Feng, B. Yu, Sh. Chen, K. Col-

lins, C. He, Z.F. Ren, G. Chen // Electrochimica Acta. 2011. V. 56. P. 3079-3084.

11. Effect of contact surface condition on the adhesion strength of interconnect layers of thermoelements based on extruded bismuth telluride. Journal of Thermoelectricity / A.V. Simkin, A.V. Biryukov, N.I. Repnikov, O.N. Ivanov // Thermoelectric generators design methods. Siberian publishing «Nauka» of RAS. 2012. № 2. pp. 76-82.

12. Improving the adhesion properties of the switching layers on the n-type semiconductor branches of thermoelectric generator batteries / Ye.K. Belonogov, V.A. Dybov, A.V. Kostyuchenko, S.B. Kushev, D.V. Serikov, S.A. Soldatenko, E.N. Fedorov, A.V. Bugakov // VSTU Bulletin. 2017. Т. 13. № 6. С. 110-116.

13. Surface modification of thermoelectric branches based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> solid solution by the method of pulsed photon processing / E.K. Belonogov, V.A. Dybov, A.V. Kostyuchenko, S.B. Kushchev, V.N. Sanin, D.V. Serikov, S.A. Soldatenko // Condensed media and interphase boundaries. 2017. Т. 19. № 4.

14. Nanomechanical properties of Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thin films by nanoindentation / C.-H. Tasi, Y.-C. Tseng, S.-R. Jian, Y.-Y. Liao, C.-M. Lin, P.-F. Yang, D.-L. Chen, H.-J. Chen, C.-W. Luo, J.-Y. Juang // Journal of Alloys and Compounds. 2015. V. 619. P. 834-838.

15. Santamaria J.A., Alkorta J., Sevillano J.G. Micro-compression tests of single-crystalline and ultrafine grain Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> thermoelectric material // J. Mater. Res. 2015. V. 30. № 17. P. 2593-2604.

Поступила 15.10.2018; принята к публикации 22.11.2018

#### Информация об авторах

**Дыбов Владислав Анатольевич** – аспирант, младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)2467633, e-mail: dybovvlad@gmail.com

**Сериков Дмитрий Владимирович** – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)2467633, e-mail: dmitriy.tut@mail.ru

**Федорова Елена Николаевна** – младший научный сотрудник, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)2467633, e-mail: en-fedorova@mail.ru

**Синецкая Дарья Алексеевна** – аспирант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), тел. + 7(951) 870-8345, e-mail: da\_sine@mail.ru

**Мозговой Павел Сергеевич** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (980) 342-42-98, e-mail: pasha.mozgovoi989@mail.ru

**Дякина Мария Сергеевна** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (920) 4576345, e-mail: radost2017@yandex.ru

### STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPACTED SEMICONDUCTORS ON THE BASIS OF Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> SOLID SOLUTION, OBTAINED IN THE PROCESS OF HOT PRESSING AND FURTHER SURFACE TREATMENT

V.A. Dybov, D.V. Serikov, E.N. Fedorova, D.A. Sinetskaya, P.S. Mozgovoy, M.S. Dyakina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

**Abstract:** the efficiency of thermoelectric generator batteries is determined by both the bulk properties of a semiconductor (first of all, thermoelectric Q factor) and the contact properties of the semiconductor-switching layer interface (contact resistance, adhesion). The first depend on the method of manufacturing the material, the second - on the method of processing the surface of the material before the formation of the switch layers. The purpose of this work is to establish patterns of formation of the structure and phase composition of p-type semiconductor materials based on Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> solid solution as a result of hot pressing, as well as result of various technological options for treating the surface of the material. X-ray diffractometry (XRD), scanning probe microscopy (SPM), scanning electron microscopy (SEM), and nanoindentation were used to study the phase composition, structure and mechanical properties (hardness, elastic modulus) of samples of compact semiconductor materials of p-type conductivity based on solid solution Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, obtained in the process of hot pressing, before and after different options for surface preparation (mechanical polishing, electrochemical polishing, pulsed photon processing). It was

found that in the process of hot pressing in the volume of a semiconductor material based on the  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  solid solution a texture is formed with the axis of the  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  zone parallel to the pressing axis; for the near-surface region (at a depth of up to 200  $\mu\text{m}$ ), a texture is characteristic with the axis of the  $\langle 001 \rangle \text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  zone, a normal surface. Mechanical polishing and pulsed photon processing of material samples cause substructural changes in it, associated with an increase in the fraction of grain boundaries and an increase in the dispersity of the grain structure. It was established that mechanical polishing of material samples strengthens the surface layer up to 2 microns thick, photon treatment leads to hardening of the deeper layers of material, and electrochemical polishing leads to a decrease in hardness and elastic modulus

**Key words:** thermoelectricity, bismuth telluride, hot pressing, texture, hardness

**Acknowledgments:** 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 Resolution of the Government of the Russian Federation of April 9, 2010. No. 218 (Contract No. 03.G25.31.0246)

### References

1. Bublik V.T., Voronin A.I., Vygovskaya E.A., Ponomarev V.F., Tabachkova N.Yu., Toropova O.V. "Influence of growth conditions ingots of solid solutions  $\text{Bi}_2\text{Te}_2.7\text{Se}_0.3$  the anisotropy of physical properties", *News of higher educational institutions. Materials of electronic technology (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki)*, 2010, no. 1, pp. 58-62.
2. Miura S., Sato Y., Fukuda K., Nishimura K., Ikeda K. "Texture and thermoelectric properties of hot-extruded  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  compound", *Materials Science and Engineering A*, 2000, vol.277, issues 1-2, pp. 244-249.
3. Ha H.P., Oh Y.J., Hyun D.B., Yoon E.P. "Thermoelectric properties of n-type bismuth telluride based alloys prepared by hot pressing and zone melting method", *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 2002, vol. 10, issue 2, pp. 130-134.
4. Kim S.S., Aizawa T. "Crystallographic anisotropy control of n-type bi-te-se thermoelectric materials via bulk mechanical alloying and shear extrusion", *Materials Transaction*, 2004, vol. 45, no. 3, pp. 918-924.
5. Wang Z.-L., Matsuoka K., Araki T., Akao T., Onda T., Chen Z.-C. "Extrusion behavior and thermoelectric properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_2.85\text{Se}_0.15$  thermoelectric materials", *Procedia Engineering*, 2014, vol.81, pp. 616-621.
6. Bublik V.T., Karataev V.V., Osvenskiy V.B., Tabachkova N.Yu. "Structure formation in the process of hot extrusion of rods of thermoelectric solid solutions based on bismuth chalcogenides", *News of higher educational institutions. Materials of electronic technology (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Materialy elektronnoy tekhniki)*, 2009, no. 2, pp. 49-52.
7. Prostomolotov A.I., Verezub N.A. "Dynamic modeling of plastic molding of thermoelectric material by hot extrusion", *Bulletin of Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences (Vestnik tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki)*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 818-821.
8. Shtern Y.I., Shtern M.Yu., Sherchenkov A.A. "Russ. Microelectron", 2012, 393 p.
9. Shtern Y.I., Mironov R.E., Shtern M.Y., Sherchenkov A.A., Rogachev M.S. "Technology and investigation of ohmic contacts to thermoelectric materials", *Acta physica polonica A*, 2016, vol. 129, no. 4, pp. 785-787.
10. Feng H.-P., Yu B., Chen Sh., Collins K., He C., Ren Z.F., Chen G. "Studies on surface preparation and smoothness of nanostructured  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -based alloys by electrochemical and mechanical methods", *Electrochimica Acta*, 2011, vol. 56, pp. 3079-3084.
11. Simkin A.V., Biryukov A.V., Repnikov N.I., Ivanov O.N. "Effect of contact surface condition on the adhesion strength of interconnect layers of thermoelements based on extruded bismuth telluride", *Journal of Thermoelectricity. Thermoelectric generators design methods*, Siberian publishing «Nauka» of RAS, 2012, no.2, pp.76-82.
12. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostyuchenko A.V., Kushev S.B., Serikov D.V., Soldatenko S.A., Fedorov E.N., Bugakov A.V. "Improving the adhesion properties of the switching layers on the n-type semiconductor branches of thermoelectric generator batteries", *The Bulletin of VSTU*, 2017, vol. 13, no. 6, pp.110-116.
13. Belonogov E.K., Dybov V.A., Kostyuchenko A.V., Kushchev S.B., Sanin V.N., Serikov D.V., Soldatenko S.A. "Surface modification of thermoelectric branches based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  solid solution by the method of pulsed photon processing", *Condensed Media and Interphase Boundaries*, 2017, vol.19, no. 4.
14. Tasi C.-H., Tseng Y.-C., Jian S.-R., Liao Y.-Y., Lin C.-M., Yang P.-F. Chen D.-L., Chen H.-J., Luo C.-W., Juang J.-Y. "Nanomechanical properties of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  thin films by nanoindentation", *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 619, pp. 834-838.
15. Santamaría J.A., Alkorta J., Sevillano J.G. "Microcompression tests of single crystalline and ultrafine grain  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  thermoelectric material", *J. Mater. Res.*, 2015, vol. 30, no. 17, pp. 2593-2604.

Submitted 15.10.2018; revised 22.11.2018

### Information about the authors

**Vladislav A. Dybov**, Graduate student, Junior Research Associate, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dybovvlad@gmail.com

**Dmitriy V. Serikov**, Graduate student, Junior Research Associate, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dmitriy.tut@mail.ru

**Elena N. Fedorova**, Junior Research Associate, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: en-fedorova@mail.ru

**Dar'ya A. Sinetskaya**, Graduate student, Voronezh State University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: da\_sine@mail.ru

**Pavel S. Mozgovoy**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pasha.mozgovoi989@mail.ru

**Mariya S. Dyakina**, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: radost2017@yandex.ru