

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Информатика, вычислительная техника и управление*

Интеллектуализация поддержки принятия решений в системе мониторинга состава атмосферного воздуха <b>И.Г. Казьмина, К.Ю. Гусев, П.С. Куприенко.....</b>	7
Разработка модуля параметрического построения моделей на базе AutoCAD <b>В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.М. Нужный, В.В. Сафронов.....</b>	12
Нейро-нечеткое прогнозирование прочности железобетонных изделий <b>С.А. Ткалич, О.Ю. Таратынов .....</b>	20

### *Энергетика*

Модели прогнозирования качества продукции потенциально опасного процесса вулканизации автомобильных шин <b>А.А. Митрохин, К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский.....</b>	28
Микропроцессорная система управления манипулятором “PUMA-560” <b>В.А. Медведев.....</b>	34
Система нейроуправления на основе 3D-сети в условиях робототехнического комплекса специального назначения <b>В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский.....</b>	39
Температура вспышки и энергия Гельмгольца для веществ гомологических рядов n-алкилпропаноатов и n-алкилбутаноатов <b>А.М. Чуйков, Ю.К. Сунцов, Ю.Н. Сорокина, В.И. Лукьяненко, А.Н. Шуткин..</b>	45
Исследование распределения концентраций вредных веществ в производственных помещениях предприятий топливно-энергетического комплекса <b>М.Н. Жерлыкина, С.А. Яременко, А.А. Мерщев, Н.А. Драпалюк.....</b>	50

### *Радиотехника и связь*

Прогнозирование пространственного распределения напряженности E-составляющей электромагнитного поля системы влагопоглощающих установок <b>Ю.Г. Пастернак, В.М. Питолин, М.Н. Федоров, Д.М. Федоров .....</b>	55
Методика построения корректирующих циклических кодов для цифровых систем передачи и обработки информации <b>Б.В. Матвеев, В.А. Середа.....</b>	60
Диагностика микроконтроллеров по результатам измерения критического напряжения питания <b>М.И. Горлов, А.А. Скоморохов, Д.М. Жуков.....</b>	64
Цифровой демодулятор «в целом» фазоманипулированных сигналов, кодированных последовательностями Уолша <b>В.П. Литвиненко, А.А. Шафоростова, А.Н. Глушков, А.А. Макаров.....</b>	69
Технологическое и электрофизическое моделирование FD SOI структуры в САПР TCAD <b>Е.Ю. Плотникова, В.Е. Бельков, А.А. Винокуров, А.В. Арсентьев.....</b>	73
Верификация конечно-элементной модели радиоэлектронного модуля третьего уровня, созданной средствами программного комплекса CREO <b>В.И. Борисов, П.В. Иевлев, А.В. Муратов, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий .....</b>	79
Оптимизация дипольной модели путем генетических алгоритмов <b>В.В. Глотов.....</b>	87

### *Машиностроение и машиноведение*

Механизм и процессы комбинированного нанесения покрытий <b>М.В. Кондратьев, Е.В. Смоленцев, В.П. Смоленцев.....</b>	92
Особенности звукопоглощающих гофровых конструкций для горячей части турбореактивного двигателя (ТРД) <b>М.В. Молод, В.И. Максименков, В.И. Федосеев.....</b>	98

Разработка баз данных материалов САПР бездефектных технологий листовой штамповки	
<b>В.В. Елисеев, А.М. Гольцев, Л.В. Хливненко, Ю.Б. Рукин.....</b>	<b>102</b>
Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий	
<b>М.В. Кондратьев, Е.В. Смоленцев, В.П. Смоленцев.....</b>	<b>107</b>
Погрешности и их влияние на формирование точности электрохимического формообразования	
<b>А.И. Болдырев, А.А. Болдырев.....</b>	<b>116</b>

### ***Физика***

Особенности кинетики травления ниобата и танталата лития во фторсодержащей плазме	
<b>И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, Е.А. Сизаск.....</b>	<b>123</b>
Оптимизация технологии изготовления материала для процесса автоматизированной выкладки	
<b>М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин, А.А. Лялин.....</b>	<b>128</b>
Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов	
<b>Л.С. Печенкина .....</b>	<b>134</b>
Разработка технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала	
<b>К.С. Габриельс, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин.....</b>	<b>139</b>

## CONTENTS

### *Informatics, computer engineering and control*

Intellectualization of the support provided to the decision making process within the atmospheric composition monitoring system	
<b>I.G. Kazmina, K.Y. Gusev, P.S. Kuprienko</b> .....	7
Developing the module for parametric building of models based on AutoCAD system	
<b>V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, A.M. Nuzhnyj, V.V. Safronov</b> .....	12
Neuro-fuzzy forecasting of firmness of the reinforced concrete materials	
<b>S.A. Tkalich, O.Ya. Taratynov</b> .....	20

### *Energetics*

Models of forecasting of the quality of products of a potentially hazardous process of automobile tires vulcanization	
<b>A.A. Mitrokhin, K.Y. Gusev, V.L. Burkovsky</b> .....	28
Microprocessor control system for "PUMA-560" manipulator	
<b>V.A. Medvedev</b> .....	34
Neuro-control system based on the 3D-network of the specialized robotic technical complex	
<b>V.Zh. Bocharov, V.L. Burkovsky</b> .....	39
Temperature of flash and helmholtz energy for the substances of homological series of n-alkyl propionates and n-alkyl benzoates	
<b>A.M. Chuikov, Yu.K. Suntsov, Yu.N. Sorokina, V.I. Lukyanenko, A.N. Shutkin</b> .....	45
Research on the distribution of harmful substances concentrations within industrial spaces of fuel and energy complex enterprises	
<b>M.N. Zherlykina, S.A. Yaremenko, A.A. Mershchiyev, N.A. Drapalyuk</b> .....	50

### *Radio engineering and communication*

Predicting the spatial stress distribution of the E-component of electromagnetic field system of water-absorbing installations	
<b>Y.G. Pasternak, V.M. Pitolin, M.N. Fedorov, D.M. Fyedorov</b> .....	55
Methodology of construction of corrective cyclic codes for digital systems of information transmission and processing	
<b>B.V. Matveev, V.A. Sereda</b> .....	60
Diagnostics of microcontrollers according to the results of measurement of critical supply voltage	
<b>M.I. Gorlov, A.A. Skomorokhov, D.M. Zhukov</b> .....	64
Digital demodulator "as a whole" of phase-shift keyed signals coded with Walsh function	
<b>V.P. Litvinenko, A.A. Shaforostova, A.N. Glushkov, A.A. Makarov</b> .....	69
Technological and electrophysical modeling of the FD SOI structure VIA TCAD	
<b>E.Y. Plotnikova, V.E. Bel'kov, A.A. Vinokurov, A.V. Arsent'ev</b> .....	73
Verification of finite element model of third level radio-electronic module, created by means of CREO program complex	
<b>V.I. Borisov, P.V. Ievlev, A.V. Muratov, T.L. Turaeva, A.V. Turetskiy</b> .....	79
Optimization of a dipole model via genetic algorithms	
<b>V.V. Glotov</b> .....	87

### *Mechanical engineering and science of machines*

Mechanism and processes of combined coating	
<b>M.V. Kondrat'ev, E.V. Smolentsev, V.P. Smolentsev</b> .....	92
Acoustic corrugated honeycomb sandwich features for turbojet engine hot section (TJE)	
<b>M.V. Molod, V.I. Maksimenkov, V.I. Fedoseev</b> .....	98

Development material database for CAD systems of failurefree technology of sheet stamping <b>V.V. Eliseev, A.M. Gol'tsev, L.V. Khlivnenko, Yu.B. Rukin.....</b>	102
Processes of erosion radial plasmatic wearproof coating <b>M.V. Kondrat'ev, E.V. Smolentsev, V.P. Smolentsev.....</b>	107
Errors and their influence on formation of electrochemical shaping accuracy <b>A.I. Boldyrev, A.A. Boldyrev.....</b>	116

### *Physics*

Peculiarities of the etching kinetics of lithium niobate and tantalate in a fluorine-containing plasma <b>I.V. Konyaev, L.N. Vladimirova, E.N. Bormontov, V.A. Buslov, E.A. Sizask.....</b>	123
Developing technology for the production of the material for the automated layout <b>M.Yu. Voskoboynik, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, D.V. Polukhin, A.A. Lyalin.....</b>	128
The impact of the content of structure-generating components on the low-carbon white cast iron firmness <b>L.S. Pechenkina.....</b>	134
Development of the automated layout technology for the polymer composite material <b>K.S. Gabriels, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, D.V. Polukhin.....</b>	139

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА СОСТАВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

И.Г. Казьмина, К.Ю. Гусев, П.С. Куприенко

В статье рассматривается задача принятия решений по управлению качеством атмосферного воздуха в системе социально-гигиенического мониторинга. В условиях отсутствия полной информации предлагается использовать метод непосредственной оценки для определения групп управляющих воздействий и их сравнительной эффективности. Представлен алгоритм обработки результатов экспертного опроса с целью принятия управленческих решений в области улучшения экологической обстановки.

На основе полученных значений эффективности с помощью метода непосредственной оценки (с учетом ожидаемого снижения концентрации загрязняющих веществ, минимизации количества ресурсов, необходимых для выполнения конкретного мероприятия, реализуемого за минимальные сроки) осуществляется формирование групп управляющих воздействий и представление рекомендаций по управлению качеством атмосферного воздуха.

Задача оценки эффективности мероприятий для управления качеством атмосферного воздуха заключается в поиске альтернатив, т.е. управляющих воздействий, обеспечивающих снижение концентрации загрязняющих веществ в атмосфере. Группы управляющих воздействий представляются набором мероприятий, проранжированных по степени эффективности и выбираемых в зависимости от уровня загрязнения в мониторинговых точках (высокий, средний, низкий уровни).

Использование новых информационных технологий и создание алгоритма для поддержки принятия решений в задаче управления качеством атмосферного воздуха позволит добиться качественно новых результатов в области обеспечения экологической безопасности крупных городов

Ключевые слова: экспертные оценки, эффективность управляющих воздействий, принятие решений

### Введение

Одной из актуальных задач, стоящих перед обществом на современном этапе, является совершенствование системы управления качеством атмосферного воздуха в условиях постоянного увеличения экологического риска для здоровья населения, обусловленного высокими уровнями загрязнения окружающей среды. Таким образом, одним из приоритетных направлений научных исследований в области обеспечения экологической безопасности, а также защиты человека и окружающей среды становится разработка интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) при управлении качеством атмосферного воздуха в крупных городах [1].

Задача принятия решений по управлению качеством атмосферного воздуха может быть сведена к определению наиболее эффективных альтернатив (управляющих решений) при возникновении и развитии  $i$ -ой экологической ситуации на  $j$ -ой территории. Пусть имеется

некоторый набор природоохранных мероприятий, из которого выбирается одно мероприятие для реализации задачи управления качеством атмосферного воздуха, целью которой является снижение концентрации загрязняющих веществ до допустимого уровня.

### Алгоритмизация системы мониторинга

Эффективность выполнения данной задачи будем характеризовать показателем  $Q \rightarrow \max$ . Все факторы, от которых зависит достижение поставленной задачи, разделим на три группы: заданные заранее известные факторы (условия выполнения задачи), которые для краткости обозначим  $\alpha$ ; зависящие от лица, принимающего решения (ЛПР) элементы решения, образующие в своей совокупности множества решений  $X$ ; неизвестные факторы, которые в совокупности обозначим  $\xi$ . Показатель эффективности  $Q$  зависит от всех трех групп факторов:  $Q = Q(\alpha, X, \xi)$ . В этом случае задачу можно сформулировать так: при заданных условиях  $\alpha$ , с учетом неизвестных факторов  $\xi$ , найти такое решение  $x \in X$ , которое, по возможности, обеспечивает максимальное значение показателя эффективности  $Q$ .

Количество управляющих воздействий, направленных на уменьшение концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от выбросов стационарных и передвижных

---

Казьмина Инна Германовна – ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», преподаватель, e-mail: innmix@yandex.ru

Гусев Константин Юрьевич – ВГТУ, канд. техн. наук, старший преподаватель, e-mail: gussev\_konstantin@mail.ru

Куприенко Павел Сергеевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: togochs@mail.ru

источников, относительно невелико. Для конечного числа управляющих воздействий появляется возможность сравнения альтернатив между собой. Набор критериев для сравнения альтернатив может быть следующим: общая эффективность мероприятия, экологический эффект, социальный эффект, экономический эффект и др.

В условиях отсутствия полной информации может быть использован метод непосредственной оценки для определения групп управляющих воздействий и их сравнительной эффективности. В таком случае оценка эффективности может производиться специалистами на основе имеющейся у них информации. При этом к привлекаемым для решения данной задачи специалистам предъявляются следующие требования: данное лицо должно владеть методами экологического мониторинга и обладать достаточным уровнем знаний в области обработки и анализа экологической информации. Таким образом, величина доли неопределенности при определении групп управляющих воздействий и их сравнительной эффективности будет зависеть от опыта и знаний экспертов-специалистов.

Известно, что эффективность природоохранных мероприятий в отдельных случаях носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов. В связи с этим возможно предположить, что распределение случайных значений эффективности описывается  $\beta$ -распределением по аналогии с методами сетевого планирования и управления (СПУ) [2]. Применение  $\beta$ -распределения позволяет использовать экспертные оценки для основных параметров распределения – среднего значения (математического ожидания) и среднеквадратического отклонения [3].

В этом случае применяются экспертные оценки минимально возможной эффективности управляющих воздействий  $Q_{min}$ , максимально возможной  $Q_{max}$  и наиболее вероятной  $Q_{н.в.}$ . По этим величинам с помощью формул, принятых в системе СПУ, оценивается ожидаемое значение эффективности  $Q_{ож}$  (математическое ожидание распределения) и дисперсия  $\sigma^2$ :

$$Q_{ож} = \frac{Q_{min} + 4Q_{н.в.} + Q_{max}}{6}; \quad (1)$$

$$s^2 = \left( \frac{Q_{max} - Q_{min}}{6} \right)^2. \quad (2)$$

Следует отметить, что оценки по методу СПУ нередко дают заниженные величины среднеквадратического отклонения [1]. В связи с этим обработку исходных данных, получаемых от экспертов, целесообразно вести по формулам:

$$Q_{ож} = \frac{Q_{min} + 2Q_{н.в.} + Q_{max}}{4}; \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \left( \frac{Q_{max} - Q_{min}}{4} \right)^2. \quad (4)$$

Чтобы накопить исходные данные, необходимые для определения эффективности управляющих воздействий, используются специальные формы, в которые вносятся индивидуальные оценки экспертов (табл. 1).

Таблица 1

Мероприятие	Оценка			Расчетные величины	
	$Q_{min}$	$Q_{i.а.}$	$Q_{max}$	$Q_{iэ}$	$\sigma^2$
1	$Q_{min1}$	$Q_{i.а.1}$	$Q_{max1}$	$Q_{iэ1}$	$\sigma^2_1$
2	$Q_{min2}$	$Q_{i.а.2}$	$Q_{max2}$	$Q_{iэ2}$	$\sigma^2_2$
$n$	$Q_{minn}$	$Q_{i.а.n}$	$Q_{maxn}$	$Q_{iэn}$	$\sigma^2_n$

Обработка результатов экспертного опроса производится по алгоритму, представленному на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм определения эффективности управляющих воздействий

Шаг 1. Расчет величин  $\overline{Q_{ож}^i}, \sigma_{ij}$ , где  $i$  – номер мероприятия, входящего в группы управляющих воздействий;  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество возможных мероприятий;  $j$  – условный порядковый номер эксперта,  $j = 1, 2, \dots, m$ , где  $m$  – количество привлеченных к оценке эффективности экспертов.

Шаг 2. Составление и заполнение данными сводной формы ожидаемой эффективности выполнения каждого мероприятия (табл. 2).

Таблица 2

Мероприятие	Эксперт					
	1	2	...	$j$	...	$m$
1	$Q_{ож}^{11}$	$Q_{ож}^{12}$	...	$Q_{ож}^{1j}$	...	$Q_{ож}^{1m}$
2	$Q_{ож}^{21}$	$Q_{ож}^{22}$	...	$Q_{ож}^{2j}$	...	$Q_{ож}^{2m}$
$n$	$Q_{ож}^{n1}$	$Q_{ож}^{n2}$	...	$Q_{ож}^{nj}$	...	$Q_{ож}^{nm}$

Шаг 3. Составление сводной матрицы дисперсий отклонений оценок (табл. 3).

Таблица 3

Мероприятие	Эксперт					
	1	2	...	$j$	...	$m$
1	$\sigma_{11}$	$\sigma_{12}$	...	$\sigma_{1j}$	...	$\sigma_{1m}$
2	$\sigma_{21}$	$\sigma_{22}$	...	$\sigma_{2j}$	...	$\sigma_{2m}$
$n$	$\sigma_{n1}$	$\sigma_{n2}$	...	$\sigma_{nj}$	...	$\sigma_{nm}$

Шаг 4. Определение усредненного мнения экспертов для установления среднего значения эффективности каждого мероприятия. Оценка усредненного ожидаемого значения эффективности каждого мероприятия осуществляется путем нахождения средневзвешенного значения по наблюдениям каждого эксперта по следующей формуле:

$$\overline{Q_{ож}^i} = \sum_{j=1}^m K_{ij} Q_{ож}^{ij}, \quad (5)$$

где  $\overline{Q_{ож}^i}$  – усредненное значение трудоемкости  $i$ -го мероприятия,  $K_{ij}$  – весовой коэффициент  $j$ -го эксперта.

Весовой коэффициент  $j$ -го эксперта при оценке эффективности  $i$ -го мероприятия определяется из соотношения:

$$K_{ij} = \frac{\sigma_{0i}^2}{\sigma_{ij}^2}. \quad (6)$$

В формуле (6)  $\sigma_{0i}^2$  – постоянная величина, выбираемая из условия:

$$\sum_{j=1}^m K_{ij} = 1. \quad (7)$$

Из (6) и (7) получаем:

$$\sigma_{0i}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, дисперсия усредненного значения эффективности мероприятия определяется по формуле:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{0i}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sigma_{ij}^2}}. \quad (9)$$

Шаг 5. В случае, когда целесообразно различать экспертов по степени компетентности и значимости их мнений, т.е. мнениям одних экспертов придается больший вес, чем мнениям других, проводится процедура ранжирования. Каждому эксперту присваивается ранг значимости от 1 (наиболее влиятельный эксперт) до  $m$  (наименее влиятельный эксперт).

Мнение каждого эксперта принимается при расчетах с коэффициентом, пропорциональным  $\frac{1}{r_j}$ , где  $r_j$  – ранг  $j$ -го эксперта. В данном случае усредненное значение эффективности мероприятия определяется по формуле:

$$\overline{Q_{ож}^i} = \sum_{j=1}^m K'_{ji} Q_{ож}^{ij} \quad (10)$$

В формуле (10)  $K'_{ji}$  – весовой коэффициент  $j$ -го эксперта при оценке эффективности  $i$ -го мероприятия, учитывающий степень компетентности и значимости мнения отдельного эксперта, устанавливаемый из соотношения:

$$K'_{ji} = \frac{1}{r_j} \cdot K_{ij} = \frac{1}{r_j} \cdot \frac{\sigma_{0i}^2}{\sigma_{ij}^2}. \quad (11)$$

Оценка дисперсий при ранжировании мнений экспертов принимается равной:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{0i}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{r_j \sigma_{ij}^2}}. \quad (12)$$

Шаг 6. Полученные значения  $\overline{Q_{ож}^i}$  и  $Q_{ож}^i$  используются как предварительные, характеризующие эффективность проведения мероприятий для управления качеством атмосферного воздуха в системе социально-гигиенического мониторинга. Значения  $\sigma_i^2$  и  $\sigma_{0i}^2$  позволяют дать оценку неопределенности (отклонений) при планировании эффективности управляющих воздействий, или мероприятий.

На рис. 2 представлена функциональная схема поддержки принятия решений при управлении качеством атмосферного воздуха.

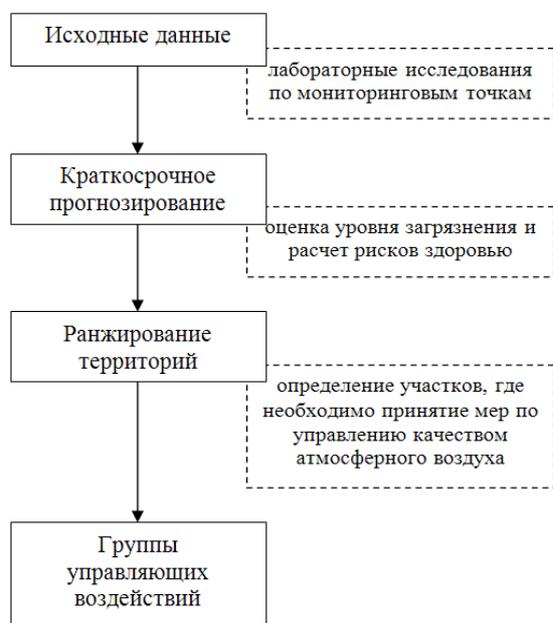


Рис. 2. Функциональная схема поддержки принятия решений

На основе полученных значений эффективности с помощью метода непосредственной оценки (с учетом ожидаемого снижения концентрации загрязняющих веществ, минимизации количества ресурсов, необходимых для

выполнения конкретного мероприятия и реализуемого за минимальные сроки) осуществляется формирование групп управляющих воздействий и представление рекомендаций по управлению качеством атмосферного воздуха.

Группы управляющих воздействий представляют собой набор мероприятий, проранжированных по степени эффективности, выбираемые в зависимости от уровня загрязнения в мониторинговых точках (высокий, средний, низкий уровни) [4]. Краткосрочное прогнозирование уровней загрязнения и расчет рисков производится на основе модели нечеткого поиска [5].

### Заключение

Таким образом, задача оценки эффективности мероприятий для управления качеством атмосферного воздуха заключается в поиске альтернатив, т.е. управляющих воздействий, обеспечивающих снижение концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

### Литература

1. Казьмина, И.Г. Информационно-аналитические технологии при ведении социально-гигиенического мониторинга/ И.Г. Казьмина, К.Ю. Гусев // Интеллектуальные информационные системы: тр. Всерос. конф. Воронеж, 2015. – С. 7 – 10.
2. Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
3. Верзилин, Д.Н. Эконометрика. Принятие управленческих решений на основе статистических данных: учеб. пособие / Д.Н. Верзилин, Т.Г. Максимова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 118 с.
4. Казьмина, И.Г. Алгоритм классификации пространственных данных о состоянии загрязнения атмосферного воздуха / И.Г. Казьмина, В.М. Усков, К.Ю. Гусев // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: сб. ст. по материалам VII Междунар. науч.-практ. конф. курсантов, слушателей, студентов и молодых ученых. Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, – 2016. – Ч. 1. С. 319 – 321.
5. Гусев, К.Ю. Нейросетевая модель прогнозирования интегральных экономических показателей / К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский // Системы управления и информационные технологии. Воронеж: Научная книга, 2012. – Т. 48. – № 2.1. – С. 132 – 135.

# INTELLECTUALIZATION OF THE SUPPORT PROVIDED TO THE DECISION MAKING PROCESS WITHIN THE ATMOSPHERIC COMPOSITION MONITORING SYSTEM

I.G. Kazmina<sup>1</sup>, K.Y. Gusev<sup>2</sup>, P.S. Kuprienko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lecturer, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation, e-mail: innmix@yandex.ru

<sup>2</sup>PhD, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: gusev\_konstantin@mail.ru

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

The article considers the problem of decision-making on air quality management in the public health monitoring system. In the absence of complete information it is proposed to use the method of direct assessment to determine the groups of control actions and their relative effectiveness. Presenting the results of the processing algorithm of the expert survey for the purpose of management decision-making in the field of environmental improvement.

Based on the efficiency values using the method of direct evaluation (taking into account the expected decrease in the concentration of contaminants, minimize the amount of resources required to perform specific activities and implemented for the shortest possible time) carried out the formation of groups of control actions and make recommendations on air quality management.

The objective evaluation of the effectiveness of measures for air quality management is to find alternatives, ie, control actions, providing reduction in the concentration of pollutants in the atmosphere. Groups of control actions submitted to a set of measures, ranked according to effectiveness, and selected depending on the level of contamination in monitoring points (high, medium, low).

The use of new information technologies and the creation of an algorithm for decision support in the problem of air quality management will allow to achieve a qualitatively new results in the field of environmental security in large cities

Key words: expert assessments, the effectiveness of control actions, decisions

## References

1. Kazmina I.G., Gusev K.Y. «Informatsionno-analiticheskiye tekhnologii pri vedenii sotsial'no-gigiyenicheskogo monitoringa», *Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy: trudy vsrossiyskoy konferentsii*, 2015, pp. 7 – 10.
2. Beshelev S.D., Gurvich F.G. «Matematiko-statisticheskiye metody ekspertnykh otsenok». M.: Statistika, 1980. – 263 p.
3. Verzilina D.N., Maksimova T.G. «Ekonometrika. Prinyatiye upravlencheskikh resheniy na osnove statisticheskikh dannykh»: uchebn. posobiye, SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. – 118 p.
4. Kazmina I.G., Uskov V.M., Gusev K.Y. «Algoritm klassifikatsii prostranstvennykh dannykh o sostoyanii zagryazneniya atmosfernogo vozdukha», *Sovremennyye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoj oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychnykh situatsiy: sb. st. po materialam VII Vserossiyskoy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. kursantov, slushateley, studentov i molodykh uchenykh* FGBOU VPO Voronezhskiy institut GPS MCHS Rossii, 2016. – pp. 319 – 321.
5. Gusev K.Y., Burkovskiy V.L. «Neyrosetevaya model prognozirovaniya integralnykh ekonomicheskikh pokazateley», *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii*, Voronezh: Nauchnaya kniga. – T. 48. – № 2.1. – 2012. – pp. 132 – 135.

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ AUTOCAD

**В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.М. Нужный, В.В. Сафронов**

В статье рассмотрен вопрос разработки модуля параметрического построения твердотельных моделей для графического редактора AutoCAD 2015. В основе разработки лежит универсальный алгоритм преобразования геометрических моделей в параметрические, базирующийся на анализе DXF-файлов. Предложенный подход позволяет выполнить декомпозицию сложной твердотельной модели и сформировать параметрические описания отдельных графических примитивов, входящих в состав модели.

Модуль предназначен для расширения базовых возможностей параметрического твердотельного моделирования, реализованных в графическом редакторе AutoCAD в виде динамических блоков. Основным недостатком этого инструмента является поддержка только поверхностных моделей. Создание твердотельных параметрических моделей при помощи динамических блоков в AutoCAD 2015 не предусмотрено.

Программа выполнена с использованием интерфейса прикладного программирования графического редактора AutoCAD и реализована в виде модуля универсальной автоматизированной информационной системы. Модуль позволяет выполнять параметризацию готовых твердотельных моделей для повышения удобства их повторного использования. Применение сформированных при помощи модуля параметрических моделей дает возможность за короткое время выполнить анализ различных конструктивных схем и избежать принципиальных конструкторских ошибок. При проектировании системы максимально реализован принцип модульности, позволяющий по мере необходимости расширять ее функционал без существенной корректировки ранее созданных модулей

Ключевые слова: твердотельные модели, параметризация, алгоритм, AutoCAD

### Введение

Параметрическое представление трехмерных моделей является наиболее эффективным инструментом моделирования на сегодняшний день. Практически все современные САПР обладают теми или иными средствами параметрического моделирования, как двумерного, так и трехмерного. В AutoCAD инструментарий параметрического моделирования реализован в виде динамических блоков, позволяющих создавать параметрические поверхностные модели. При этом актуальной остается задача параметризации уже существующих твердотельных моделей.

### 1. Постановка задачи

По экспертным оценкам, до восьмидесяти процентов узлов и деталей, вновь разрабатываемых изделий, не претерпевают существенных изменений в конфигурации, производится лишь изменение их геометрических параметров. Множество конструкторских САПР позволяют модифицировать проектируемое изделие и повторно использовать его уже с новыми параметрами, но имеется также ряд систем

(AutoCAD, ProgeCAD и т.д.), не обладающих полноценными средствами параметрического построения моделей. Разработка автоматизированной системы параметрического моделирования с использованием твердотельных моделей на базе AutoCAD позволяет решить проблему параметризации моделей для этой системы.

Одним из наиболее эффективных типов 3D-моделей, используемых в конструкторских САПР, является твердотельная модель объекта, позволяющая создавать пространственную модель объекта и генерировать по ней полный набор графической конструкторской документации. Такие модели могут быть переданы в любую расчетную программу для анализа прочностных или других свойств детали.

В графическом редакторе AutoCAD, начиная с версии 2006, средства параметрического моделирования представлены динамическими блоками. Динамические блоки — это параметрические графические примитивы, позволяющие динамически изменять определенные параметры посредством операций со специальными треугольными "ручками". Пользователь может не только создавать компактные библиотеки с параметрическими графическими блоками, но и настраивать их «по месту». В настоящее время преобразование в динамические блоки возможно только на основе двумерных блоков, что существенно сужает перечень выполняемых задач и

---

Барабанов Владимир Федорович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvff@list.ru

Гребенникова Наталия Ивановна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: g-naty@yandex.ru

Нужный Александр Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: nam14@mail.ru

Сафронов Виталий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vitolik@bk.ru

ограничивает возможности использования трёхмерного моделирования.

## 2. Модуль формирования параметрических моделей на базе AutoCad

На практике проектировщику очень часто приходится иметь дело с моделями, имеющими одинаковые конфигурации, но отличающимися геометрическими пропорциями и размерами. Для повышения эффективности решения этой задачи предназначен автоматизированный модуль генерации параметрических

твёрдых моделей, реализованный в составе универсальной автоматизированной информационной системы [1], представленной на рис. 1.

Модуль построения параметрических трёхмерных моделей наиболее тесно взаимодействует с блоком, обеспечивающим работу с графическими базами данных (ГБД), так как почти вся необходимая информация для построения моделей располагается в базе данных [2].

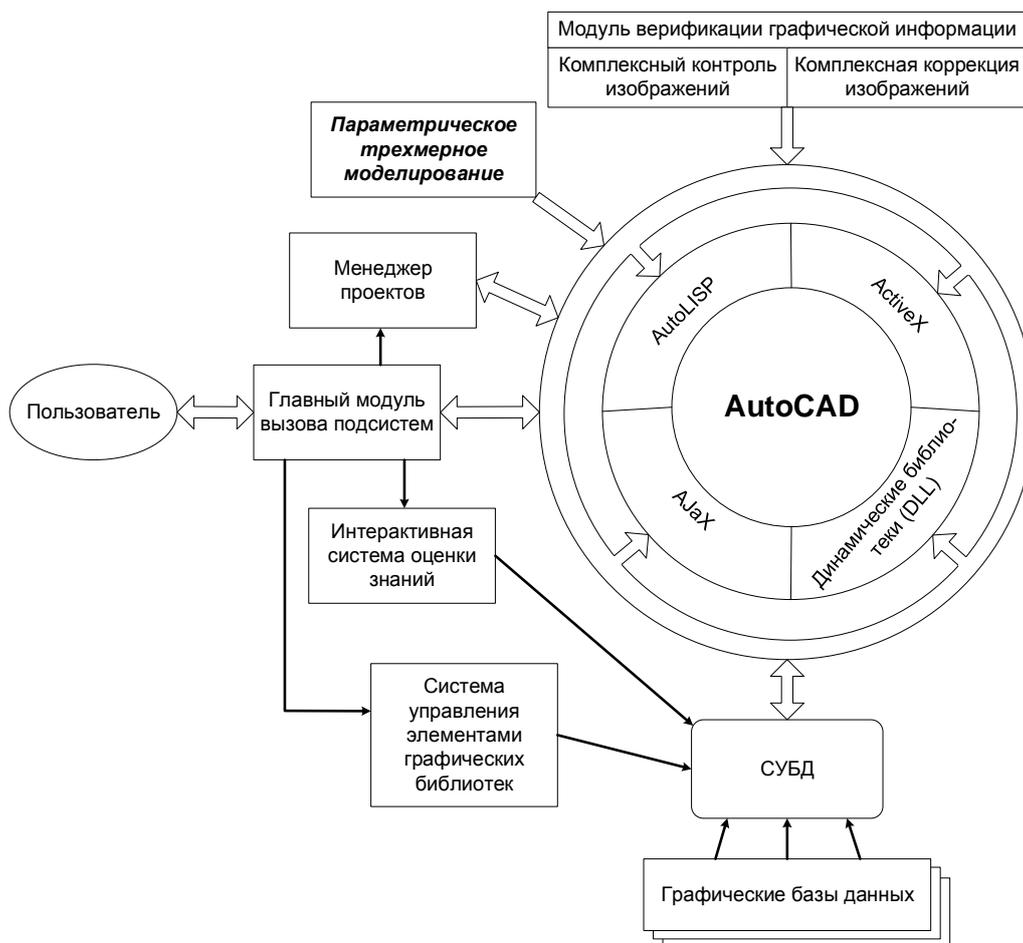


Рис. 1. Функциональное взаимодействие модулей универсальной автоматизированной информационной системы

Ниже перечислены основные функциональные возможности модуля:

- извлечение из ГБД качественной (размеры, материал) и количественной (перечень деталей) информации о трёхмерной модели;
- извлечение из ГБД графической информации, представленной в виде растрового изображения трёхмерной модели;
- построение параметрической модели на основе полученной информации (табличная параметризация);

- изменение геометрических пропорций с сохранением конфигурации по 3 осям (функция масштабирования);
- корректировка полученной информации и построение на основе новых данных параметрической модели (геометрическая параметризация);
- визуализация параметрических моделей в режиме предварительного просмотра;
- экспорт параметрических моделей в систему графического проектирования AutoCAD;

- анализ чертежа, в который осуществляется экспорт модели (типы слоёв, типы линий, толщина линий и т.д.);
- возможность задания у параметрической модели таких свойств как: слой, тип и толщина линий и т.д.;
- возможность размещения параметрической модели на новом слое с автоматическим созданием этого слоя.

После извлечения геометрической модели из ГБД, работа с ней может вестись в одном из режимов, перечисленных на рис. 2.



Рис. 2. Варианты использования геометрической модели

Модель можно использовать без каких-либо изменений в режиме «Как есть», то есть, после выбора модели из базы данных она напрямую экспортируется в открытый в графическом редакторе AutoCAD чертеж для последующей работы с ней.

Режим «Масштабирование» подразумевает, что модель может быть пропорционально увеличена или уменьшена по одной, нескольким или всем координатным осям (X, Y, Z). Данный режим позволяет изменить только геометрические размеры модели в целом, геометрические пропорции сохраняются.

Режим «Параметризация» является основным режимом модуля. Именно при его использовании происходит переход от геометрической модели к параметрической. Этот режим предоставляет возможности как табличной, так и геометрической параметризации.

Важным отличием режима «Параметризация» от режима «Масштабирование» является то, что, при масштабировании изменяются геометрические пропорции всей детали целиком, и она либо уменьшается/увеличивается (одинаковый коэффициент по трём осям), либо растягивается (разные коэффициенты).

При параметризации также сохраняется общая геометрическая конфигурация, но

появляется возможность частичной её трансформации за счет изменения размеров или числа отдельных деталей в конечном изделии, вплоть до полного их вырождения или замены на другие аналогичные.

Режимы параметризации, представленные в модуле, являются наиболее распространенными в настоящее время [3]. Табличный тип параметризации – это базовый тип, который является неотъемлемой частью любой системы, связанной с параметрическим моделированием. Модель создается на основе таблицы параметров. В разработанной программе эти параметры извлекаются из базы данных. Затем эти данные подвергаются проверке на корректность и полноту. Если данные не соответствуют предъявляемым требованиям, то осуществляется повторный запрос к базе данных. Если проверка прошла успешно, то пользователю предоставляется выбор: либо сгенерировать окончательную модель и экспортировать её в графический редактор AutoCAD, либо в режиме предварительного просмотра увидеть получившуюся модель, оценить её, а затем решить стоит ли экспортировать, или нет.

Второй тип параметризации является более гибким и мощным механизмом реализации требуемых задач, что делает его сложнее как с точки зрения математических расчетов, так и со стороны программной реализации. Но, в конечном итоге, геометрический тип параметризации сводится к табличному (как и любой другой тип параметризации), так как любая модель перестраивается по ряду определённых значений, а этот ряд и есть таблица параметров, характеризующих модель. К проверке на корректность и полноту добавляется проверка геометрических размеров и пропорций, дабы избежать получения принципиально некорректных моделей.

После прохождения всех проверок пользователь может, как и в случае с табличной параметризацией, либо экспортировать полученную модель в AutoCAD и уже средствами этого редактора продолжить работу, либо воспользоваться функцией предварительного просмотра модели. Схема описанного алгоритма приведена на рис. 3.

### 3. Обоснование эффективности разработанных средств

Для оценки актуальности разработки необходимо провести сравнительный анализ процессов получения параметрической модели с помощью стандартных средств

параметризации графического редактора AutoCAD и с помощью средств разработанного модуля.

В качестве стандартных средств параметрического построения в системе AutoCAD позиционируются динамические блоки. Это блоки, которые с помощью специальных элементов управления можно трансформировать по заранее заданным параметрам. Важной особенностью

динамических блоков является то, что создание твердотельных динамических блоков стандартными средствами AutoCAD не представляется возможным. Этот инструмент поддерживает только поверхностные модели, получаемые вытягиванием или выдавливанием контура, оформленного в виде двумерного динамического блока [4].

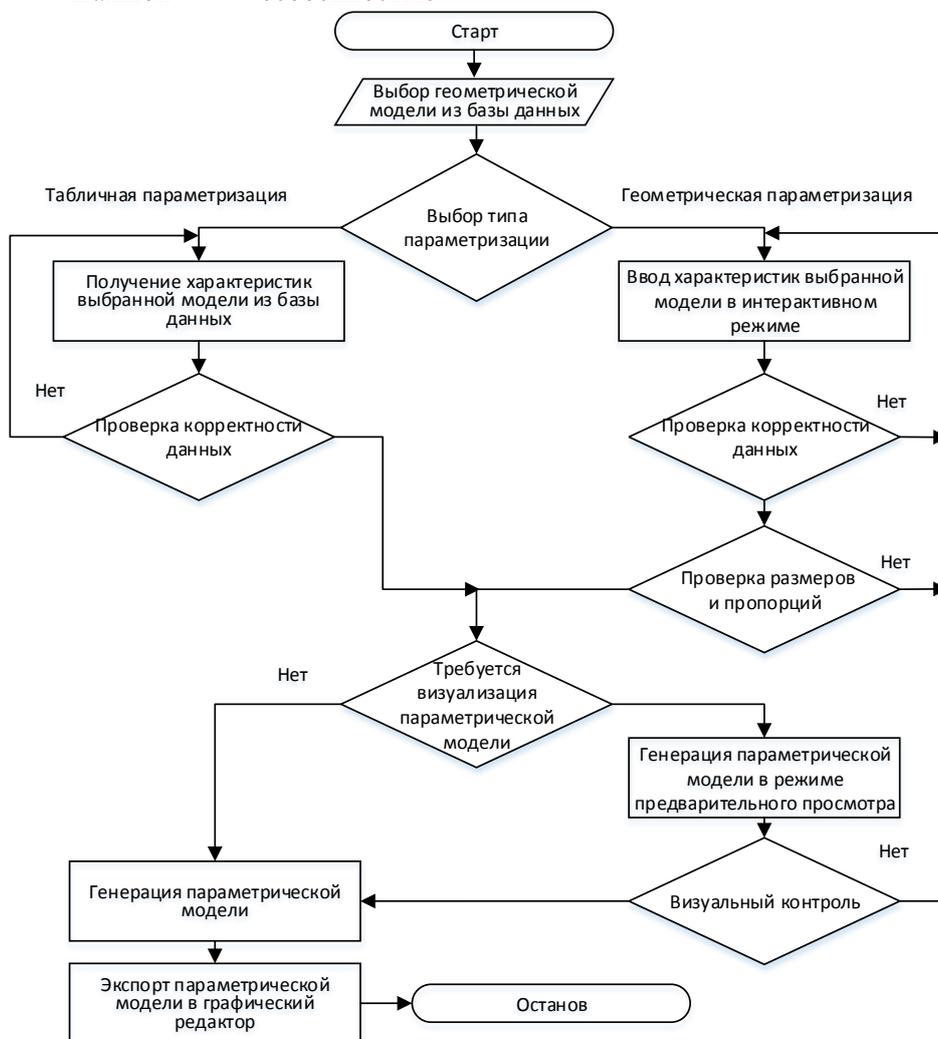


Рис. 3. Формирование моделей с различными типами параметризации

Таким образом, создание параметрической трехмерной модели при использовании стандартных средств AutoCAD предполагает выполнение следующего набора действий:

- создание динамического двумерного блока, определяющего контур детали; при этом возможно использование как геометрической, так и табличной параметризации;
- выполнить вытягивание или выдавливание ассоциативной поверхности, заданной динамическим блоком с последующим замыканием нижней и верхней поверхностей контуров.

При этом преобразование блока в твердотельный объект приводит к утрате параметрически заданных характеристик. Процедура создания поверхностной модели на базе динамического блока приведена на рис. 4.

Формирование параметрической твердотельной модели с использованием разработанного модуля начинается с поиска чертежа в графической базе данных, в которой хранится информация обо всех чертежах, находящихся на компьютере пользователя. В базе данных реализована функция поиска чертежа по конфигурируемому набору



Поле «Наименование модели» предназначено для отображения названия текущей модели, а также выбора модели из базы данных.

Координаты модели отражаются в блоке «Точка вставки» и задаются вручную, при помощи ввода значений в поля X, Y и Z, или указываются в интерактивном режиме на чертеже. Блокировка с кнопки «Указать на чертеже» снимается после подключения модуля к редактору AutoCAD.

Следует отметить, что пока пользователь не осуществил выбор модели, большинство элементов управления на форме будут не доступны.

В блоке «Режимы» выбирается тип использования геометрической модели. Активация режима «Параметризация» приведёт к появлению блока с режимами «Табличная параметризация» и «Геометрическая параметризация», а выбор режима «Масштабируемость», приводит к появлению блока «Масштаб по осям» (рис. 6).

Первоначальное заполнение параметров создаваемой модели осуществляется на основе анализа DXF-файла модели, содержащего пары кодов и ассоциированных значений [5]. Коды определяют типы значений, следующих за ними. Пары кодов и значений образуют секции, состоящие из отдельных записей. Среди этих записей содержатся сведения и о геометрической модели с составляющими её примитивами. Эти данные содержатся в секции ENTITIES, содержащей все графические объекты в чертеже.

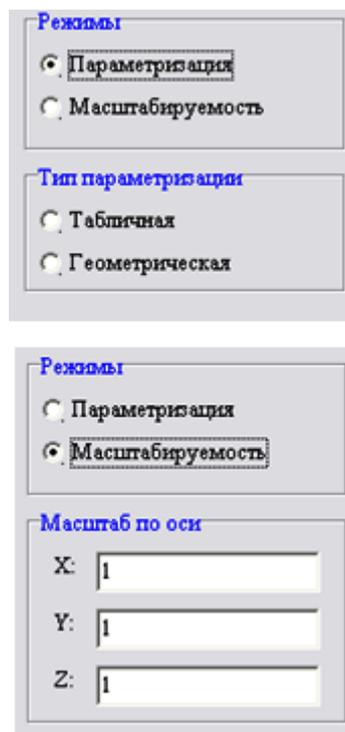


Рис. 6. Выбор режима параметризации

Информация о примитивах, используемая для дальнейшего анализа чертежа, и содержащая координаты точки вставки примитивов и их геометрические размеры (длина, ширина, высота и т.д.), заносится в таблицу «Анализ геометрической модели» (рис. 7). На основании этих данных формируется параметрическое описание модели.

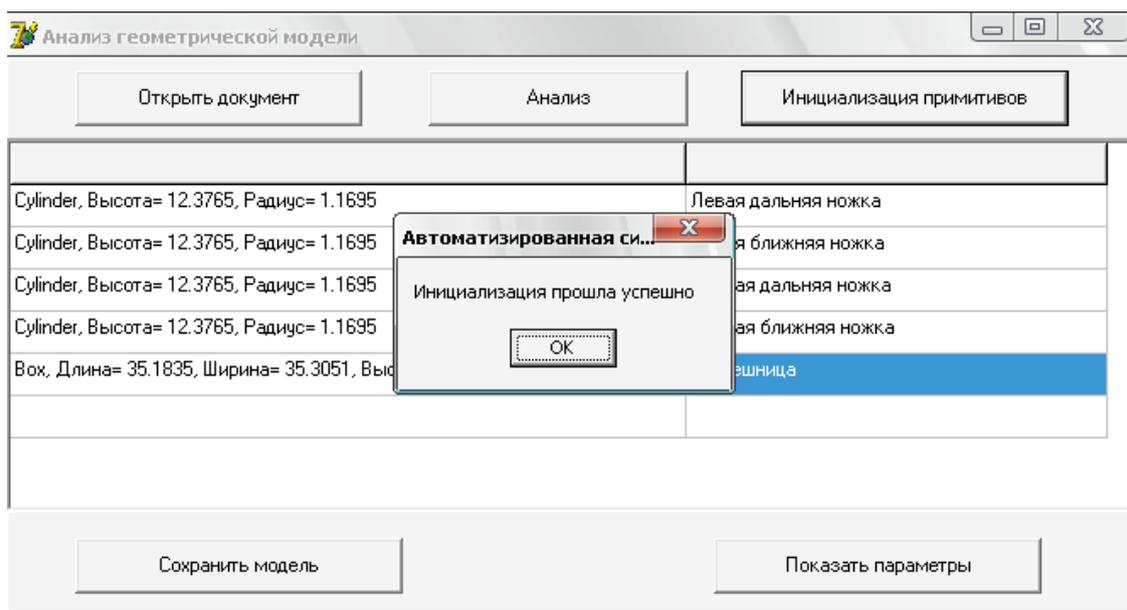


Рис. 7. Результаты анализа геометрической модели

После получения всех данных о примитивах геометрической модели и сведения их в таблицу, необходимо сопоставить их с реальными деталями. Наименование детали заносится в правую колонку напротив соответствующего примитива. Чтобы зафиксировать эти связи, следует нажать

кнопку «Инициализация примитивов». Получившуюся параметрическую модель в виде набора параметров можно сохранить для дальнейшего использования.

Редактирование параметров элементов модели осуществляется в окне «Параметры», представленном на рис. 8.

Наименование детали	Радиус	Высота	Длина	Ширина	Тип примитива	Коорд. X	Коорд. Y	Коорд. Z
Левая дальняя ножка	1.1695	12.3765	---	---	Cylinder	12.213	-12.6079	
Левая ближняя ножка	1.1695	12.3765	---	---	Cylinder	12.6654	12.6355	
Правая дальняя ножка	1.1695	12.3765	---	---	Cylinder	37.7949	12.2507	
Правая ближняя ножка	1.1695	12.3765	---	---	Cylinder	37.7211	-12.5757	
Столешница	---	2.327	35.1835	35.3051	Box	24.9307	-0.0595	

Сохранить изменения

Рис. 8. Окно редактирования параметров модели

### Заключение

Анализ функциональных возможностей разработанного модуля позволяет утверждать, что его использование позволит значительно повысить эффективность системы AutoCAD в части параметрического моделирования. Гибкие и мощные средства параметрического моделирования твердотельных объектов, представленные в разработанном модуле, способны эффективно дополнить функционал динамических блоков AutoCAD.

#### Литература

1. Барабанов В.Ф. Разработка универсальной графической автоматизированной информационной системы / В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.М. Нужный // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016 : сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. В 4 т.; под общ. ред. О.В.

Миловзорова. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2016. - С. 103-105.

2. Организация графических баз данных для интерактивного проектирования технологических процессов / В.Ф. Барабанов, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 30-33.

3. Параметрическое моделирование [Электронный ресурс] : Режим доступа : World Wide Web. URL : <http://ru.wikipedia.org/wiki/>

4. 3D динамические блоки в AutoCAD [Электронный ресурс] : Режим доступа : World Wide Web. URL : <http://autocad-specialist.ru/video-uroki-autocad/3d-dinamicheskie-bloki-v-autocad.html>

5. Проблемы трансляции графических данных САД-систем / С.Л. Кенин, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. - Т. 9. - № 3.1. - С. 4-8.

Воронежский государственный технический университет

## DEVELOPING THE MODULE FOR PARAMETRIC BUILDING OF MODELS BASED ON AUTOCAD SYSTEM

V.F. Barabanov<sup>1</sup>, N.I. Grebennikova<sup>2</sup>, A.M. Nuzhnyj<sup>3</sup>, V.V. Safronov<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: nam14@mail.ru

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vitolik@bk.ru

In the article the question of development of the module parametric build solid models for the graphic editor AutoCAD 2015. In the basis of development is a universal algorithm of transforming geometric models in a parametric, based on analysis of the DXF files. The proposed approach enables the decomposition of complex solid models and generate a parametric description of the individual graphics primitives included in the model.

The module is designed to extend the capabilities of parametric solid modeling, implemented in the graphic editor AutoCAD dynamic blocks. The main disadvantage of this tool is to support only surface models. Create parametric solid models using dynamic blocks in AutoCAD 2015 is not provided.

The program is executed using the application programming interface of the graphic editor AutoCAD and is implemented as a module of a universal automated information system. The module allows you to parameterize the finished solid models to make them easier to reuse. The application generated using the module of parametric models makes it possible to carry out analysis of various constructive schemes and to avoid fundamental design errors. The design of the system is maximally implemented the principle of modularity, which allows, as necessary, to expand its functionality without significant adjustments of previously created modules

Key words: solid model, parameterization, algorithm, AutoCAD

#### References

1. Barabanov V.F., Grebennikova N.I., Nuzhnyj A.M. «Razrabotka universal'noj graficheskoy avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy», *Sovremennye tehnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2016 : sb. tr. mezhdunar. nauch.-tehn. i nauch.-metod. konf. v 4 tomah.*; pod obshh. red. O.V. Milovzorova. - Rjazanskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet, 2016. - pp. 103-105.
2. Barabanov V.F., Barabanov A.V., Grebennikova N.I., Safronov V.V. «Organizacija graficheskikh baz dannyh dlja interaktivnogo proektirovaniya tehnologicheskikh processov», *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2014, Vol. 10, № 5, pp. 30-33.
3. Parametricheskoe modelirovanie [Jelektronnyj resurs] : Rezhim dostupa : World Wide Web. URL : <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
4. 3D dinamicheskie bloki v AutoCAD [Jelektronnyj resurs] : Rezhim dostupa : World Wide Web. URL : <http://autocad-specialist.ru/video-uroki-autocad/3d-dinamicheskie-bloki-v-autocad.html>
5. Kenin S.L., Barabanov V.F., Nuzhnyj A.M., Grebennikova N.I. «Problemy transljaccii graficheskikh dannyh CAD-sistem», *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2013, Vol. 9, № 3.1, pp. 4-8.

## НЕЙРО-НЕЧЕТКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

С.А. Ткалич, О.Ю. Таратынов

В статье рассматривается возможность применения современных методик прогнозирования как элемента системы управления качеством. Объектом исследований является система контроля качества при производстве железобетонных изделий. Для решения поставленной задачи предложено использовать модернизированный цикл Э. Деминга с прогнозированием состояния P&P-D-C-A. Применен математический инструментарий искусственных нечетких нейронных сетей с обратным распространением ошибки архитектуры вида ANFIS и TSK. Проведен анализ факторов, влияющих на прочность бетона. В качестве входных характеристик выбраны модуль крупности песка, количество зёрен пластинчатой и игольчатой формы в щебне, объемный вес цемента, предел прочности цементного камня. В качестве выходного параметра используется среднеарифметическая величина разрушающего воздействия по результатам трех экспериментов. Сформирована электронная база данных в среде MS Access на основе данных учетных журналов лаборатории входного контроля предприятия. Сформированы две группы кортежей: для тренировки нечеткой нейронной сети и для проверки натренированной сети на адекватность. Математическая модель показала свою эффективность при тестировании. Средняя величина ошибки составила  $9.6 \text{ кг/см}^2$  или 2%

Ключевые слова: система контроля качества, нечеткая логика, нейронные сети, прогнозирование, производство железобетонных изделий

### Введение

Одним из важнейших факторов роста эффективности производства является улучшение качества выпускаемой продукции или предоставляемой услуги. Повышение качества выпускаемой продукции расценивается в настоящее время как решающее условие её конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках.

Качество продукции относится к числу важнейших критериев функционирования предприятия в условиях относительно насыщенного рынка и преобладающей неценовой конкуренции. Повышение технического уровня и качества продукции определяет темпы научно – технического прогресса и рост эффективности производства в целом, оказывает существенное влияние на интенсификацию экономики, конкурентоспособность отечественных товаров и жизненный уровень населения страны.

Рост технического уровня и качества выпускаемой продукции является в настоящее время наиболее характерной чертой работы предприятий в промышленно развитых странах. В условиях преобладающей неценовой конкуренции и насыщенного рынка именно высокое качество продукции служит главным фактором успеха.

Предприятиям необходимо более эффективно использовать современные технические возможности воздействия на процесс формирования, обеспечения и поддержания необходимого уровня качества на всех стадиях жизненного цикла товара [1].

### Прогнозирование как элемент системы управления качеством

Процессный подход является одним из основополагающих требований, изложенных в стандарте МС ИСО 9001:2008. Под процессом понимается

совокупность взаимосвязанных ресурсов и деятельности, преобразующей входящие элементы в выходящие. Одной из известных реализаций “принципа постоянного улучшения” процесса является цикл Э. Деминга Plan-Do-Check-Act (P-D-C-A), представленный на рис. 1.

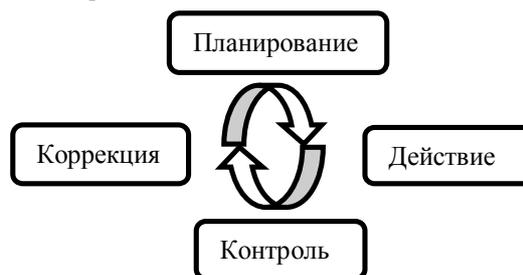


Рис. 1. Классический цикл Э. Деминга P-D-C-A

Классический цикл P-D-C-A в течение ряда лет является одним из основных методов принципа “постоянного совершенствования”, успешно применяемым организациями, практикующими процессный подход (рис. 2.).

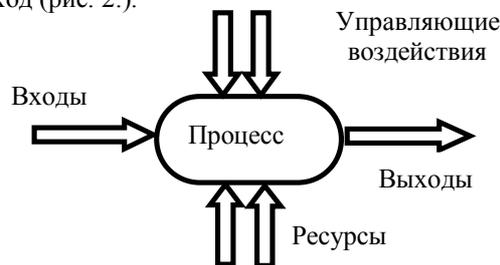


Рис. 2. Схема процесса

На этапе “Планирование” в рамках цикла P-D-C-A планируются управляющие воздействия, целью которых является приближение выходных параметров процесса к оптимальным.

Таким образом, формируется вектор управляющих воздействий  $X$  на процесс, результатом

Ткалич Сергей Андреевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: sergeytkalich@mail.ru  
Таратынов Олег Юрьевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: otaratynov@mail.ru

применения которых на выходе процесса формируется вектор фактических выходных параметров  $Y_{\text{факт}}$ , отличающийся от вектора оптимальных параметров  $Y_{\text{опт}}$ . На этапе “контроль” проводится анализ несоответствий, вычисляется расхождение фактических выходов процесса от оптимальных:

$$E = Y_{\text{опт}} - Y_{\text{факт}} \quad (1)$$

Очевидно, смысл цикла P-D-C-A заключается в минимизации вектора E. Теоретически, при выполнении бесконечного количества итераций цикла P-D-C-A  $E \rightarrow 0$ .

В условиях инновационной модели развития системы управления качеством необходима разработка методов снижения количества итераций цикла P-D-C-A, что позволит значительно сократить время вывода выходов процессов на оптимальные показатели, тем самым получив конкурентные преимущества.

Для более эффективной работы цикла Э. Деминга, необходимо включить современные методики прогнозирования, позволяющие заранее оценить эффективность мероприятий на стадии планирования [2].

Для решения поставленной проблемы предлагается использовать модернизированный цикл – P&P-D-C-A (рис. 3).

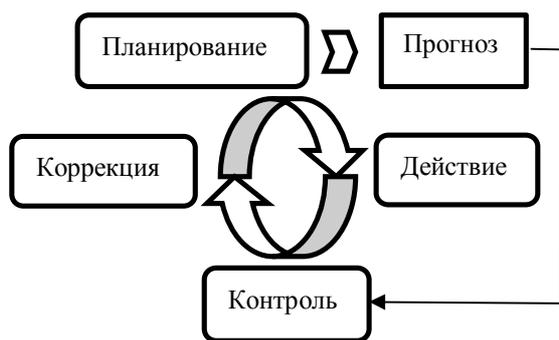


Рис. 3. Цикл Э. Деминга с прогнозированием состояния оптимизируемого процесса

На современном этапе развития математических методов предлагается использовать нейросетевые модели прогнозирования [3], лингвистические системы [4], а также термодинамический подход [5], в том числе с возможностью определения доминирующих параметров риска [6].

Прогнозирование с помощью нейронных сетей в чистом виде в настоящее время всё больше отходит на второй план, поскольку они обладают рядом недостатков и не обеспечивают существенного преимущества по сравнению с нечеткими лингвистическими и стохастическими моделями принятия решений [7, 8].

Особый интерес представляют искусственные нечеткие нейронные сети с обратным распространением ошибки. При этом, на начальном этапе формируются обучающие выборки из векторов  $X, Y_{\text{факт}}$ . Далее, после корректного обучения нейронной сети, появляется возможность оптимизировать выходные параметры процессов.

## Прогнозирование с помощью нейро-нечетких сетей

Наибольшее распространение в настоящее время получили архитектуры нечеткой нейросети вида ANFIS и TSK. Доказано, что такие сети являются универсальными аппроксиматорами. Сети данного типа получили свое название в силу того, что для аппроксимации зависимости выходного сигнала от входного вектора  $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$  в них используются выражения, заимствованные из нечетких систем (в частности, из систем Мамдани-Заде и Такаги-Сугено-Канга). Теоретически доказано, что эти выражения позволяют с произвольной точностью аппроксимировать любую непрерывную нелинейную функцию многих переменных суммой функций (называемых нечеткими) одной переменной [9].

В сети Такаги-Сугено-Канга (сокращенно, TSK) выходной сигнал рассчитывается с помощью выражения

$$y(X) = \frac{\sum_{i=1}^M w_i y_i(X)}{\sum_{i=1}^M w_i} \quad (2)$$

где  $y_i(x) = p_{i0} + \sum_{j=1}^N (p_{ij} x_j)$  -  $i$ -ый полиномиальный компонент аппроксимации,

$w_i$  - веса компонентов нейронной сети.

Веса  $w_i$  компонентов рассчитываются по следующей формуле (с использованием рациональной формы функции Гаусса)

$$w_i = \prod_{j=1}^N \mu_{ij}(x_j) = \prod_{j=1}^N \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{x_j - c_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^{2 * b_{ij}}} \right) \quad (3)$$

Приведенным выражениям соответствует пятислойная нейронная сеть, структурная схема которой представлена на рис. 4.

### Разработка системы управления качеством

При разработке системы управления качеством на предприятии важным элементом является доступность данных, полученных в результате контроля на основных этапах производственного цикла. До настоящего момента на многих предприятиях собранные данные записываются и хранятся на бумажных носителях - журналах учета. Это снижает скорость доступа к данным, и не позволяет анализировать их с применением ЭВМ и использовать в математических моделях без предварительной оцифровки. Следовательно, важным этапом повышения эффективности контроля качества является построение электронной базы данных, которая, в свою очередь, позволяла бы использовать накопленные эмпирические данные для анализа и прогнозирования [10].

Для построения базы данных использовались учетные журналы лаборатории входного контроля Лискинского предприятия «Спецжелезобетон». Была произведена оцифровка данных за период с янва-





2. Вода. Для высококачественного бетона используется только чистая вода без примесей. Соли, сульфаты, жиры и органические кислоты, содержащиеся в воде, влияют на процесс отверждения бетона и снижают общую прочность готового раствора. Поэтому для приготовления высококачественного раствора речную, грунтовую, торфяную или промышленную воду нужно заменить питьевой. И уж тем более не стоит использовать морскую воду.

3. Цемент. Наиболее важный компонент, являющийся вяжущим звеном. Чем мельче помол клинкера, тем выше марка бетона, а значит – его клеящая способность. Так же существенное влияние на качество бетона оказывает свойства цементного камня.

4. Крупный наполнитель. Свойства наполнителя влияют на напряжение, при котором начинается образование трещин при сжатии в той же степени, как и на предел прочности при изгибе, так что отношение между этими двумя величинами не зависит от свойств наполнителя. За исключением высокопрочного бетона, свойства наполнителя, особенно структура его поверхности, воздействуют на предел прочности при сжатии намного меньше, чем на предел прочности при растяжении или трещинообразующее напряжение при сжатии.

Таким образом, учитывая имеющиеся данные лаборатории входного контроля Лискинского завода «Спецжелезобетон», для прогнозирования прочно-

сти бетона предлагается контролировать следующие характеристики исходных компонентов:

- модуль крупности песка;
- количество зёрен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы в щебне;
- объемный вес цемента в уплотненном состоянии, отражающий крупность помола;
- предел прочности цементного камня на сжатие.

В качестве выходного параметра используется среднеарифметическая величина разрушающего воздействия по результатам трех экспериментов.

#### Построение математической модели на основе нейро-нечетких сетей

На основе имеющихся данных о параметрах исходных компонентов собранных за 4 месяца, а так же о результатах испытания образцов за этот же период, была сформирована база данных в среде MS Access. Вышеуказанная база данных использовалась для вычисления закономерностей, связывающих параметры исходных компонентов и прочность образцов приготовленных из них. Были сформированы две группы кортежей. Первая группа использовалась для тренировки нечеткой нейронной сети (результаты представлены на рис. 9). Вторая группа использовалась для проверки натренированной сети на адекватность (результаты представлены на рис. 10) [11].

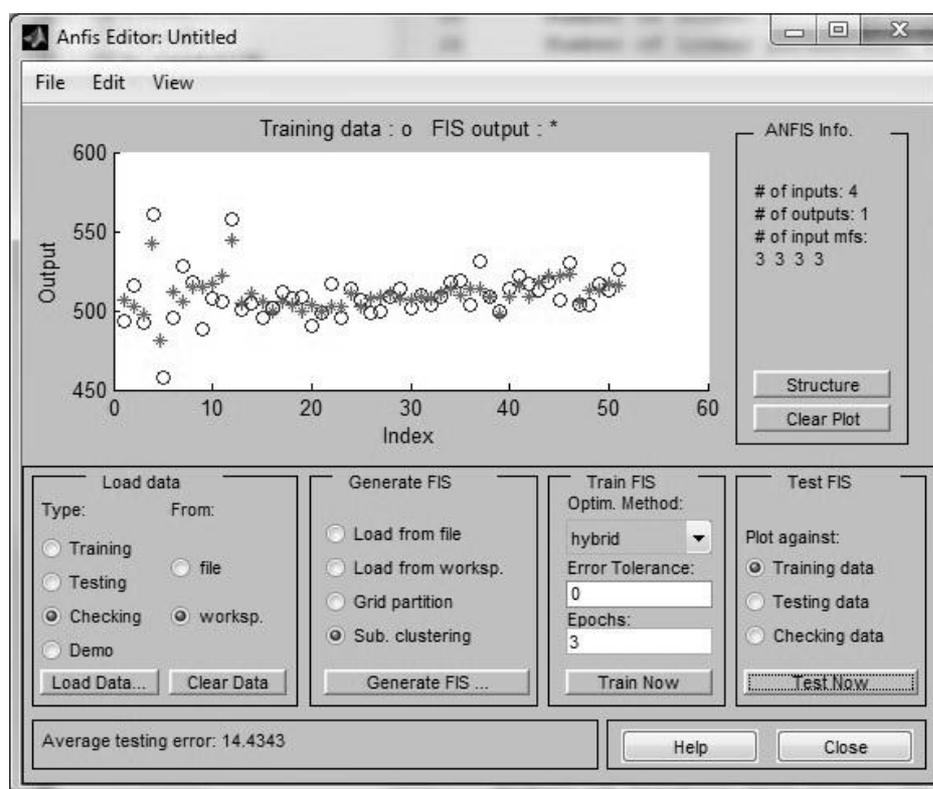


Рис. 9. Результаты тренировки нейронной сети

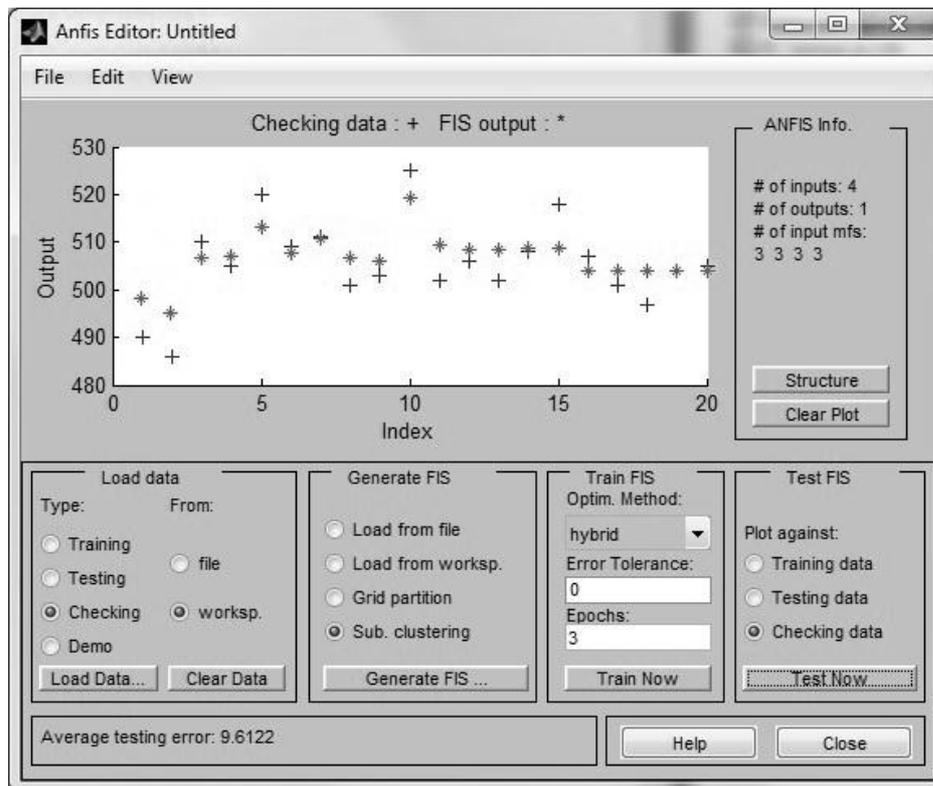


Рис. 10. Результаты проверки нейронной сети

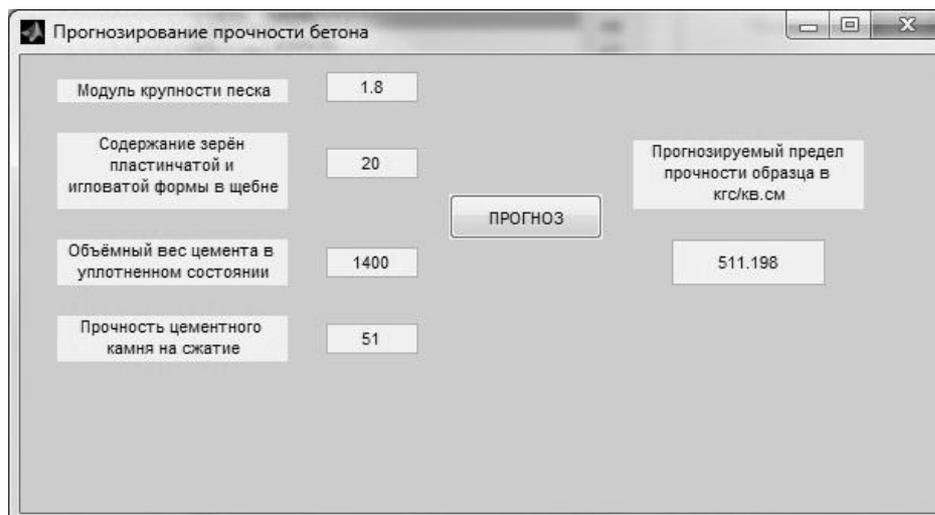


Рис. 11. Графический интерфейс пользователя

Для использования данной нечеткой нейронной сети в качестве модели прогнозирования и, таким образом, повышения качества выпускаемой продукции был разработан графический интерфейс пользователя, предоставляющий доступ к ресурсам сети (рис. 11).

Информация, полученная с помощью прогнозирования, основанного на математическом моделировании, позволяет корректировать ход процесса изготовления железобетонных изделий еще на стадии приготовления бетонной смеси и получать изделия с заданными характеристиками прочности.

### Выводы

На основании данных лаборатории входного контроля построена электронная база данных, включающая в себя данные контроля исходных компонентов бетонной смеси: песка, щебня и цемента.

Основным критерием, влияющим на качество ЖБИ, выбрана прочность бетона.

В качестве входных характеристик, влияющих на прочность, выбраны модуль крупности песка, количество зёрен пластинчатой (лещадной) и

игольчатой формы в щебне, объемный вес цемента, предел прочности цементного камня.

Данные испытаний на прочность регистрируются по величине разрушающей нагрузки.

Разработана система контроля качества на основе прогнозирования с применением математического моделирования, основанного на аппарате нечеткой логики и нейронных сетей.

Математическая модель показала свою эффективность при тестировании. Средняя величина ошибки составила 9.6 кг/см<sup>2</sup> или 2%.

#### Литература

1. Аристов О.В. Управление качеством: учебник / О.В. Аристов. – М.: БЕК, 2010. – 385 с.
2. Алексеева Е.В. Теория принятия решений / Е.В. Алексеева. – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008. 412 с.
3. Ткалич С.А. Нейросетевая модель процесса прогнозирования аварийной ситуации / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. - 2008. -Т. 33. -№3.1. -С. 196-200.
4. Ткалич С.А. Лингвистическая система прогнозирования аварийных ситуаций в производстве синтетических каучуков / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2009. -Т. 5. -№ 8. -С. 103-112.

5. Ткалич С.А. Термодинамический подход к прогнозированию аварийных ситуаций / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 33. № 3.1. С. 200-204.

6. Ткалич С.А. Определение доминирующих параметров риска в системах прогнозирования аварийных ситуаций/ С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010. -Т. 6. -№ 1. -С. 81-84.

7. Ткалич С.А. Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования / С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 2. С. 37-38.

8. Ткалич С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально-опасными производствами /С.А. Ткалич, В.П. Поваров, А.В. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014. -Т. 10. -№ 5.1. -С. 129-132.

9. Рутковская Д.А. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д.А. Рутковская. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 383 с.

10. Захаров В.Н. Современная информационная технология в системах управления / В.Н. Захаров // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2000. №1. С. 70-78.

11. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 736 с.

Воронежский государственный технический университет

## NEURO-FUZZY FORECASTING OF FIRMNESS OF THE REINFORCED CONCRETE MATERIALS

S.A. Tkalic<sup>1</sup>, O.Ya. Taratynov<sup>2</sup>

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

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

The article considers the possibility of applying modern forecasting techniques as an element of a quality management system. The object of research is a quality control system for the production of reinforced concrete products. To solve the problem, it was suggested to use the modernized E. Deming cycle with the prediction of the P & P-D-C-A state. The mathematical toolkit of artificial fuzzy neural networks with backward propagation of architectural errors of the form ANFIS and TSK is applied. The analysis of the factors influencing the strength of concrete is carried out. As input characteristics, the sand size modulus was chosen, the number of plaque and needle-shaped grains in the rubble, the bulk density of cement, the ultimate strength of the cement stone. As output parameter arithmetic mean value of the destroying influence by results of three experiments is used. The electronic database in the environment of MS Access on the basis of these registration logs of laboratory of incoming inspection of the enterprise is created. Two groups of tuples are created: for a training of an indistinct neural network and for check of the trained network on adequacy. The mathematical model showed the efficiency when testing. The average error value was 9.6 kg/cm<sup>2</sup> or 2%

Key words: Quality control system, fuzzy logic, neural networks, forecasting, production of reinforced concrete products

#### References

1. Aristov O.V. «Upravlenie kachestvom» [Quality Management]: Textbook. - Moscow: BEK, 2010. - 385 p.
2. Alekseeva E.V. «Teorija prinjatija reshenij» [The theory of decision making]. - M.: MSTU after N.E. Bauman, 2008. – 412 p.
3. Tkalic S.A. «Nejrosetevaja model' processa prognozirovaniya avarijnoj situacii» [Neural network model of process of prediction of a contingency situation], *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2008. Т. 33. №3.1. pp. 196-200.

4. Tkalic S.A. «Lingvističeskaja sistema prognozirovanija avarijnyh situacij v proizvodstve sintetičeskich kačukov» [Linguistic system of prediction of contingency situations in production of synthetic rubbers] // *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2009, Vol. 5, № 8, pp. 103-112.
5. Tkalic S.A. «Termodinamičeskij podhod k prognozirovaniju avarijnyh situacij» [Thermodynamic approach to forecasting emergency situations], *Control Systems and Information Technology*. 2008. T. 33. № 3.1. pp. 200-204.
6. Tkalic S.A. «Opredelenie dominirujuščih parametrov riska v sistemah prognozirovanija avarijnyh situacij» [Determination of the dominating risk parameters in systems of prediction of contingency situations], *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2010, Vol. 6, № 1, pp. 81-84.
7. Tkalic S.A., Vasiliev E.M. «Osnovanija i vozmožnosti ispol'zovanija iskusstvennyh nejrosetej v sistemah prognozirovanija» [Bases and possibilities of using artificial neural networks in forecasting systems], *Electrotechnical complexes and control systems*, 2008, № 2, pp. 37-38.
8. Tkalic S.A., Povarov V.P., Burkovskij A.V. «Modeli prinjatija rešenij v sistemah upravlenija potencial'no-opasnymi proizvodstvami» [Decision making models in control systems of potential-dangerous productions], *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2014, T. 10, № 5-1, pp. 129-132.
9. Rutkovskaja D.A. «Nejronnye seti, genetičeskie algoritmy i nečetkie sistemy» [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. - M.: Hot line-Telecom, 2006. – 383 p.
10. Zakharov V.N. «Sovremennaja informacionnaja tehnologija v sistemah upravlenija» [Modern Information Technology in Control Systems], *Izvestiya Akademii Nauk. Theory and control systems*, 2000, №1, pp.70-78
11. Leonenkov A.V. «Nečetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH» [Fuzzy modeling in the environment of MATLAB and fuzzyTECH].- SPb.: BVH-Petersburg, 2005. - 736 p.

**МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ  
ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО ПРОЦЕССА  
ВУЛКАНИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН**

**А.А. Митрохин, К.Ю. Гусев, В.Л. Бурковский**

Качество выпускаемой продукции является одним из важнейших критериев эффективности любого производства. Повышение качества выпускаемой продукции определяет степень выживаемости предприятия в условиях рынка, рост эффективности производства и экономии всех видов ресурсов, используемых на предприятии.

В данной статье в качестве исследуемого объекта рассматривается потенциально опасный процесс вулканизации в рамках производства автомобильных шин.

В статье формально описан технологический процесс вулканизации шин, а также проанализированы параметры, влияющие на качество выпускаемой продукции. В виде способа улучшения качества выпускаемой продукции предложено использовать аппарат нейронных сетей, который позволяет получить наиболее адекватные результаты для прогнозирования качества выпускаемой продукции по сравнению с традиционными математическими моделями.

Обоснована необходимость использования аппарата нейронных сетей применительно к процессу вулканизации для прогнозирования качества продукции, а также уменьшения экономических издержек

Ключевые слова: прогноз, опасное производство, вулканизация

**Введение**

В современных условиях в рамках систем управления потенциально опасными объектами, характер функционирования которых является сложно прогнозируемым, существенно повышаются требования к качеству и безопасности технологических процессов соответствующих производств. К таким производствам, в том числе относится производство автомобильных шин, в рамках которого наиболее определяющим является процесс вулканизации.

Несмотря на то, что в настоящее время в процессах вулканизации все чаще находят применение специальные средства защиты, возникновение нештатной ситуации все также может быть вызвано второстепенными факторами, которые могут негативно отразиться на качестве и безопасности выпускаемой продукции, выходящими за рамки управления объектом.

Наличие большого числа неконтролируемых источников внешних и внутренних возмущений в процессе управления технологическим процессом вулканизации шин, высокая динамика изменения состояния объектов управления, существенно усложняет производственные процессы.

Специфика потенциально опасных объектов управления, оказывающих существенное влияние

на качество, эффективность функционирования и безопасность технологических процессов.

Поэтому для более детального анализа проблематики прогнозирования качества готовой продукции более детально рассмотрим этап вулканизации сырой шины. Под вулканизацией принято понимать процесс, при котором пластичный каучук превращается в твердый материал, обладающий характерными свойствами резины, например, такими как эластичность.

Процесс вулканизации - это процесс, при котором заключенная в металлические формы резиновая смесь подвергается воздействию температуры и давления, требуемая температура вулканизации создается путем подачи пара, газа или горячей воды под высоким давлением. Данный этап выбран потому что, именно на данном этапе сырой шине придается правильный размер и конечная форма готового изделия, пригодного к эксплуатации. Вулканизация сырой шины осуществляется в специальных стальных пресс-формах, эти литые пресс-формы имеют полости, чтобы обеспечить доступ пара для нагрева без непосредственного контакта с изделием и обеспечивают внутреннюю циркуляцию пара, горячей воды и воздуха.

Процессу вулканизации свойственны узкие границы функционирования технологических параметров, которые определяются в первую очередь требованиями безопасности ведения процесса и качества выпускаемой продукции, эффективного управления за счет экономии ресурсов и энергоносителей, строгим контролем допустимых значений физических параметров управления с целью недопущения их выхода за пределы критических значений, обуславливающих пожароопасные и взрывоопасные состояния. В

---

Митрохин Алексей Александрович – ВГТУ, аспирант,  
e-mail: len4ikmitrohin@ya.ru

Гусев Константин Юрьевич – ВГТУ, канд. техн. наук,  
старший преподаватель, e-mail: gusev\_konstantin@mail.ru

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

связи со строгой взаимосвязью параметров управления и косвенных неконтролируемых факторов воздействия на последующее развитие процесса, качественное изменение регулирующих параметров требует включение в контур управления моделей, обеспечивающих прогноз динамики объекта, а также показателей качества и безопасности производимой продукции.

В этой связи к системам управления потенциально опасного процесса предъявляются повышенные требования надежности и безопасности.

Несмотря на повышенные требования, предъявляемые к надежности и безопасности в традиционных системах управления процессом вулканизации, отсутствуют устройства прогнозирования, что зачастую приводит к нештатной остановке технологического процесса, простая производства.

Поэтому применительно к системе управления потенциально опасного процесса вулканизации шин, для прогнозирования динамики показателей качества и безопасности производства продукции рекомендуется использовать аппарат, который позволяет получить наиболее адекватные результаты по сравнению с традиционными математическими моделями и алгоритмами управления. Системы нечеткого управления позволяют описывать качественные, неточные понятия, осуществлять анализ этих данных с целью получения новых параметров.

### Структура объекта

Исходной информацией при построении математических моделей управления процессами функционирования систем и объектов являются данные об известных входных и выходных величинах, т.е. параметры, влияющие на качество и безопасность производства продукции их изменению во времени, условиях работы, и целей функционирования.

Предлагается математическую модель объекта управления формулировать в виде множества величин, описывающих процессы в реальной системе. Введем в рассмотрение следующие величины:

входные воздействия:

$$x_i \in X, i = \overline{1, n_i} \quad (1)$$

выходные величины:

$$y_j \in Y, j = \overline{1, n_j} \quad (2)$$

воздействие внешней среды:

$$v_k \in V, k = \overline{1, m} \quad (3)$$

внутренние возмущения:

$$h_z \in H, z = \overline{1, m_z} \quad (4)$$

Тогда, состояние процесса функционирования может быть представлено в виде вектора:

$$\vec{y}(t) = F_z(\vec{X}, \vec{v}, \vec{h}_z, t) \quad (5)$$

Основываясь на вышеуказанных величинах описывающих процессы в реальном объекте, объект управления и воздействия, оказывающие влияние на процессы, протекающие в самом объекте, будет выглядеть следующим образом (рис. 1)

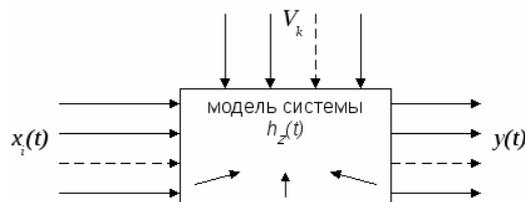


Рис. 1. Обобщенная структура объекта управления

Ниже приводятся результаты анализа технологического процесса вулканизации, который позволит определить управляемые параметры, влияющие на качество и безопасность производства продукции.

### Этапы технологического процесса

**Первый этап** процесса вулканизации загрузка сырой шины. На первом этапе технологического процесса вулканизации происходит загрузка сырой шины в вулканизационную камеру. Загрузка сырой шины осуществляется при помощи автоматизированного загрузчика. Загрузчик при помощи гидравлического цилиндра по специальному направляющим опускается на стойку для заготовки, при этом специальное устройство на корпусе загрузчика считывает индивидуальный штрих код сырой шины. Как только загрузчик достиг позиции захвата, производит разжатие специальных лопаток, т.е. захват шины, затем загрузчик вместе с сырой шиной поднимается в верхнее положение. Прежде чем загрузить сырую шину в вулканизационную камеру, происходит поднятие центрального механизма и открытие клапана для создания вакуума внутри резиновой диафрагмы на которую устанавливается сырая шина, когда центральный механизм достиг заданного значения, а в диафрагме нет давления загрузчик заводит шину в камеру и опускает ее на диафрагму, как только загрузчик установил шину на диафрагму начинается второй этап технологического процесса вулканизации.

**Второй этап** процесса вулканизации подача формовочного давления. На втором этапе процесса

вулканизации происходит подача давления, давления формовки которое обеспечивает статическое положение сырой шины, а также препятствует заминанию и деформации при закрытии пресс формы вулканизатора.

Процесс подачи формовочного давления осуществляется в две стадии (на некоторых моделях три стадии). На первой стадии давление формовки составляет 0.200 бар, после того как достигнуто давление формовки подается вторая стадия формовки при которой давление составляет 0.400 бар, после того как достигнуто давление второй стадии загрузчик отпускает шину и выходит из вулканизационной камеры и начинается третий этап технологического процесса вулканизации.

**Третий этап** процесса вулканизации закрытие вулканизационной камеры.

На данном этапе в действие приводятся маневровые цилиндры, которые производят закрытие вулканизационной камеры, т.е. опускание сегментной части пресс формы.

При закрытии пресс формы вулканизатора задаются три паузы на закрытия которые должны быть выдержаны для того чтобы сырая шина равномерно заполнила полости пресс формы.

**Четвертый этап** процесса вулканизации подача параметров (пар, азот). Как только сработали замки закрытия прессы, начинается отсчет времени вулканизации и происходит подача греющего пара давлением 14 бар. После вулканизации греющим паром подается азот давлением 24 бара и данный процесс происходит оставшееся время вулканизации.

**Пятый этап** открытие вулканизационной камеры. На данном этапе после завершения времени вулканизации происходит открытие прессы. Под действием все тех же маневровых цилиндров происходит поднятие сегментной части формы в верхнее положение, где происходит ее последующая фиксация специальными замками.

**Шестой этап** процесса вулканизации разгрузка вулканизированной шины. Заключительным этапом процесса вулканизации является процесс разгрузки вулканизированной шины. На данном этапе происходит поднятие центрального цилиндра и открытие клапана для создания вакуума внутри диафрагмы, как только вакуум создан, поднимается специальный отбойный цилиндр, который освобождает шины от нижней плиты пресс формы.

Как только отбойный цилиндр освободил шину от нижней плиты, происходит процесс разгрузки, автоматизированный загрузчик, заходит в вулканизатор и при помощи гидравлического цилиндра по специальным направляющим опускается для захвата шины. Как только загрузчик достигает, позиции захвата происходит разжатие лопаток и после этого загрузчик удаляет шину из вулканизационной камеры и отправляет ее на специальный конвейер для охлаждения, откуда она после охлаждения отправляется на сортировку.

Таким образом, структурно технологический процесс вулканизации автомобильных шин можно представить (рис. 2):

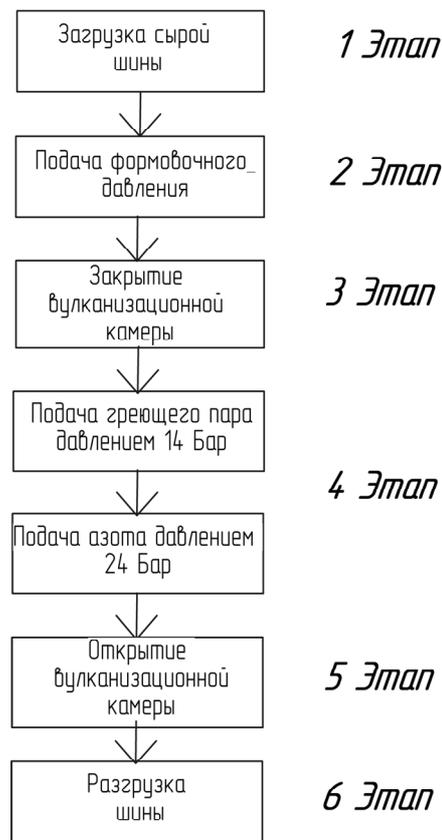


Рис. 2. Структурное представление технологического процесса вулканизации автомобильных шин

Процесс вулканизации является одним из важнейших этапов шинного производства, поэтому на данном этапе необходим максимально жесткий контроль всех параметров, который, как напрямую, так и косвенно, могут повлиять на качество будущей продукции. Проанализировав технологический процесс вулканизации, необходимо выделить параметры, влияющие на качественные характеристики шины в процессе ее вулканизации. Главным образом к этим параметрам относятся давление и температура. Поэтому рассмотрим оптимальные параметры температуры и давления, а также допуски для этих параметров, при которых происходит процесс вулканизации. Основным параметром температуры является температура пресс формы, так оптимальная температура плит составляет 178 градусов, допуск  $\pm 2$  градуса, а температура конусов 174 градуса, допуск  $\pm 2$  градуса.

Внутренняя температура в диафрагме создается паром и азотом под большим давлением. Если давление пара и газа в пределах допустимых значений, то и внутренняя температура диафрагмы оптимальна для данного процесса вулканизации. Так давление пара процесса вулканизации

составляет 14 бар допуск для данного параметра  $\pm 0.8$  бар, а давление азот 24 бар допуск  $\pm 1.0$  бар. Так же не менее важный параметр, это давление формовки на первой стадии 0.200 бар допуск  $\pm 0.1$  бар, вторая стадия 0.400 бар допуск  $\pm 0.1$  бар. При соблюдении всех выше перечисленных параметров вулканизированные шины имеют качественные показатели в пределах нормы.

### Математическая модель

Для построения модели управления и прогнозирования динамики качества готовой продукции необходимо определить функции принадлежности для определенных параметров процесса вулканизации. Для определения функции принадлежности будем использовать метод попарных сравнений. В связи с тем, что при различном объеме подаваемого пара все значения регулируемых параметров процесса вулканизации будут меняться, поэтому будем описывать каждый из параметров в терминах относительных отклонений от нормы.

Для параметра регулирования «температура плит пресс формы» построим функции принадлежности. Пусть максимально допустимое отклонение равно  $\Delta T_{\max} = \pm 2$ . Регламентированная температура плит пресс формы  $T_n = 174$ .

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

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

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

На основе полученных термов лингвистической переменной «Температура плит пресс формы» определим функции принадлежности термам данной лингвистической переменной. Для этого определим значения функции принадлежности терму «намного меньше», а полученные в результате вычисления результаты приведем в таблицу.

Значение функции принадлежности терму «намного меньше»

Значение	Степень соответствия
$T_n - \Delta T_{\max}$	1,000
$T_n - 0,75\Delta T_{\max}$	0,576
$T_n - 0,5\Delta T_{\max}$	0,353
0	0,175
$T_n + 0,5\Delta T_{\max}$	0,106
$T_n + 0,75\Delta T_{\max}$	0,085
$T_n + \Delta T_{\max}$	0,069

Полученные значения функций принадлежности параметра «температура плит пресс формы» терму «намного меньше» в

графическом виде выглядит следующим образом (рис. 3)

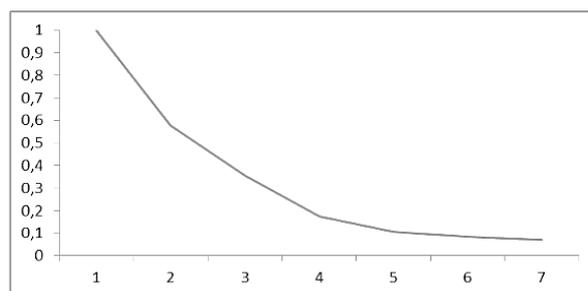


Рис. 3. Графическое представление функции принадлежности терму «намного меньше»

Аналогичным образом определим функции принадлежности остальных термов параметра «температура плит пресс формы».

В графическом представлении функции принадлежности термам лингвистической переменной «температура плит пресс формы» выглядят следующим образом (рис. 4).

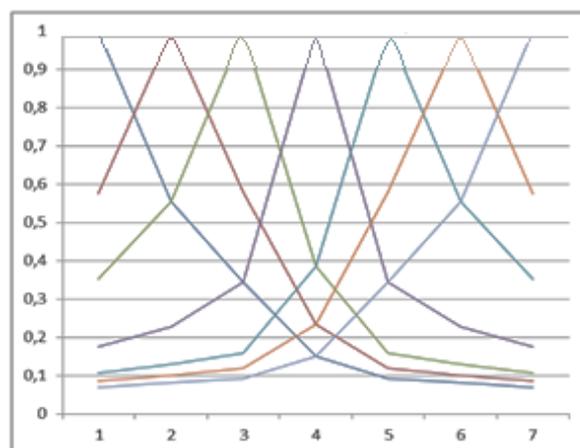


Рис. 4. Графическое представление функций принадлежности термам лингвистической переменной «температура плит пресс формы»

По аналогии с функциями принадлежности термов лингвистической переменной «температура плит пресс формы» определяют функции принадлежности других параметров процесса вулканизации влияющих не только на качество самого процесса, но и на качество и безопасность выпускаемой продукции.

### Заключение

Полученные в ходе исследования потенциально опасного процесса вулканизации основные параметры, влияющие на качество и безопасность продукции, образуют основу разработки моделей управления и прогнозирования динамики качества и безопасности готовой

продукции потенциально опасного процесса вулканизации.

Полученные параметры позволят не только формально описать объект исследования, а также позволит произвести моделирование и системный анализ для прогнозирования и управления потенциально опасным процессом вулканизации производства автомобильных шин.

В заключение следует отметить что, исследовав и проанализировав потенциально опасный процесс вулканизации шинного производства, пришли к выводу о необходимости использования аппарата который позволит получить наиболее адекватные результаты по сравнению с традиционными математическими моделями и алгоритмами управления.

#### Литература

1. Ифанов М.С. Устройство для вулканизации покрышек пневматических шин/ М.С. Ифанов, А.В. Федоров, А.М. Лобода //Открытия, изобр., пром. образцы, товарн. знаки. 1983. № 11. С. 107.

2. Бурковский В.Л. Нейросетевое моделирование динамики нелинейных объектов в условиях краткосрочного прогнозирования на основе аппарата нечеткой логики/ В.Л. Бурковский, К.Ю. Гусев. - Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2014. - 160 с.

3. Ткалич С.А. Исследование нейросетевой модели прогнозирования аварийных ситуаций процесса вулканизации/ С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский, Д.В. Котов//Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 10. - № 7. - С.15-29.

4. Ткалич С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально – опасными производствами/ С.А. Ткалич, В.П. Пивоваров, В.Л. Бурковский//Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5.1. - С.129-132.

5. Бурковский В.Л. Прогнозирование динамики потенциально опасных процессов на основе нейросетового моделирования/ В.Л. Бурковский, Э.Э. Чигбу, К.Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 5. - С.49-53.

6. Ткалич С.А. Концепция безаварийного управления на основе моделей прогнозирования состояния потенциально опасных технологических объектов/ С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский, О.Ю. Таратынов//Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 6. - С.79-86.

7. Чепелев М.С. Прогнозирование в управлении потенциально опасным объектом/ М.С. Чепелев, С.А. Ткалич, С.А. Чепелев// Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. №74. С. 326-337.

Воронежский государственный технический университет

## MODELS OF FORECASTING OF THE QUALITY OF PRODUCTS OF A POTENTIALLY HAZARDOUS PROCESS OF AUTOMOBILE TIRES VULCANIZATION

A.A. Mitrokhin<sup>1</sup>, K.Y. Gusev<sup>2</sup>, V.L. Burkovsky<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: len4ikmitrohin@ya.ru

<sup>2</sup>PhD, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: gusev\_konstantin@mail.ru

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

The quality of the products is one of the most important criteria of efficiency of any enterprise. That the quality and safety of products determines the degree of survival of the enterprise in the conditions of market, growth of production efficiency and economy of all resources used in the enterprise. Increasing the technical level and product quality determines the pace of technological progress, and increasing the efficiency of production in General, has a significant impact on intensification of the economy, the competitiveness of goods.

In this article, as the investigated object is considered potentially dangerous, the curing process for tire production.

The paper presents the technological process of vulcanization of the tire, and analyzed the parameters that affect the quality and safety of products. As a way to improve the quality and safety of products offered to develop a machine to predict the quality of products which allows you to get most appropriate results compared to traditional mathematical models and control algorithms.

Due to the necessity of use of the device in relation to the curing process to predict the quality and safety of future products and reduce economic costs

Key words: forecast, dangerous production, curing

## References

1. Ifanov M. S., Fedorov, A. V., Loboda A. M., etc. «The device for vulcanization of tires pneumatic tires». A. 1006261. — Open, Fig., prom. the samples recei. signs, 1983, № 11, pp. 107.
2. Burkovsky V. L., Gusev Yu. K. «Neural network modeling the dynamics of nonlinear objects in the conditions of short-term forecasting based on fuzzy logic». Voronezh. GOS.tehn. Univ. of Illinois - Voronezh: [b. 1.], 2014. - 160 p.: Il. - Bibliogr.: pp. 146-159.
3. Tkalich S.A., Burkovsky V. L., Kotov D. V. «Investigation of the neural network model of forecasting of emergency situations of the curing process», *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2010. - T. 10. - No. 7. - pp. 15-29.
4. Tkalich S. A., Pivovarov V. P., Burkovsky V. L. «Model decision making in control systems of potentially dangerous productions, *Bulletin of Voronezh state technical University*», 2014, vol. 10, No. 5-1. - pp. 129-132.
5. Chigbu E. E., Gusev Yu. K., Burkovsky V. L. «Prediction of the dynamics of potentially dangerous processes on the basis of neural modeling», *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2016, Vol. 12, No. 5. - pp. 49-53.
6. Tkalich S. A., Burkovsky V. L., Taratynov O. Yu. «The vision of accident-free control model-based forecasting of potentially dangerous technological objects», *Bulletin of Voronezh state technical University*, 2016, Vol. 12, No. 6, pp. 79-86.
7. Chepelev M. S., Tkalich S. A., Chepelev S. A. «Forecasting in the management of potentially dangerous object», *Polythematic network electronic journal of the Kuban state agrarian University*. 2011. No. 74. pp. 326-337.

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ “PUMA-560”

В.А. Медведев

В статье рассматриваются вопросы разработки и исследования исполнительного и тактического уровней микропроцессорной системы управления манипулятором “PUMA-560”. Представлена расчетная схема манипулятора, определено математическое описание манипулятора и исполнительных приводов как объекта управления. Разработаны алгоритм и программа моделирования исполнительного системы робота в системе MATLAB. Проведено моделирование динамических режимов манипулятора “PUMA-560” с приводами постоянного тока.

Разработан исполнительный уровень системы управления на основе шести модулей, выполненных на основе PIC-микроконтроллеров и обеспечивающих непосредственное цифровое управление двигателями манипулятора в соответствии с принципом подчиненного регулирования. Предусмотрено управление координатами по интерфейсу RS-485, а также с помощью дискретных и аналоговых сигналов. Обеспечены стабилизация скорости вращения каждого исполнительного двигателя на заданном уровне, а также отработка заданной траектории рабочего органа с использованием сигналов датчиков положения.

Разработан тактический уровень системы управления на основе персонального компьютера. Сформированы сигналы задания перемещений, скоростей и ускорений координат манипулятора по методу кубических сплайнов. Разработаны алгоритмы и программы интерполяции траектории и формирования управляющих сигналов при последовательном и параллельном перемещении координат манипулятора. Проведены экспериментальные исследования робота в режиме стабилизации скоростей координат и в режиме отработки заданной траектории рабочего органа

Ключевые слова: робот, манипулятор, динамическая модель, исполнительная система робота, тактический уровень управления

**Введение**

Системы управления манипуляторами (в частности, устройство “Сфера-36”), разработанные в 80-е годы прошлого века, содержали большое количество микросхем малой и средней степени интеграции и поэтому имели большие габариты, требовали значительных затрат денежных средств на профилактику и ремонт, потребляли большое количество электроэнергии. Микропроцессорные системы управления позволяют решить все эти проблемы.

Создание новой системы управления манипулятором “PUMA-560” связано с разработкой его расчетной модели, алгоритмов и программ моделирования динамики робота, интерполяции траектории и формирования управляющих сигналов при последовательном и параллельном перемещении координат манипулятора, а также аппаратной реализацией исполнительного и тактического уровней управления.

**Основная часть.** Моделирование динамики манипулятора “PUMA-560” как объекта управления основывается на его полной динамической модели с учетом сил инерции, взаимовлияния звеньев, а также сил тяжести.

Манипулятор содержит шесть звеньев, связанных вращательными сочленениями. Звенья манипулятора представим твердыми телами, описываемыми множествами кинематиче-

ских параметров  $K_i$  и динамических параметров  $D_i$  [1]. Индекс  $i$  – порядковый номер звена в цепи, считая от опоры к схвату.

Множества  $K_i$  и  $D_i$  определим в соответствии с методом Ньютона-Эйлера как

$$K_i = (\tilde{e}_i, \tilde{e}_{i+1}, \tilde{r}_{ii}, \tilde{r}_{i,i+1}), \quad D_i = (m_i, \tilde{J}_i), \quad (1)$$

где  $\tilde{e}_i$  – единичный вектор оси  $i$ -го сочленения;  
 $\tilde{e}_{i+1}$  – единичный вектор оси  $i+1$ -го сочленения;

$\tilde{r}_{ii}$  – вектор, проведенный от центра  $i$ -го сочленения к центру масс  $i$ -го звена;

$\tilde{r}_{i,i+1}$  – вектор, проведенный от центра  $i+1$ -го сочленения к центру масс  $i$ -го звена;

$m_i$  – масса  $i$ -го звена;

$\tilde{J}_i = (J_{i1}, J_{i2}, J_{i3})$  – диагональная матрица размера  $3 \times 3$ , содержащая главные моменты инерции  $i$ -го звена.

Векторы определяются по отношению к локальной системе координат. Это декартова система координат, связанная с центром масс звена и имеющая оси, ориентированные вдоль его главных осей инерции. Единичные векторы этих осей будем обозначать как  $x_i, y_i, z_i$ .

Будем учитывать динамику первых трех степеней подвижности, имеющих наибольшие габариты и вес. Расчетная схема манипулятора с кинематическими параметрами и ортами локальных систем координат приведена на рис. 1.

Относительное положение звеньев определяется обобщенными координатами  $q_1, \dots, q_n$  манипулятора.

Динамическая модель манипулятора по методу Ньютона-Эйлера представляется в виде [2]

Медведев Владимир Алексеевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8 (473) 278-43-05, e-mail: va.medved60@yandex.ru

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}(\mathbf{q}, \mathbf{d})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{B}(\mathbf{q}, \mathbf{d})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{d}), \quad (2)$$

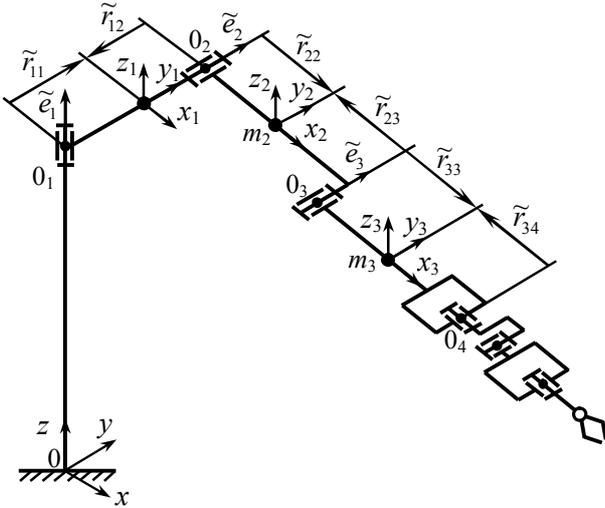


Рис. 1. Расчетная схема манипулятора PUMA-560 где  $\mathbf{P}$  – вектор-столбец размера  $n$  обобщенных сил;

$\mathbf{A}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$  – матрица размера  $n \times n$  инерции системы;

$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^T$  – вектор-столбец размера  $n$  обобщенных координат;

$\mathbf{d}$  – вектор, содержащий геометрические и динамические параметры механизма (длины звеньев, массы, моменты инерции и т.д.);

$\ddot{\mathbf{q}} = [\ddot{q}_1, \dots, \ddot{q}_n]^T$  – вектор-столбец размера  $n$  ускорений обобщенных координат;

$\dot{\mathbf{q}}^T = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]$  – вектор-строка размера  $n$  скоростей обобщенных координат;

$\mathbf{B}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$  – матрица размера  $n \times n \times n$ , учитывающая взаимовлияние звеньев;

$\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T$  – вектор-столбец размера  $n$  скоростей обобщенных координат;

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$  – вектор-столбец сил тяжести.

Динамическая модель привода постоянного тока для перемещения звена манипулятора с номером  $i$  формировалась в виде [3]:

$$\dot{y}_i = D_i(\theta_i)y_i + b_i(\theta_i)U_i + f_i(\theta_i)M_{ni}, \quad (3)$$

где  $y_i, \dot{y}_i$  – вектор состояния  $i$ -го привода и его первая производная по времени;

$D_i(\theta_i)$  – матрица подсистемы;

$b_i(\theta_i)$  – вектор преобразования управляющего сигнала;

$U_i$  – управляющий сигнал на привод  $i$ -й координаты;

$f_i(\theta_i)$  – вектор преобразования нагрузки;

$M_{ni}$  – нагрузка на валу  $i$ -го двигателя.

Совокупность уравнений динамики механической части робота и динамических моделей исполнительных приводов представляет

собой полную динамическую модель манипулятора как объекта управления.

Моделирование динамики манипулятора “PUMA-560 проводилось в системе MATLAB с помощью программного средства [4] в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Вводились кинематические и динамические параметры манипулятора: количество степеней подвижности  $n$ , типы сочленений  $\zeta_i$ , орты локальных систем координат  $x_i, y_i, z_i$ , единичные векторы  $\tilde{e}_i$  осей сочленений, радиус-векторы  $\tilde{r}_{ii}, \tilde{r}_{i,i+1}$ , массы  $m_i$  и диагональные матрицы  $\tilde{J}_i$  инерции звеньев.

2. Вводились параметры электроприводов: моменты инерции  $\bar{J}_i$  якорей двигателей, коэффициенты пропорциональности по моменту  $k_{mi}$  и противо-ЭДС  $k_{ei}$ , индуктивности  $L_i$  и активные сопротивления  $R_i$  якорных цепей.

3. Вводились параметры требуемой траектории: количество степеней подвижности  $n$ , число опорных точек  $m$ , значения обобщенных координат  $q_{зад i}$  в опорных точках, максимально-допустимые скорости координат  $\dot{q}_{max i}$ , начальные значения обобщенных координат и их скоростей  $q_i(0), \dot{q}_i(0)$ .

4. Формировались векторы заданных значений перемещений  $q_{зад i}(t)$ , скоростей  $\dot{q}_{зад i}(t)$  и ускорений  $\ddot{q}_{зад i}(t)$  обобщенных координат.

5. Рассчитывались параметры матриц уравнения динамики (2) исходя из векторов текущих значений обобщенных координат  $\mathbf{q}$  и скоростей  $\dot{\mathbf{q}}$ . При этом учитывались взаимовлияние звеньев [матрица  $\mathbf{B}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$ ], гравитационные силы [вектор  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$ ], изменение моментов инерции при движении робота [в матрице  $\mathbf{A}(\mathbf{q}, \mathbf{d})$ ].

6. Определялись вектор  $\mathbf{P}_{зад}$  требуемых значений обобщенных сил в сочленениях манипулятора, а также векторы управляющих токов  $\mathbf{I}$  и напряжений  $\mathbf{U}$ .

Исполнительный уровень системы построен на основе шести модулей управления координатами, каждый из которых имеет в своем составе PIC-микроконтроллер и широтно-импульсный преобразователь, обеспечивая непосредственное цифровое управление двигателем постоянного тока.

Микроконтроллер каждой координаты выполняет функции сравнивающего устройства, корректирующего устройства, устройства для обработки информации с импульсного датчика скорости и потенциометрического датчика по-

ложения. Он позволяет реализовать позиционное и контурное управление манипулятором.

Функциональные возможности микропроцессорной системы управления манипулятором "PUMA-560": управление двигателями координат по интерфейсу RS-485 или с помощью дискретных и аналоговых сигналов; стабилизация скорости вращения каждого двигателя на заданном уровне; отработка заданной траектории движения с использованием сигналов датчиков положения; программная настройка параметров ПИД-регуляторов по интерфейсу RS-485.

На первом этапе исследований оценивалось влияние структуры и параметров модулей управления координатами на показатели функционирования электроприводов.

В режиме стабилизации скорости наилучшие статические и динамические характеристики получены при организации обратной связи по сигналам импульсного датчика. При вращении координат манипулятора в вертикальном направлении и изменении моментов, обусловленных силами гравитации, от максимального значения до нуля достигалась стабилизация их скоростей на требуемых уровнях при определенных настройках ПИД-регуляторов.

На втором этапе проводились исследования в режиме отработки заданной траектории. Сигналы задания обобщенных координат манипулятора формировались на основе разработанного алгоритма интерполяции [5].

В соответствии с требованиями к траектории манипулятора, состоящей из одиннадцати участков, формировался массив заданных значений обобщенных координат  $q_{зад i}$  в опорных точках. Формирование сигналов задания перемещений координат между опорными точками осуществлялось по методу кубических сплайнов [6], [7] с помощью разработанной программы интерполяции.

Каждый участок траектории разбивался на  $m$  временных интервалов между опорными точками. Траектория манипулятора формировалась с учетом следующих ограничений.

1. Условие непрерывности и приближения кубического сплайна (сигнала задания перемещения) в опорных точках:

$$\begin{aligned} P_{i,s3}(t_s) &= P_{i,s+1,3}(t_s), & s &= 1, 2, \dots, m-1, \\ P_{i,13}(t_0) &= q_{i,0}, & P_{i,s3}(t_s) &= q_{i,s}, & s &= 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $i$  – номер обобщенной координаты манипулятора;

$s$  – номер текущего временного интервала между опорными точками.

2. Условие непрерывности первой производной по времени от кубического сплайна (сигнала задания скорости) в опорных точках:

$$\dot{P}_{i,s3}(t_s) = \dot{P}_{i,s+1,3}(t_s), \quad s = 1, 2, \dots, m-1, \quad (5)$$

3. Условия непрерывности второй производной по времени от кубического сплайна (сигнала задания ускорения) в опорных точках:

$$\ddot{P}_{i,s3}(t_s) = \ddot{P}_{i,s+1,3}(t_s), \quad s = 1, 2, \dots, m-1, \quad (6)$$

Кроме того, обеспечивалось выполнение граничных условий для скорости и ускорения в начале и конце участка траектории:

$$\dot{P}_{i,13}(t_0) = \dot{P}_{i,m3}(t_m) = 0, \quad (7)$$

$$\ddot{P}_{i,13}(t_0) = \ddot{P}_{i,m3}(t_m) = 0. \quad (8)$$

Одновременное выполнение условий (7) и (8) невозможно при использовании только кубических сплайнов: ограничений на траекторию оказывается больше, чем определяемых параметров. Поэтому задача интерполяции решалась с граничными условиями (7), а возникающие при этом ненулевые ускорения устранялись путем добавления на первом и последнем интервалах полиномов пятого порядка.

После формирования требуемой траектории выдача задающих воздействий на исполнительные приводы осуществлялась в режиме реального времени. На рис. 2 и рис. 3 представлены сигналы задания перемещений (кривые 1) и фактические перемещения (кривые 2) степеней подвижности манипулятора, двигающихся в вертикальном направлении.

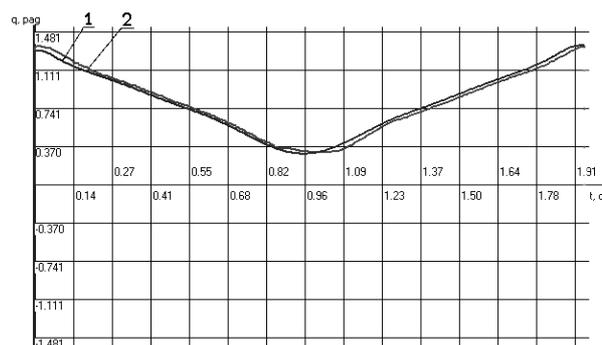


Рис. 2. Временные диаграммы заданных и фактических перемещений третьей степени подвижности манипулятора

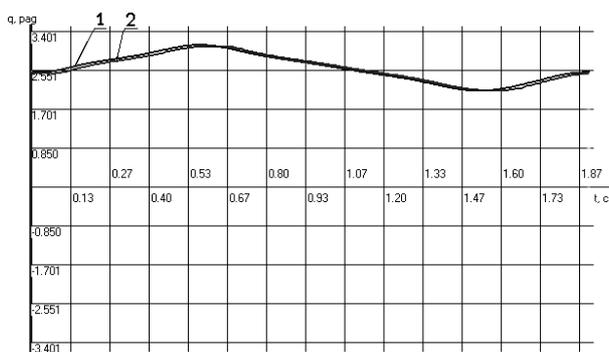


Рис. 3. Временные диаграммы заданных и фактических перемещений пятой степени подвижности манипулятора

### Заключение

Использование метода Ньютона-Эйлера обеспечивает вычислительную эффективность уравнений, связывающих управляющие моменты в сочленениях с кинематическими, динамическими параметрами звеньев и переменными состояния манипулятора.

Результаты экспериментальных исследований показывают высокую точность отработки заданных траекторий робота в условиях действия динамических эффектов, связанных с ускоренным движением звеньев и взаимовлия-

нием координат, а также гравитационных сил и моментов.

### Литература

1. Медведев, В.А. Моделирование роботов и РТС: учеб. пособие / В.А. Медведев. – Воронеж : ГОУ ВПО «Воронеж. гос. техн. ун-т», 2010. – 106 с.
2. Медведев, В.А. Моделирование динамики манипулятора с произвольной кинематической схемой / В.А. Медведев, А.А. Новиков // Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации : межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 1999. – С. 139-142.
3. Медведев, В.А. Моделирование и исследование роботов и РТС: учеб. пособие / В.А. Медведев. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – 104 с.
4. Медведев В.А. Свидетельство о регистрации программного средства «Моделирование динамики манипулятора с произвольной системой координат» в Государственном фонде алгоритмов и программ, ВНИИЦ, инвентарный номер 50200200107 от 11.03.02.
5. Контурное управление манипулятором с угловой системой координат / А.И. Шиянов, В.А. Медведев, А.И. Семенов, М.Р. Калядин// Электричество. –1998. – № 5. – С. 40-42.
6. Медведев, В.А. Управление роботами и РТС: учеб. пособие / В.А. Медведев, А.И. Шиянов. – Воронеж : ГОУ ВПО «Воронеж. гос. техн. ун-т», 2010. – 228 с.
7. Медведев, В.А. Управление роботами: учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Медведев, А.И. Шиянов. – Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. – 187 с.

Воронежский государственный технический университет

## MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR "PUMA-560" MANIPULATOR

V.A. Medvedev

PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: va.medved60@yandex.ru

In article questions of development and research of executive and tactical levels of a microprocessor control system by manipulator "PUMA-560" are observed. The calculated scheme of the manipulator is developed. The mathematical description of the manipulator and executive drives as object of control is determined. The algorithm and the program of simulation of executive system of the robot in system MATLAB are developed. Simulation of dynamic regimes of manipulator "PUMA-560" with direct-current drives is lead.

The executive level of a control system is developed on the basis of six modules executed on the basis of PIC-microcontrollers and providing immediate digital control by motors of the manipulator according to a principle of subordinated regulating. Control by coordinates is carried out on interface RS-485, and also with the help of discrete and analogue signals is stipulated. The speed hold of twirl of each actuating motor at the given level, and also improvement of a set trajectory of the tool with use of signals of position sensor is provided.

The tactical level of a control system is developed on the basis of a personal computer. Signals of the job of a positions, speeds and accelerations of coordinates of the manipulator on the method of cubic splines are generated. Algorithms and programs of interpolation of a path and formation of control signals are developed at consecutive and parallel moving of coordinates of the manipulator. Experimental researches of the robot in a regime of stabilization of speeds of coordinates and in a regime of improvement of a set trajectory of the tool are lead

Key words: the robot, the manipulator, dynamic model, executive system of the robot, tactical level of control

#### References

1. Medvedev V.A. «Simulation of robots and RTS»: study aid, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2010, 106 p.
2. Medvedev V.A., Novikov A.A. «Simulation of dynamic behavior of the manipulator with the any cinematic scheme» // The analysis and designing of means of a robotics and automations: The interuniversity collection of proceedings, Voronezh, Voronezh State Technical University, 1999, pp. 139-142.
3. Medvedev V.A. «Simulation and research of robots and RTS»: study aid, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2005, 104 p.
4. Medvedev V.A. Certificate about registration of a software “Simulation of dynamic behavior of the manipulator with any coordinate systems” in the State fund of algorithms and programs, VNTIC, accession number 50200200107 from 11.03.02.
5. Shijanov A.I., Medvedev V.A., Semenov A.I., Kaljadin M.R. «Trajectory control of a manipulator with an angular coordinate system», *Electricity*, 1998, № 5, pp. 40-42.
6. Medvedev V.A., Shijanov A.I. «Control by robots and RTS» : study aid, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2010. - 228 p.
7. Medvedev V.A., Shijanov A.I. «Control by robots study aid for students of high schools», Voronezh, Voronezh State Technical University, 2003, 187 p.

## СИСТЕМА НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ 3D-СЕТИ В УСЛОВИЯХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский**

Статья посвящена разработке системы управления робототехническим комплексом для экстремальных условий внешней среды. В качестве объекта управления рассмотрен РТК для проведения ремонтных работ на АЭС. Экстремальные условия внешней среды могут оказать серьезное негативное влияние на робототехнический комплекс. Под экстремальными условиями подразумеваются два типа факторов: природные (температура, давление, разреженность воздуха т.д.) и антропогенные (ионизирующая радиация, магнитные и электрические поля, различные перегрузки). Для преодоления подобных негативных факторов системы РТК должны обладать гибкостью и быть интеллектуальными. Описано техническое устройство основных подсистем РТК. Из-за суровых специфических условий работы РТК должен обладать большой надежностью, поэтому за основу архитектуры системы управления в рамках статьи взят принцип гибридного параллельного нейруправления. Рассмотрена типичная схема на основе этой архитектуры и переработана в соответствии с реалиями объекта управления. Разработана и описана по пространственным слоям 3D нейронная сеть нейроконтроллера. Описанный в рамках статьи подход к разработке систем управления позволяет добиться значительной оптимизации и устойчивости всей работы системы, а использование «обычного» контроллера в паре с нейроконтроллером повышает надежность и отказоустойчивость системы управления и РТК в целом

Ключевые слова: нейруправление, робототехника, экстремальные условия, нейронные сети, оптимизация

### Введение

Разработка адекватной и устойчивой системы управления практически любым промышленным объектом — трудоемкая и нетривиальная задача, требующая учета огромного количества различных внешних факторов и особенностей объекта управления. Совершенно очевидно, что осуществить прогноз динамики всех возможных внешних воздействий и их влияние на объект управления невозможно. Для решения данной задачи предлагается при разработке системы управления использовать искусственные нейронные сети.

### РТК как объект управления

Рассмотрим в качестве объекта управления РТК, предназначенный для проведения радиационной разведки и ремонтных работ на АЭС. Основными негативными факторами в этом случае будут ионизирующее излучение (до 1 зиверта/час) и возможные крайне суровые климатические условия эксплуатации РТК (влажность до 75%, диапазон рабочих температур от -30 до 45 градусов). Технически РТК представляет собой систему, состоящую из двух блоков. Блок управления стрелой РТК: управление стрелой осуществляется посредством 13 дискретных и 2 пропорциональных гидравлических

распределителей — регуляторов расхода осуществлять движение стрелы робототехнического комплекса с заданной скоростью. С точки зрения электромеханики дискретные гидравлические распределители — это электромагниты, отпирающие и запирающие гидравлические клапаны между двумя гидравлическими линиями. Управление дискретными гидравлическими распределителями осуществляется с помощью подачи питания на один из разъемов. Подача питания на оба разъема может привести к «залипанию» гидравлического клапана. Для управления регуляторами расхода применяется специализированный электронный блок управления, генерирующий по заданным программным условиям ШИМ. Электронный блок EDM-M 3112 — цифровой усилитель без обратной связи. Блок управления подает на регуляторы расхода ток, прямо пропорциональный опорному сигналу. Блок управления, как и регуляторы расхода, получают энергоснабжение от отдельной энергосети с более высоким рабочим напряжением. Каждый дискретный гидравлический распределитель отвечает за свое движение стрелы и одновременно требует включение одного из двух регуляторов расхода. Для удобства все распределители разделены на два блока: 4 секционный и 6 секционный блок соответственно. Для удобства использования и соблюдения ТБ при эксплуатации РТК главный цилиндр стрелы, отвечающий за ее подъем дополнительно оснащается преобразователем давления ПР-Д — выполняющим функции измерителя давления в диапазоне от 0 до 40

Бочаров Владимир Жанович — ЗАО МГК «Интехрос», инженер-радиоэлектроник, бакалавр, e-mail: dr.bocharoff@yandex.ru

Бурковский Виктор Леонидович — ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Мпа. Этот датчик позволяет выяснить, не превышена ли максимальная грузоподъемность стрелы. Блок управления ходовой частью, совмещенный с главными насосами и двигателем, обеспечивает рабочее давление в гидросети всей установки, а также позволяет выполнять горизонтирование всего робототехнического комплекса, как в ручном, так и автоматическом режимах, а также осуществлять движение на гусеничном ходу. Весь блок установлен на неподвижной части робототехнического комплекса. Модуль оснащен 16 дискретными и 2 пропорциональными гидравлическими распределителями. В отличие от системы управления стрелой — подача управляющего сигнала ШИМ осуществляется без использования электронного блока управления EDM-M. Автоматизированная система горизонтирования (АСГ) - электронная система, предназначенная для автоматического выравнивания инженерной платформы относительно горизонта. Благодаря внедрению АСГ в РТК управления аутригерами платформы как в ручном режиме, определяя ход каждой из опор по отдельности, так и в автоматическом, когда система самостоятельно определяет необходимую высоту выдвижения опор. Система горизонтирования обеспечивает функционирование гусеничного хода всей машины, для чего выделены 2 гидравлических распределителя.

### Архитектура системы управления

Возьмем за основу архитектуры бедующей системы управления РТК гибридное параллельное нейруправление. Методы этой архитектуры подразумевают параллельное управление, как от обычного, так и от нейроконтроллера, что позволяет добиться значительной оптимизации всей системы и ее устойчивости при возникновении «неизвестных» внешних возмущений.

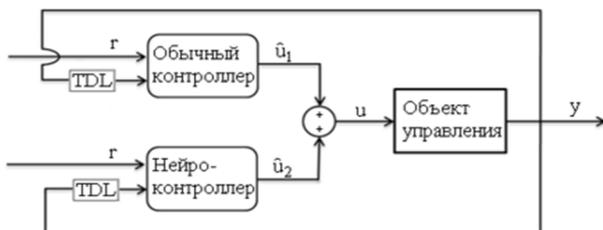


Рис. 1. Структурная схема параллельного нейруправления

На схеме приведена типичная гибридная система нейруправления. Учитывая

специфику объекта управления, для которого мы разрабатываем систему управления, необходимо внести ряд изменений: РТК оснащен рядом датчиков (акселерометры, преобразователи давления, датчики температуры, уровня и т.д.), правильная интерпретация показателей которых в значительной мере будет влиять на выходные сигналы от системы управления. При этом обратная связь для «обычного» контроллера не потребуется — ее обработкой будет заниматься нейроконтроллер.

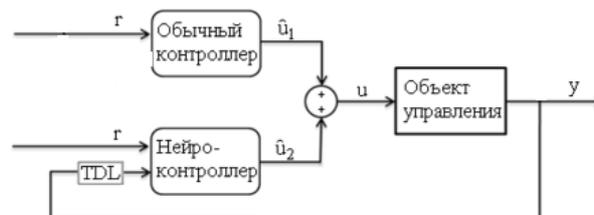


Рис. 2. Структурная схема системы управления

«Обычный» контроллер — в данном случае STM32F103C8T, получает команды и направляет их к сумматору, на котором входные данные и данные обратной связи от объекта управления, обработанные нейроконтроллером, складываются и передаются для исполнения на объект управления. Таким образом, удастся значительно уменьшить нагрузку на основной контроллер и повысить качество работы системы управления в целом.

### Нейроконтроллер

Главная составляющая, разрабатываемой системы управления, — нейроконтроллер. Аппаратно — это аналогичный «обычному» контроллеру, STM32F103C8T. В данном случае логика управления представляет собой трехмерную искусственную нейронную сеть. Каждый из пространственных слоев отвечает за свой логический процесс или датчик. При этом все пространственные слои объединены одним выходным нейроном, формирующий общий вектор управления, и группой входных нейронов. Рассмотрим пространственные слои нейроконтроллера (любой пространственный слой можно расценивать как самостоятельную нейронную сеть).

1. Слой обработки показаний акселерометров: гусеничная платформа РТК оснащена акселерометром, отвечающим за пространственное положение рамы. Данные от

акселерометра обрабатываются, конвертируются в углы отклонения от нормали

и в дальнейшем используются для корректировки управляющего вектора.

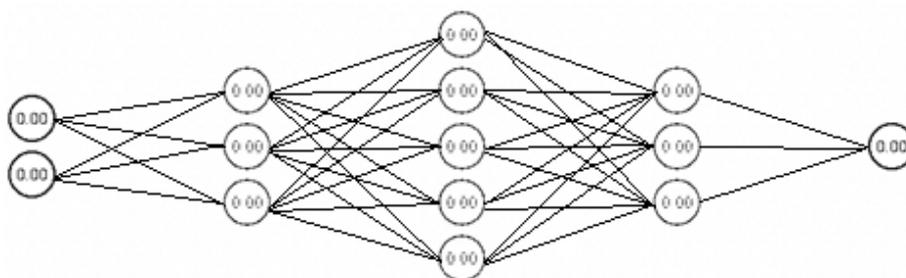


Рис. 3. Нейронная сеть пространственного слоя управления акселерометрами

2. Слой работы с датчиками давления: нейронная сеть этого слоя интерпретирует измерения с датчиков давления и передает

данные о корректировке управляющего вектора.

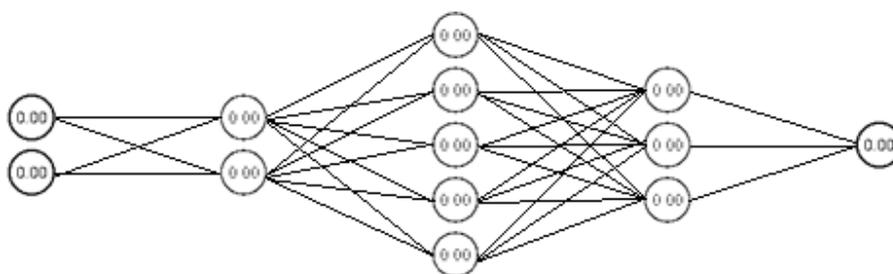


Рис. 4. Нейронная сеть пространственного слоя обработки датчиков давления

3. Слой обработки показаний с дискретных датчиков: нейронная сеть этого слоя, используя показания с дискретных

датчиков (датчик уровня масла и два датчика температуры) вносит поправки в вектор управления.

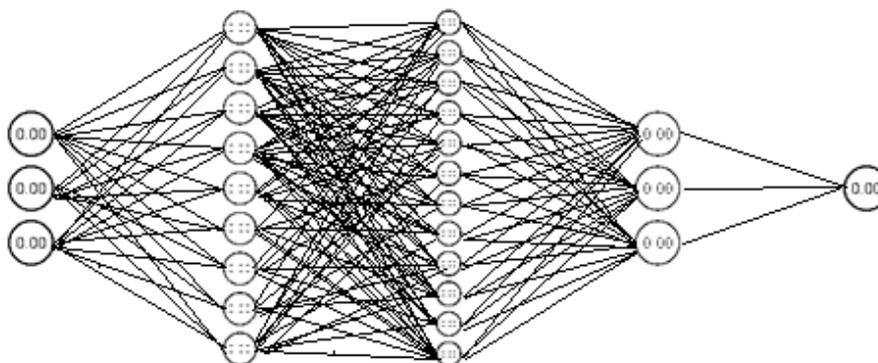


Рис. 5. Нейронная сеть пространственного слоя работы с дискретными датчиками

4. Слой обратной связи: данный слой обрабатывает входные команды оператора и

накладывает на них данные обратной связи от объекта управления.

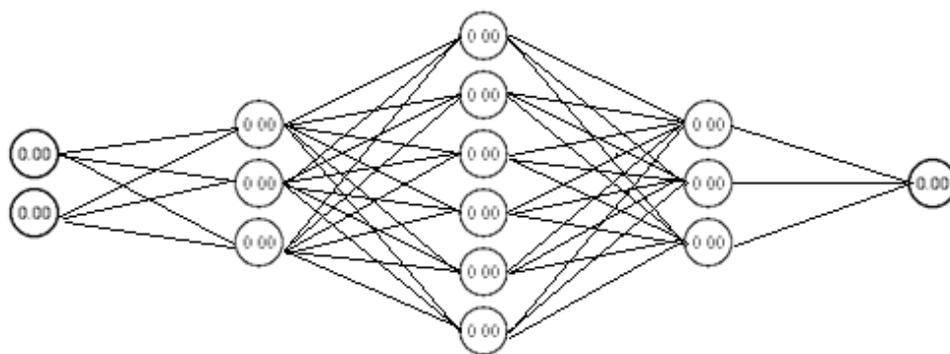


Рис. 6. Нейронная сеть обработки команд пользователя и обратной связи

5. Выходной пространственный слой: интерпретирует их и создает управляющий вектор, который передается на сумматор. нейронная сеть этого слоя собирает данные от всех остальных пространственных слоев,

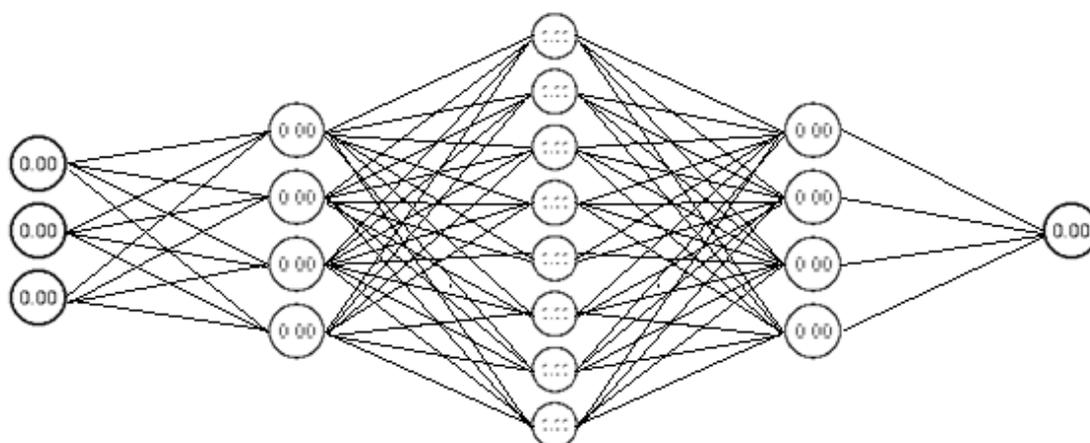


Рис. 7. Нейронная сеть выходного слоя

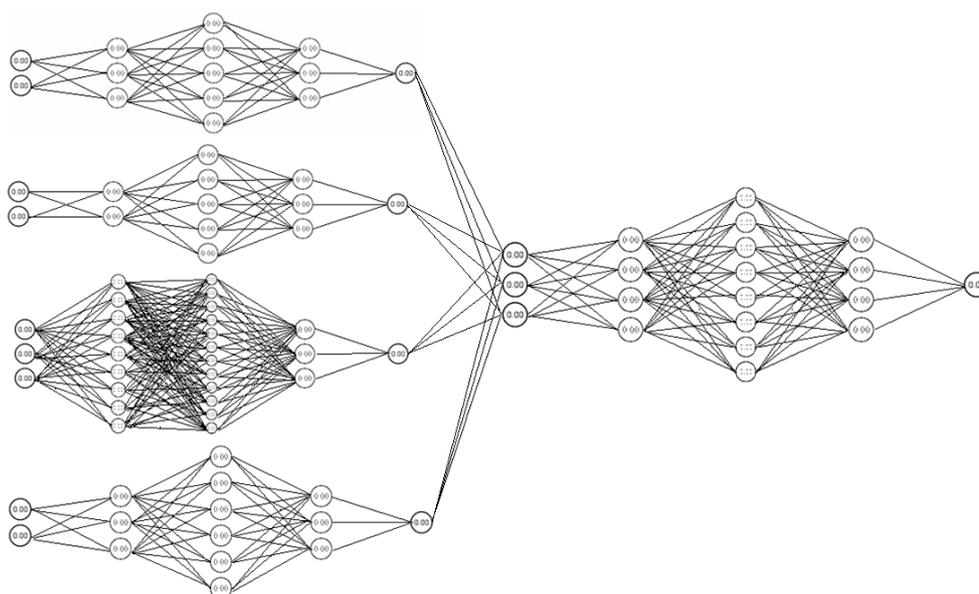


Рис. 8. Обобщенная нейронная сеть нейроконтроллера

## Выводы

Обобщенную нейронную сеть нейроконтроллера предлагается представить в трехмерном виде с наложением пространственных слоев друг на друга. Подобный подход к реализации системы нейроуправления РТК позволит добиться оптимизации и устойчивости работы всей системы, а использование «обычного» контроллера в паре с нейроконтроллером повысит надежность и отказоустойчивость системы управления. При этом основные преимущества нейроконтроллера заключаются в следующем:

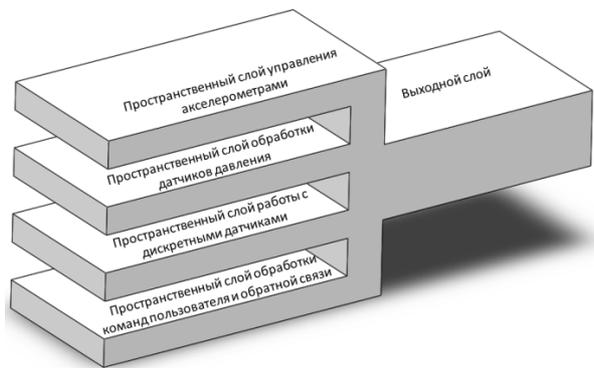


Рис. 9. Пространственная модель нейроконтроллера

1. Решение задач управления в условиях заданных априори закономерностях: благодаря обучению нейроконтроллера позволяет обеспечить управление РТК в условиях, когда «обычный» контроллер не способен эффективно работать.

2. Помехоустойчивость по входным сигналам: нейроконтроллер способен обеспечить из сильно зашумленных входных данных необходимую информацию и осуществлять управление без сбоев.

3. Высокая адаптивность к резким внешним изменениям системы управления на основе нейроконтроллера.

4. Высокое быстродействие системы управления за счет параллельной обработки информации.

5. Повышенная отказоустойчивость системы управления благодаря распределенному принципу устройства нейроконтроллера.

## Литература

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 240 с.
4. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение: учеб. пособие для вузов // А.В. Головкин, А.И. Галушкин; общ. ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.
5. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Калан. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.
6. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
7. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
8. Hertz J. Wstep do teorii obliczen neuronowych. Wyd. II / J. Hertz, A. Krogh, R. Palmer. Warszawa: WNT, 1995. – 38 p.
9. Barren A.R. Approximation and estimation bounds for artificial neural networks / A.R. Barren// Machine learning. 1994. Vol. 14. – Pp. 115-133.
10. Osowski S. Sieci neuronowe w ujeciu algorytmicznym. / S. Osowski. Warszawa: WNT, 1996. – 15p.
11. Rosenblatt F. Principle of neurodynamics / F. Rosenblatt. N.Y.: Spartan, 1992 – 30p.
12. Weymaere N. On the initialization and optimization of multilayer perception / J.P. Martens// IEEE Trans. Neural Networks. 1994. – Vol. 5. – Pp. 738-751.288
13. Haykin S. Neural networks, a comprehensive foundation. / S. Haykin. N.Y.: Macmillan Colkst Publishing Company, 1994.
14. Widrow B., Hoff M. Adaptive switching circuits / B. Widrow, M. Hoff// Proc. IRE WESCON Convention Record, 1960. – 107 p.
15. Cichocki A. Neural networks for solving systems of linear equations and related problems / A. Cichocki, R. Unbehauen// IEEE Trans. CAS, 1992. – Vol. 39. – Pp. 124-138.

Закрытое акционерное общество межрегиональная группа компаний "Интехрос", г. Воронеж  
Воронежский государственный технический университет

## NEURO-CONTROL SYSTEM BASED ON THE 3D NETWORK OF THE SPECIALIZED ROBOTIC TECHNICAL COMPLEX

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

<sup>1</sup> Electronics engineer, BA, ZAO MGK "Intehros", Voronezh, Russian Federation, e-mail: dr.bocharoff@yandex.ru

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

The article is devoted to the development of a control system for a robotic complex for complex environmental conditions. As the object of management, the RTK was considered for repair work at the nuclear power plant. The technical design of the main subsystems of the RTK is described. Due to the harsh specific working conditions, RTK must have great reliability, therefore, the principle of hybrid parallel neural control is taken as the basis of the control system architecture within the framework of the article. A typical scheme based on this architecture is considered and processed in accordance with the realities of the control object. 3D neural network of the neurocontroller was developed and described by spatial layers. The approach to the development of control systems described in the framework of the article makes it possible to achieve significant optimization and stability of the entire operation of the system, and the use of an "ordinary" controller paired with a neural controller increases the reliability and fault tolerance of the control system and the RTK as a whole

Key words: neural control, robotics, extreme conditions, neural networks, optimization

### References

1. Osovskiy S. «Neural networks for information processing» / trans. From the Polish ID. Rudinsky. - Moscow: Finance and Statistics, 2002. - 344 p.
2. Kruglov V.V., Borisov V.V. «Artificial neural networks. Theory and practice», Moscow: Hot line - Telecom, 2002. - 382 p.
3. Wasserman F. «Neurocomputer Technology», Moscow: The World, 1992. - 240 p.
4. Golovko V.A., Galushkin A.I. «Neural networks: training, organization and application. Book. Textbook. Manual for universities». General Ed. A.I. Galushkina, Moscow: IPRZHR, 2001. - 256 p.
5. Kalan R. «Basic concepts of neural networks», Moscow.: Publishing house "Williams", 2001. - 287 p.
6. Komashinsky V.I., Smirnov D.A. «Neural networks and their application in control and communication systems», Moscow: Hotline - Telecom, 2002. - 94 p.
7. Chervyakov N.I., Sakhnyuk P.A., Shaposhnikov A.V., Ryadnov S.A. «Modular parallel computing structures of neuroprocessor systems», Moscow.: Fizmatlit, 2003. - 288 p.
8. Hertz J., Krogh A., Palmer R. «Wstep do teorii obliczen neuronowych». Wyd. II., Warszawa: WNT, 1995. - 38 p.
9. Barren A.R. «Approximation and estimation bounds for artificial neural networks», *Machine learning* Vol. 14, 1994. - pp. 115-133.
10. Osowski S. «Sieci neuronowe w ujeciu algorytmicznym», Warszawa: WNT, 1996. - 15p.
11. Rosenblatt F. «Principle of neurodynamics», Spartan, 1992 - 30p.
12. Weymaere N., Martens J.P. «On the initialization and optimization of multilayer perception», *IEEE Trans. Neural Networks*, 1994. - Vol. 5. - pp. 738-751.288
13. Haykin S. «Neural networks, a comprehensive foundation», N.Y.: Macmillan Colkst Publishing Company, 1994.
14. Widrow V., Hoff M. «Adaptive switching circuits», *Proc. IRE WESCON Convention Record*, 1960. - 107 p.
15. Cichocki A., Unbehauen R. «Neural networks for solving systems of linear equations and problems», *IEEE Trans. CAS*, 1992. - Vol. 39. - pp. 124-138.

## ТЕМПЕРАТУРА ВСПЫШКИ И ЭНЕРГИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ДЛЯ ВЕЩЕСТВ ГОМОЛОГИЧЕСКИХ РЯДОВ Н-АЛКИЛПРОПАНОАТОВ И Н-АЛКИЛБУТАНОАТОВ

**А.М. Чуйков, Ю.К. Сунцов, Ю.Н. Сорокина,  
В.И. Лукьяненко, А.Н. Шуткин**

Количество органических соединений превысило 40 миллионов и увеличивается каждый год на 300 тысяч. Для технологических расчётов процессов производства, хранения и транспортирования веществ необходимы данные о термодинамических свойствах и показателях пожаровзрывоопасности веществ. Эти данные получают, исследуя фазовые равновесия жидкость-пар. Известно, что исследование равновесий жидкость-пар связано с большими экспериментальными трудностями. Поэтому разработка метода прогнозирования показателей пожароопасности и термодинамических свойств веществ, исходя из минимального количества экспериментальных данных, является актуальной задачей. В данной статье эбулиометрическим методом при различных давлениях измерено давление насыщенного пара десяти веществ гомологических рядов н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов. С использованием стандарта идеального газа (взятого при температуре и объеме жидкости) рассчитаны значения внутренней энергии, энтропии и энергии Гельмгольца веществ. Установлено, что значения термодинамических функций аддитивно зависят от молярной массы веществ в гомологических рядах. Анализом литературных данных обнаружена также аддитивная зависимость температур вспышки от молярной массы веществ в гомологических рядах. С учетом общей направленности изменения этих свойств выявлена взаимосвязь значений энергии Гельмгольца с температурой вспышки веществ в гомологических рядах. Приведены уравнения, позволяющие прогнозировать температуру вспышки и термодинамические свойства веществ с необходимой для технических целей точностью

Ключевые слова: температура вспышки, внутренняя энергия, энтропия, энергия Гельмгольца, уравнения состояния

### Введение

Для обеспечения пожарной безопасности процессов производства, хранения и транспортирования веществ необходимы данные о показателях пожаровзрывоопасности веществ. К числу важнейших показателей относятся температуры вспышки и воспламенения огнеопасных жидкостей, которые можно рассчитать на основе исследований фазовых равновесий жидкость-пар, если известна зависимость давления насыщенного пара ( $P$ ) от температуры ( $T$ ) кипения жидкости [1]. Данные о фазовых равновесиях необходимы также для расчётов термодинамических свойствах веществ, определяющих направление и скорость протекания производственных процессов. Известно, что исследование фазовых равновесий связано с большими экспериментальными трудностями [2].

В настоящее время количество органических соединений превысило 40 миллионов и увеличивается каждый год на 300 тысяч. В связи с этим разработка метода прогнозирования термодинамических

свойств и показателей пожароопасности веществ на их основе является актуальной задачей.

Решение этой задачи связано с установлением взаимосвязи между молекулярными характеристиками и термодинамическими свойствами веществ в гомологических рядах.

Особенности жидкого состояния веществ вызывают большие трудности в решении этой задачи. Существующие статистические теории жидкого состояния веществ недостаточно точны и слишком сложны. Утверждения о «техническом» характере преодоления этих трудностей вероятно слишком оптимистичны. Обобщение экспериментальных данных с точки зрения энергетических характеристик взаимодействия в жидких веществах необходимо для формирования новых идей в развитии теории жидкого состояния вещества.

Классическая термодинамика и сопоставление свойств жидких веществ с иными стандартами, например – идеальным газом, дает естественную основу для таких обобщений. Очевидно, что дальнейшее развитие термодинамической теории жидкого состояния требует явного учета молекулярных концепций.

### Цели и задачи исследования

Ранее была установлена функциональная взаимосвязь температуры вспышки и энергии Гельмгольца с молярной массой веществ для гомологических рядов: н-алкилэтанов, н-спиртов и кетонов, н-алкиламинов [3]. Задачей данной работы является установление подобных аналитических зависимостей для веществ гомологических рядов н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны сложные эфиры гомологического ряда н-

---

Чуйков Александр Митрофанович – ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, начальник кафедры, тел. 8-920-226-73-87

Сунцов Юрий Константинович – ВИ ГПС МЧС России, д-р хим. наук, профессор, тел. 8-950-761-89-67, e-mail: jsyntsov@mail.ru

Сорокина Юлия Николаевна – ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-906-585-80-01

Лукьяненко Владимир Ильич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-438-09-01, e-mail: [lukyanenkol1@yandex.ru](mailto:lukyanenkol1@yandex.ru)

Шуткин Александр Николаевич - ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, врио начальника института, e-mail: [vigps@mail.ru](mailto:vigps@mail.ru)

алкилпропаноатов (метилпропаноат, этилпропаноат, н-бутилпропаноат, н-пентилпропаноат) и н-алкилбутаноатов (метилбутаноат, этилбутаноат, н-бутилбутаноат, н-пентилбутаноат). Константы очищенных веществ удовлетворительно совпадали с литературными данными [4]. Температуры кипения растворов ( $T$ ) измерялись эбулиометрическим методом при пониженных давлениях ( $P$ ) платиновым термометром сопротивления с точностью  $\pm 0,05$  К. Давление насыщенного пара растворов ( $P$ ) измерялось ртутным манометром, с использованием катетометра В-630, с точностью  $\pm 6,66$  Па. Постоянство давления в эбулиометрах поддерживалось изодромным регулятором с отрицательной обратной связью с точностью  $\pm 6,66$  Па. Плотность чистых веществ и их растворов измерялась с помощью пикнометров Оствальда объемом 50, 100 см<sup>3</sup> при температурах 298,15; 318,15; 338,15 К по методике [5]. Детальное описание экспериментальных установок и методик эксперимента приведено в [6]. Значения термодинамических функций (энергий Гиббса, энтальпии и энтропии) н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов, рассчитанных с использованием метода Льюиса, не удалось связать уравнением с молярной массой (структурой) веществ. Основным недостатком расчета по методу Льюиса заключается в том, что получаемые значения термодинамических функций оказываются малочувствительными к межмолекулярному взаимодействию (ММВ) в жидкости. Например, для индивидуальной жидкости, находящейся в равновесии с паром, изменение энергии Гиббса ( $\Delta G$ ):  $\Delta G = G_{\text{пар}} - G_{\text{жид}} = 0$ . Создается впечатление, что энергия Гиббса «не чувствует» ММВ в жидкости. Поэтому в качестве стандарта для расчетов вкладов ММВ использовали идеальный газ, взятый при температуре ( $T$ ), объеме ( $V$ ) и составе ( $X$ ) реальной жидкости и подчиняющегося той же статистике [6].

Однако недостаточно сказать, что стандартная система без ММВ – идеальный газ. Необходимо точно определить его состояние. Идеальный газ имеет две степени свободы, поэтому введем два ограничения. Прежде всего, необходимо исключить работу против любых сил, кроме межмолекулярного взаимодействия, что ведет к условию  $V = \text{const}$ . Далее возможны два варианта: 1) адиабатический вариант ( $S = \text{const}$ ); 2) изотермический вариант ( $T = \text{const}$ ) – когда энтропия системы меняется за счет межмолекулярного взаимодействия, но не температуры. Эти соображения объясняют необходимость проведения процесса при условии  $V, T = \text{const}$ . В случае перехода моля вещества из состояния идеального газа в жидкое состояние (с межмолекулярным взаимодействием) получили [7]:

$$\hat{F} = RT \ln \frac{RT}{PV} - RT + PV ; \quad (1)$$

$$\hat{U} = H - RT \ln \frac{RT}{PV} ; \quad (2)$$

$$\hat{S} = H - RT \ln \frac{RT}{PV} , \quad (3)$$

где  $\hat{F}$  – энергия Гельмгольца;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура К;  $P, V$  – давле-

ние пара и мольный объем жидкости;  $\hat{U}$  – внутренняя энергия;  $H$  – мольная энтальпия испарения жидкости;  $\hat{S}$  – энтропия. Значения энтальпии испарения  $H$  в уравнениях (2) и (3) для н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов рассчитывались по уравнению Клаузиуса-Клайперона с использованием зависимости давления насыщенного пара от температуры веществ [2].

### Результаты и их обсуждение

На основе экспериментальных и литературных данных [4, 6 – 9] по уравнениям (1) – (3) рассчитаны значения  $\hat{F}$ ,  $\hat{U}$  и  $\hat{S}$  жидких н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов. Анализ результатов расчетов показывает, что значения  $\hat{F}$ ,  $\hat{U}$  и  $\hat{S}$  сложных эфиров аддитивно зависят от их молярной массы в гомологическом ряду и могут быть описаны уравнениями вида ( $T = 353$  К):

для н-алкилпропаноатов:

$$\hat{F} = 195,1M + 14166 ; \quad (4)$$

$$\hat{U} = 136,15M + 1264,3 ; \quad (5)$$

$$T\hat{S} = 58,748M + 2931 ; \quad (6)$$

для н-алкилбутаноатов:

$$\hat{F} = 134,7 M + 1307 ; \quad (7)$$

$$\hat{U} = 1756,0M + 16040 ; \quad (8)$$

$$T\hat{S} = 40,88 M + 14720, \quad (9)$$

где  $M$  – молярная масса вещества;  $\hat{F}$ ,  $T\hat{S}$  и  $\hat{U}$  — в Дж/моль. Уравнения (4 – 9) позволяют предсказывать значения  $\hat{F}$ ,  $\hat{U}$ ,  $T\hat{S}$  для неисследованных членов гомологического ряда. Например, для н-гептилпропаноата получили:

$$\hat{U}_{\text{расч}} = 47\,777 \text{ Дж/моль}, \hat{U}_{\text{опыт}} = 47\,709 \text{ Дж/моль};$$

$$\hat{F}_{\text{расч}} = 24\,719 \text{ Дж/моль}, \hat{F}_{\text{опыт}} = 24\,681 \text{ Дж/моль};$$

$$T\hat{S}_{\text{расч}} = 23051 \text{ Дж/моль}, T\hat{S}_{\text{опыт}} = 22\,887 \text{ Дж/моль}.$$

Аддитивная зависимость значений термодинамических функций от молярной массы вещества в гомологическом ряду можно объяснить подобием структурообразования жидких веществ [10]. Коэффициенты в уравнениях (4) – (9) определялись методом наименьших квадратов с использованием программы CurveExpert 1.3. Уравнения (4) – (9) описывают термодинамические свойства жидких н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов с точностью  $\pm 50$  Дж/моль.

Поскольку  $\hat{F}$  характеризует ММВ в жидкости и наиболее точно рассчитывается по имеющимся экспериментальным данным, представлялось целесообразным установить связь этой функции с мольным объемом ( $V$ ) и давлением ( $P$ ) насыщенного пара жидких веществ гомологических рядов. Корреляционным анализом установлено, что величины  $\ln P, V$  линейно зависят от значений  $\hat{F}$  вещества в гомологических рядах и могут быть описаны уравнениями вида:

для н-алкилпропаноатов ( $T = 353$  К):

$$\ln P = -3,8928 \cdot 10^{-4} \hat{F} + 16,679; \quad (10)$$

$$V = 9,1429 \cdot 10^{-3} \hat{F} - 14,369; \quad (11)$$

для н-алкилбутаноатов ( $T = 353$  К):

$$\ln P = -4,0090 \cdot 10^{-4} \hat{F} - 16,878; \quad (12)$$

$$V = 9,4730 \cdot 10^{-9} \hat{F} - 1,9012. \quad (13)$$

Уравнения (10) – (13) позволяют рассчитывать значения  $P$  и  $V$  для других членов гомологического ряда. Так, для н-гептилпропаноата при  $T = 353,15$  К:  $P_{\text{расч}} = 1177,11$  Па,  $P_{\text{опыт}} = 1144,60$  Па;  $V_{\text{расч}} = 211,2$  см<sup>3</sup>/моль,  $V_{\text{опыт}} = 210,97$  см<sup>3</sup>/моль.

Возрастание величины  $\hat{F}$  ММВ затрудняет переход молекул веществ в паровую фазу и уменьшает (по экспоненциальной зависимости) давление насыщенного пара жидкости.

Температура вспышки, принятая за основу классификации жидкостей по степени их пожаро-взрывоопасности, является одним из важнейших показателей пожарной опасности. Анализом литературных данных [11] установлено, что температура вспышки н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов аддитивно возрастает с увеличением молярной массы (числа групп  $-\text{CH}_2-$  в молекуле) вещества в гомологическом ряду (рис. 1) в соответствии с уравнениями:

для н-алкилпропаноатов:

$$T_{\text{всп}} = 1,0124M + 180,95; \quad (14)$$

для н-алкилбутаноатов:

$$T_{\text{всп}} = 0,9439M + 189,99, \quad (15)$$

где  $T_{\text{всп}}$  – температура вспышки, К.

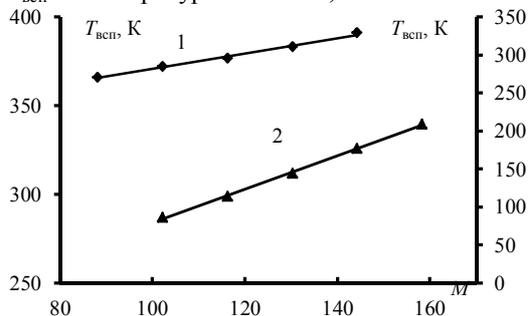


Рис. 1. Зависимость температуры вспышки от молярной массы вещества в гомологическом ряду: 1 – н-алкилпропаноатов; 2 – н-алкилбутаноатов.

С учетом аддитивной зависимости значений термодинамических функций (уравнения (4) – (9)) и температуры вспышки (см. рис. 1) от молярной массы вещества в гомологических рядах представлялось целесообразным установить взаимосвязь энергии Гельмгольца с температурой вспышки вещества в гомологическом ряду. С этой целью значения энергии Гельмгольца  $\hat{F}$  были пересчитаны для температур вспышки веществ в гомологическом ряду. Оказалось, что энергия Гельмгольца при температуре вспышки веществ также аддитивно возрастает с увеличением молярной массы вещества (числа групп  $-\text{CH}_2-$  в молекуле) в гомологическом ряду н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов (рис. 2).

Зависимость энергии Гельмгольца (Дж/моль) при температуре вспышки от молярной массы сложного эфира описывается уравнениями:

для н-алкилпропаноатов:

$$\hat{F}_{\text{всп}} = 86,251M + 10269, R^2 = 0,9921; \quad (16)$$

для н-алкилбутаноатов:

$$\hat{F}_{\text{всп}} = 88,748M + 9795,5; R^2 = 0,9955 \quad (17)$$

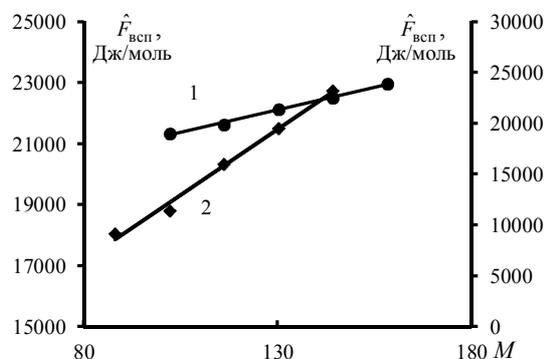


Рис. 2. Зависимость энергии Гельмгольца, рассчитанной при температуре вспышки, от молярной массы в гомологических рядах: 1 – н-алкилпропаноатов; 2 – н-алкилбутаноатов.

С учетом общей тенденции в изменении значений температуры вспышки (см. рис. 1) и энергии Гельмгольца, рассчитанной при температуре вспышки (см. рис. 2), от молярной массы веществ в гомологических рядах представлялось целесообразным установить их взаимосвязь (рис. 3).

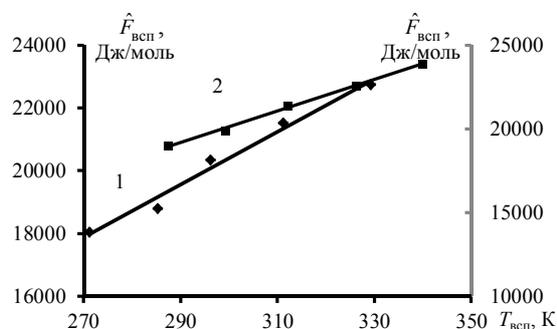


Рис. 3. Зависимость энергии Гельмгольца от температуры вспышки в гомологических рядах: 1 – н-алкилпропаноатов, 2 – н-алкилбутаноатов

Корреляционным анализом с использованием программы TableCurve 3D v4.0 получены уравнения для  $\hat{F}$  (Дж/моль):

для н-алкилпропаноатов:

$$\hat{F} = 84,514T_{\text{всп}} - 49439 \quad (18)$$

для н-алкилбутаноатов:

$$\hat{F} = 94,049T_{\text{всп}} - 8075,3 \quad (19)$$

Уравнения (18) и (19) позволяют с необходимой для технических целей точностью рассчитывать температуры вспышки  $T_{\text{всп}}$  н-алкилпропаноатов и н-алкилбутаноатов, с использованием термодинамических свойств любых двух веществ гомологического ряда и наоборот. Точность вычислений зави-

сит только от точности экспериментальных данных для этих двух веществ. Ранее подобные закономерности были выявлены для таких веществ гомологических рядов, как *n*-алкилэтанойты, *n*-спирты, кетоны и *n*-алкиламины [3]. По мнению авторов, установленные для изученных веществ закономерности могут быть применены к веществам других гомологических рядов.

### Заключение

1. Значения энергии Гельмгольца  $\hat{F}$ , внутренней энергии  $\hat{U}$  и энтропии  $\hat{S}$  аддитивно зависят от молярной массы веществ (числа групп  $-\text{CH}_2-$  в молекуле) в гомологических рядах *n*-алкилпропанойтов и *n*-алкилбутанойтов и описаны уравнениями (4) – (9) с точностью  $\pm 30$  Дж/моль.

2. Показано, что межмолекулярное взаимодействие в жидкости необходимо оценивать по значениям термодинамических функций, рассчитанных по стандарту идеального газа, взятого при тех же температурах и объеме, что и испытываемая жидкость.

3. Установлено, что температура вспышки *n*-алкилпропанойтов и *n*-алкилбутанойтов аддитивно возрастает с увеличением молярной массы (числа групп  $-\text{CH}_2-$  в молекуле) вещества в гомологическом ряду (уравнения (14), (15)).

4. Аддитивное возрастание значений температуры вспышки связано с аддитивным увеличением значений энергии Гельмгольца в гомологических рядах *n*-алкилпропанойтов и *n*-алкилбутанойтов (уравнения (18), (19)).

5. Предложена методика, позволяющая с точностью проведенного эксперимента прогнозировать термодинамические свойства и температуры вспышки *n*-алкилпропанойтов и *n*-алкилбутанойтов, опираясь на свойства двух веществ гомологического ряда.

### Литература

1. Алексеев С. Г. Температура вспышки. Ч. II: Расчет через давление насыщенного пара / С.Г. Алексеев,

В.В. Смирнов, Н.М. Барбин // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21.- № 10. – С. 21–35.

2. Термодинамика равновесия жидкость — пар / А.Г. Морачевский, Н.А. Смирнова, Е.М. Пиотровская и др. ; под ред. А.Г. Морачевского. Л.: Химия, 1989. – 344 с.

3. Взаимосвязь энергии Гельмгольца с температурой вспышки веществ в гомологических рядах *n*-алкилэтанойтов, *n*-спиртов и кетонов / Ю.К. Сунцов, Ю.Н. Сорокина, А.М. Чуйков, В.А. Горюнов // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25. № 3. – С. 27–33. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.27-33.

4. Stephenson R. M. Handbook of the thermodynamics of organic compounds / R.M. Stephenson, S. Malanowski. – New York : Elsevier, 1987. – 552 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3173-2.

5. Воскресенский П.И. Техника лабораторных работ / П.И. Воскресенский. – М.: Химия, 1969. – 729 с.

6. Suntsov, Yu. K. New method of predicting the thermodynamic properties of solutions / Yu. K. Suntsov // Journal of Chemistry and Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 8, N. 3. – P. 306–314. DOI: 10.17265/1934-7375/2014.03.013.

7. Сунцов Ю. К. Термодинамические функции жидких *n*-алкилпропанойтов и их бинарных смесей / Ю.К. Сунцов // Журнал физической химии. – 2002. – Т. 76. № 5. – С. 838 – 840.

8. Фазовые равновесия жидкость-пар и термодинамические свойства растворов 2-метилпропанол – *n*-алкилпропанойты / Ю.К. Сунцов, В.А. Горюнов, А.М. Чуйков, А.В. Мещеряков // Журнал физической химии. – 2016. – Т. 90. № 8. – С. 1209–1215. DOI: 10.7868/S0044453716080288.

9. Сунцов Ю.К. Закономерности изменения термодинамических свойств бинарных растворов *n*-алкилпропанойтов / Ю.К. Сунцов, В.А. Горюнов // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2009. – № 1. – С. 42 – 47.

10. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей / А.Ф. Скрышевский. – М.: Высш. шк., 1971. – 256 с.

11. Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / А.Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. В 2-х ч. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : Пожнаука, 2004. – Ч. I. – 713 с.; Ч. II. – 774 с.

Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России  
Воронежский государственный технический университет

## TEMPERATURE OF FLASH AND HELMHOLTZ ENERGY FOR THE SUBSTANCES OF HOMOLOGICAL SERIES OF N-ALKYL PROPIONATES AND N-ALKYL BENZOATES

A.M Chuikov<sup>1</sup>, Yu.K. Suntsov<sup>2</sup>, Yu.N. Sorokina<sup>3</sup>, V.I. Lukyanenko<sup>4</sup>, A.N. Shutkin<sup>5</sup>

<sup>1</sup>PhD, Head of the department of chemistry combustions processes, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [hipg\\_vigps@mail.ru](mailto:hipg_vigps@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, professor, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [jsyntsov@mail.ru](mailto:jsyntsov@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh Institute of Russian Ministry for Emergency Situations, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [sorokina-jn@mail.ru](mailto:sorokina-jn@mail.ru)

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [lukyanenko1@yandex.ru](mailto:lukyanenko1@yandex.ru)

<sup>5</sup>PhD, interim of the head of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of the Russian Federation, e-mail: [vigps@mail.ru](mailto:vigps@mail.ru)

The number of organic compounds exceeded 40 million and increases each year by 300 thousand. To ensure the fire safety and technological calculations of processes of production, for storage and transportation materials needed data rates fire and explosion hazard substances. Therefore, development of a method of forecasting fire danger indicators and thermodynamic properties of substances, based on the minimum amount of experimental data, is an important task. In this article at various temperatures were measured vapor pressure and density of the liquids in the homologous series of n-alkyl propanoates and n-alkyl butanoates. Based on experimental data and using the standard of ideal gas (taken at the temperature and volume of liquid) calculated the values internal energy, entropy, and Helmholtz energy. The analysis determined that values of thermodynamic functions are linearly dependent on the molecular weight of the substance in the homologous series. Analysis of published data established as a linear dependence of the flash point of substances of molecular weight substances in the homologous series. Considering the tendency of change these properties is established that the flash point of substances linearly dependent on the value of the energy of Helmholtz of substances homologous series. The corresponding equations were obtained

Key words: flash point; internal energy; entropy; Helmholtz energy; equation of state

### References

1. Alexeev S.G., Smirnov V.V., Barbin N.M. «Temperatura vspyshki». Chast' II. «Raschet cherez davlenie nasyshchenogo para» [Flash point. Part II. Calculation via partial pressure], *Pozharovzryvbezopasnost*, 2012, Vol. 21, – N. 10, pp. 21–35.
2. Morachevskiy A.G. (ed.), Smirnova N.A., Piotrovskaya E.M. et al. «Termodinamika ravnovesiya zhidkost – par» [Thermodynamics of liquid – vapor equilibrium], L. : Khimiya, 1989, 344 p.
3. Sunstov Yu.K., Sorokina Yu.N., Chuykov A.M., Goryunov V.A. «Vzaimosvyaz' energii Gel'mgol'tsa s temperaturoy vspyshki veshchestv v gomologicheskikh ryadakh n-alkiletanoatov, n-spiritov i ketonov» [Helmholtz energy interrelation with a flash point for compounds in homologous series of n-alkyl ethanoates, n-alcohols and ketones], *Pozharovzryvbezopasnost*, 2016, Vol. 25, N. 3, pp. 27–33. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.27-33.
4. Stephenson R. M., Malanowski S. «Handbook of the thermodynamics of organic compounds», New York : Elsevier, 1987. – 552 p. DOI: 10.1007/978-94-009-3173-2.
5. Voskresenskiy P.I. «Tekhnika laboratornykh rabot» [Technique of laboratory works], M. : Khimiya, 1969. – 729 p.
6. Sunstov Yu. K. «New method of predicting the thermodynamic properties of solutions», *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 2014, Vol. 8, N. 3, pp. 306–314. DOI: 10.17265/1934- 7375/2014.03.013.
7. Sunstov Yu. K. «Termodinamicheskie funktsii zhidkikh n-alkilpropanoatov i ikh binarnykh smesey» [Thermodynamic functions of liquid N-alkylpropanoates and their binary mixtures], *Russian Journal of Physical Chemistry*. – 2002, Vol. 76, N. 5, pp. 838 – 840.
8. Sunstov Yu. K., Goryunov V.A. «Zakonomernosti izmeneniya termodinamicheskikh svoystv binarnykh rastvorov n-alkilpropanoatov» [Regularities in the variation of the thermodynamic properties of binary solutions of n-alkylpropanoates], *Vestnik VGU, Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya*, 2009, N. 1, pp. 42 – 47.
9. Skryshevskiy A.F. «Struturnyy analiz zhidkostey» [Structural analysis of liquids]. – M. : Vysshaya shkola, 1971. – 256 p.
10. Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A. «Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya: spravochnik». 2-e izd. [Fire and explosion hazard of substances and materials and their means of fighting. Reference book. 2<sup>nd</sup> ed.]. – M. : Pozhnauka, 2004, Part I, 713 p.; Part II, 774 p.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**М.Н. Жерлыкина, С.А. Яременко, А.А. Мерщев, Н.А. Драпалюк**

Аварийность во многих отраслях промышленности Российской Федерации и зарубежных стран сохраняется на достаточно высоком уровне, что приводит к масштабному загрязнению окружающей природной среды и гибели людей. Наиболее аварийно-опасными производственными объектами по-прежнему остаются предприятия химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Анализ случаев аварийных ситуаций с выбросом в атмосферу вредных веществ свидетельствует о необходимости разработки технических и санитарно-гигиенических мер, выводящих качество воздуха рабочей зоны помещения и на границе санитарно-защитной зоны на уровень нормативных показателей.

Аварийный выброс вредного вещества является внезапным и кратковременным. Возникновение аварийного выброса на химическом предприятии носит вероятностный характер.

Существующие схемные решения устройства аварийной вентиляции заключаются в удалении воздуха из зон максимальных концентраций вредных веществ, где могут образовываться взрывоопасные смеси. Не исследованы схемы аварийной вентиляции с естественным и частичным механическим притоком воздуха. Их применение в значительной мере позволило бы сократить затраты на энергию и приобретение вентиляционного оборудования.

В настоящей работе предложены результаты исследования поля концентраций химических вредных веществ во всем объеме помещения при работе аварийной вентиляции с заданным воздухообменом. Взрывобезопасность производственных помещений обеспечивается при условии 10 % нижнего предела распространения пламени по газозвдушным смесям и соблюдения равенства концентраций вредного вещества в рабочей зоне и в уходящем воздухе. Определены условия повышения эффективности аварийной вентиляции, исключающие образование застойных зон и обеспечивающие нормируемые концентрационные пределы распространения пламени по газозвдушным смесям в помещении

Ключевые слова: концентрация, взрывобезопасность, застойная зона, газозвдушная смесь

В вентилируемом помещении поле концентраций неоднородно. При расчете аварийной вентиляции, кроме отношения параметров в рабочей зоне к параметрам удаляемого воздуха, необходимо знать соотношение концентраций во всем объеме помещения и в удаляемом воздухе. Это связано с тем, что аварийная вентиляция должна обеспечить требуемые параметры воздуха во всем объеме производственного помещения. В этом случае при расчете аварийной вентиляции учтена возможность возникновения в любой точке помещения импульса воспламенения. Аварийная вентиляция предназначена и для предотвращения пожаров и взрывов [6].

Поле концентраций во всем объеме помещения можно характеризовать избыточной концентрацией по объему и вероятностью отклонения от ее значения [5].

Относительная избыточная концентрация по объему может быть определена по формуле [1]:

$$\overline{\Delta q_V} = \frac{\int (q_{вв} - q_{нр}) dV}{(q_{yx} - q_{нр}) \cdot V}, \quad (1)$$

где  $q_{вв}$  – концентрация вредных веществ в объеме производственного помещения, мг/м<sup>3</sup>;  $q_{нр}$  – концентрация вредных веществ в приточном воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $q_{yx}$  – концентрация вредных веществ в уходящем воздухе, мг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем производственного помещения, м<sup>3</sup>.

По [1, 2]  $q_{нр}$  равна  $0,3 \times q_{рз}$ , относительная избыточная концентрация по объему определена по формулам:

если  $q_{рз} < q_{НКП}$ :

$$\overline{\Delta q_V} = \frac{\int \left( \frac{q_{вв}}{q_{рз}} - 0,3 \right) dV}{\left( \frac{0,1 \cdot q_{НКП}}{q_{рз}} - 0,3 \right) \cdot V}, \quad (2)$$

где  $q_{НКП}$  – нижний концентрационный предел распространения пламени по газозвдушным смесям, мг/м<sup>3</sup>;  $q_{рз}$  – предельно-допустимая концентрация вредных веществ в рабочей зоне, мг/м<sup>3</sup>.

если  $q_{рз} \geq q_{НКП}$ :

$$\overline{\Delta q_V} = \frac{\int \left( \frac{q_{вв}}{q_{рз}} - 0,3 \right) dV}{0,7 \cdot V}. \quad (3)$$

---

Жерлыкина Мария Николаевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473)271-28-92, e-mail: zherlykina@yandex.ru  
Яременко Сергей Анатольевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой жилищно-коммунального хозяйства, тел. 8(473)271-28-92, e-mail: jaremenko83@mail.ru  
Мерщев Александр Александрович – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473)271-28-92, e-mail: sasha\_1990@mail.ru  
Драпалюк Наталья Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, декан факультета магистратуры, тел. 8(473)271-28-92, e-mail: u00076@vgasu.vrn.ru

В [1] сделано предположение, что равномерность поля концентраций при заданном расположении источников, размерах помещения и схеме вентиляции будет зависеть только от степени турбулизации воздуха в помещении. Степень турбулизации воздуха может быть охарактеризована критерием Рейнольдса для турбулентного режима. Для исследования неравномерности поля концентраций вредных веществ в объеме помещения использован критерий Кармана,  $K_\varepsilon$ , по [1]. Рассмотрена зависимость:

$$\overline{\Delta q_V} = f(K_\varepsilon). \quad (4)$$

Чем больше турбулентность среды (чем больше  $K_\varepsilon$ ), тем однороднее поле концентрации в объеме помещения и величина  $\overline{\Delta q_V}$  приближается к единице. Напротив, при малых значениях критерия  $K_\varepsilon$ , когда турбулентность и вызываемое ее перемешивание незначительны, наблюдается большая неравномерность поля концентраций и  $\overline{\Delta q_V}$  может иметь значения много больше единицы.

При аварийном выбросе вредных веществ на процесс турбулентного перемешивания накладывается расслоение среды по плотности, которое затрудняет перемешивание воздушной среды. Энергия пульсаций в этом случае расходуется на работу против сил тяжести: подъем вверх масс воздуха с большей плотностью и опускание с меньшей плотностью по отношению к плотности окружающей среды.

Критерий  $K_\varepsilon$  определяется по формуле [1]:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{nc}}{\varepsilon_{mc}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{nc}$  – энергия приточной струи, отнесенная к единице массы воздуха помещения и к единице времени;  $\varepsilon_{mc}$  – количество механической энергии, затухающей в единице массы воздуха в единицу времени:

$$\varepsilon_{mc} = \frac{K_{pa} \cdot \alpha \cdot v^2}{2}, \quad (6)$$

где  $K_{pa}$  – кратность при аварийной работе вентиляции, 1/ч;  $\alpha$  – поправочный коэффициент на скоростное давление;  $v$  – скорость воздуха в помещении при работе аварийной вентиляции.

$$\varepsilon_{mc} = C_7 \cdot \frac{\bar{Q}}{\rho} \cdot z, \quad (7)$$

где  $\bar{Q}$  – теплонапряженность производственного помещения, определяемого в зависимости от назначения помещения по [1];  $C_7$  – коэффициент, принимаемый по [1];  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – длина всасывающего отверстия, м.

При аварийном выбросе вредных веществ распределение избыточных концентраций зависит от воздухообмена аварийной вентиляции. С увеличением его кратности при одних и тех же величинах выделения газов поле концентраций выравнивается и  $\overline{\Delta q_V}$  стремится к единице.

Исследована неравномерность поля концентраций при работе аварийной вентиляции с заданным воздухообменом по разработанным формулам:

если  $q_{p3} < q_{НКП}$ :

$$\overline{\Delta q_{V_{K_{pa}}}} = \frac{\int_V \left( \frac{q_{вв}}{q_{p3}} - 0,3 \right) dV}{\left( \frac{0,1 \cdot q_{НКП}}{q_{p3}} - 0,3 \right) \cdot V} \cdot \frac{1}{K_{pa} \cdot t_{III}}, \quad (8)$$

где  $t_{III}$  – время, в течение которого концентрации вредных веществ после включения аварийной вентиляции будут снижены до  $q_{p3}$ , с.

если  $q_{p3} \geq q_{НКП}$ :

$$\overline{\Delta q_{V_{K_{pa}}}} = \frac{\int_V \left( \frac{q_{вв}}{q_{p3}} - 0,3 \right) dV}{0,7 \cdot V} \cdot \frac{1}{K_{pa} \cdot t_{III}}. \quad (9)$$

Результаты исследования поля концентраций производственного помещения при  $K_{pa}=20$  1/ч представлены на рис. 1.

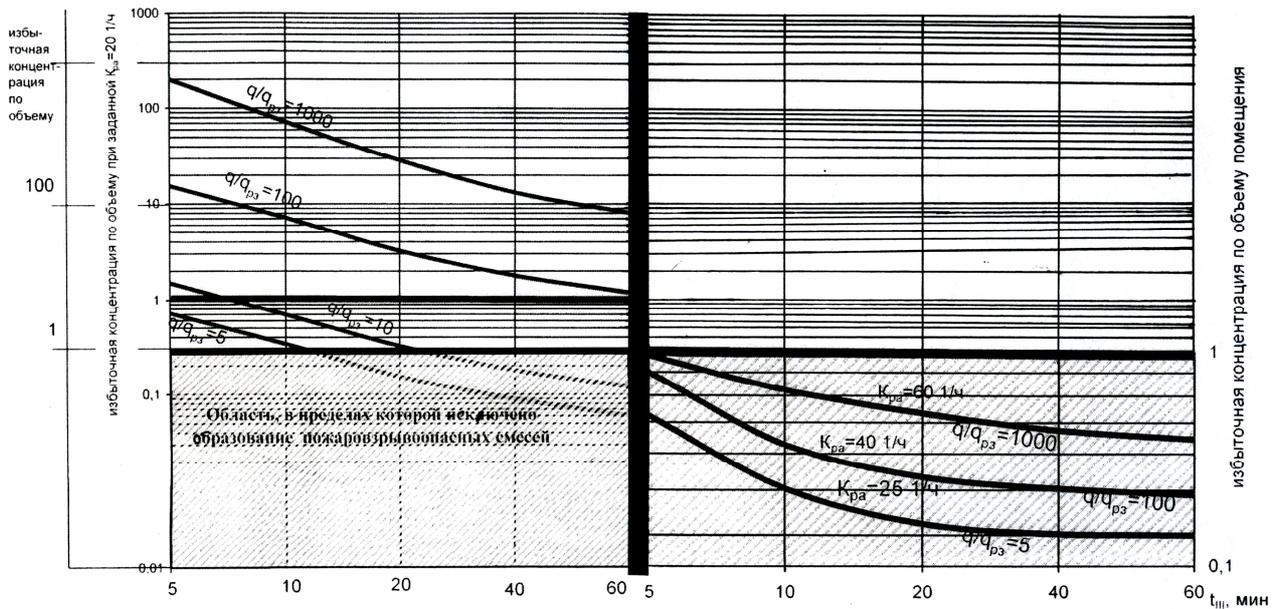


Рис. 1. График зависимости относительной избыточной концентрации по объему помещения от времени работы аварийной вентиляции при  $q_{рз} < q_{НКП}$

Следовательно, при заданном воздухообмене в производственном помещении за время работы аварийной вентиляции концентрации вредных веществ должны быть снижены так, чтобы значение избы-

точной концентрации находилось в области, в пределах которой исключены взрывоопасные ситуации.

Исследование зависимости величины средней избыточной концентрации по объему производственного помещения представлены на рис. 2.

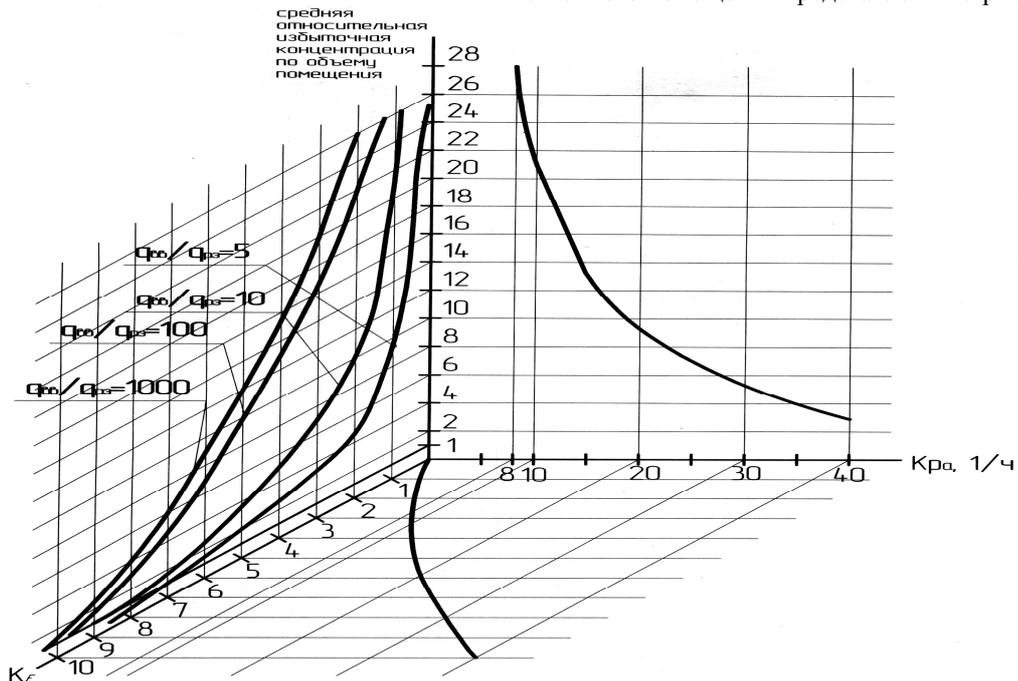


Рис. 2. График зависимости средней относительной избыточной концентрации по объему помещения от кратности воздухообмена аварийной вентиляции

По мере увеличения критерия  $K_э$  вероятность отклонения концентраций от максимального ее значения по объему, при котором исключено образование взрывоопасных смесей, имеет тенденцию к уменьшению.

Таким образом, чем больше превышение концентрации вредных веществ в аварийном выбросе над предельно-допустимым значением в рабочей зоне, тем для достижения равномерности поля кон-

центраций во всех точках объема производственного помещения требуется большая кратность воздухообмена аварийной вентиляции.

Следовательно, условия работы аварийной вентиляции, исключающие образование застойных зон и обеспечивающие нормируемые концентрационные пределы распространения пламени по газоздушным смесям в помещении [8], заключаются в следующем:

1. Концентрация вредных веществ в аварийном выбросе,  $q_{\text{вв}}$ , равна максимальному значению,  $q_{\text{max}}$ , и должна определяться исходя из того, что:

$$q_{\text{pz}} < q_{\text{вв}} = q_{\text{max}} < 0,1 \cdot q_{\text{НКП}}, \quad (10)$$

$$0,1 \cdot q_{\text{НКП}} < q_{\text{вв}} = q_{\text{max}} < q_{\text{pz}}. \quad (11)$$

2. Концентрация вредных веществ в уходящем из производственного помещения воздуха при работе аварийной вентиляции должна быть равна: если  $q_{\text{pz}} < q_{\text{НКП}}$ , то:

$$q_{\text{yx}} = 0,1 \cdot q_{\text{НКП}}, \quad (12)$$

если  $q_{\text{pz}} \geq q_{\text{НКП}}$ , то:

$$q_{\text{yx}} = q_{\text{pz}}. \quad (13)$$

3. Кратность воздухообмена при возникновении аварийного выброса в производственном помещении, определяемая исходя из особенностей технологического процесса, должна быть не менее значения, определяемого при действии в помещении нестационарного неподвижного источника газообразных вредных веществ, выходящих из оборудования под давлением, определяемая из условия не превышения  $q_{\text{pz}}$ .

4. Для того, чтобы концентрации вредных веществ в производственном помещении не превысила  $q_{\text{pz}}$ , необходимо чтобы:

$$\frac{G_0}{L_T} \leq q_{\text{вв}}, \quad (14)$$

где  $G_0$  – массовый расход вредных веществ, кг/м<sup>3</sup>;  $L_T$  – воздухообмен, который необходимо обеспечить в производственном помещении при аварийном выбросе, для разбавления вредных веществ [4].

5. Скорость воздушного потока в производственном помещении при работе аварийной вентиляции на удалении от вытяжных отверстий должна быть более 0,2 м/с:  $v_x \geq 0,2$  м/с [7].

6. Скорость воздушного потока в воздуховоде вытяжной аварийной вентиляции должна быть не больше 20 м/с:  $v_0 \geq 20$  м/с [7].

7. Для обеспечения равномерного удаления воздуха из помещения площадь всасывающих отверстий должна быть не более 50 % площади воздуховода аварийной вентиляции [1, 3].

#### Литература

1. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств / В.М. Эльтерман. М.: Химия, 1980. – 197 с.
2. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции / В.В. Батурин. М.: Профиздат, 1965.
3. Бромлей М.Ф. Проектирование отопления и вентиляции / М.Ф. Бромлей, В.П. Щеглов. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. – 260 с.
4. Дерепасов А.В. Исследование воздухообмена производственных помещений с проемами в перекрытиях / А.В. Дерепасов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. –2017. №1.- С. 35-39.
5. Влияние междуэтажных проемов на структуру потоков и качество воздуха рабочей зоны производственных помещений нефтехимических предприятий / С.А. Яременко, С.Н. Леонтьев, С.В. Бунин, Д.Ю. Попков // Научный журнал «Инженерные системы и сооружения». 2012. №3 (8). С. 24-31.
6. Исследование эффективности установки сигнализаторов и газоанализаторов в производственных помещениях / А.В. Облиенко, О.Н. Петрова, И.И. Переславцева, С.А. Колодяжный // Научный журнал «Инженерные системы и сооружения». 2010. №1 (8). С. 222-225.
7. Анализ пожарной безопасности объектов строительства в Российской Федерации / М.И. Ботнар, А.В. Дерепасов, И.И. Переславцева, Д.Г. Титков, С.А. Яременко // Научное обозрение. 2013. №9. С. 426-430.
8. Разработка методов и конструктивно-технических решений по предотвращению поступления пожаровзрывоопасных веществ в помещение / И.И. Переславцева, О.Н. Петрова, О.Н. Потапова, Н.А. Старцева // Научный журнал «Инженерные системы и сооружения». 2010. №1 (8). С. 174-179.

Воронежский государственный технический университет

## RESEARCH ON THE DISTRIBUTION OF HARMFUL SUBSTANCES CONCENTRATIONS WITHIN INDUSTRIAL SPACES OF FUEL AND ENERGY COMPLEX ENTERPRISES

M. N. Zherlykina<sup>1</sup>, S.A. Yaremenko<sup>2</sup>, A.A. Mershchiyev<sup>3</sup>, N.A. Drapalyuk<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, associate professor of department chair of housing and communal services REB, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: jaremenko83@mail.ru

<sup>3</sup>Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: sasha\_1990@mail.ru

<sup>4</sup>PhD, Associate professor, dean of faculty of a magistracy, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation e-mail: u00076@vgasu.vrn.ru

The accident rate in many industries of the Russian Federation and foreign countries is stored on to a sufficient high level that leads to large-scale pollution of the environment and loss of life. The most dangerous production objects remain the enterprises of chemical, petrochemical and refining industries.

The analysis of emergency emissions of harmful substances demonstrates the need for the development of technical and sanitary-hygienic measures, deducing the quality of the air of the working zone of the room and on the border of sanitary-protective zone on the level of regulatory indicators.

Emergency emission of harmful substances is sudden and of short duration. The emergency release of a chemical company is probabilistic in nature.

Existing designs of devices of the emergency ventilation involves removing air from the zones of maximal concentrations of harmful substances, which can form explosive mixtures. Not tested scheme emergency ventilation with natural and mechanical partial flow of air. Their use in a considerable measure would reduce energy costs and the purchase of ventilation equipment. In this paper, we present the results of the research chemical fields of concentrations of harmful substances in the whole volume of the room during the operation of emergency ventilation with the set ventilation. Explosion safety of production facilities is provided subject to the 10% lower limit of flame propagation in gas mixtures and to observe the equality of concentrations of harmful substances in the working area and in the outgoing air. The conditions for increasing the efficiency of the emergency ventilation, precluding the formation of stagnant zones and providing regulated concentration limits of flame propagation for gas-air mixtures in the room

Key words: concentration, explosion safety, stagnant zone, air-gas mix

### References

1. Elterman V. M. «Ventilation of chemical productions», M.: Chemistry, 1980. – 197 p.
2. Baturin V. V. «Bases of industrial ventilation», M.: Profizdat, 1965.
3. Bromlya M. F., Shcheglov V. P. «Design of heating and ventilation», M.: Publishing house of literature on construction, 1965. – 260 p.
4. Deripasov A.V. «A research of air exchange of production rooms with apertures in overlappings», *Housing and municipal infrastructure*, 2017, No. 1, pp. 35-39.
5. Yaremenko S.A., Leontyev S. N., Bunin S. V., Popkov D.Yu. «Influence of interfloor apertures on structure of streams and quality of air of a working zone of production premises of the petrochemical enterprises» *Scientific magazine. Engineering systems and constructions*, 2012, No. 3 (8), pp. 24-31.
6. Obliyenko A. V., Petrova O. N., Pereslavl'tseva I. I., Kolodyazhny S.A. «Research of efficiency of installation of signaling devices and gas analyzers in production rooms», *Scientific magazine. Engineering systems and constructions*, 2010, No. 1 (8), pp. 222-225.
7. Botnar M. I., Derebasov A. V., Pereslavl'tseva I. I., Titkov D. G., Yaremenko S.A. «The analysis of fire safety of objects of construction in the Russian Federation» *Scientific review*, 2013, No. 9, pp. 426-430.
8. Pereslavl'tsev I. I., Petrov O. N., Potapov O. N., Startsev N. A. «Development of methods and constructive technical solutions on prevention of receipt the požarovzryvoopasnykh of substances in Room», *Scientific magazine. Engineering systems and constructions*, 2010, No. 1 (8), pp. 174-179.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ  
Е-СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ  
ВЛАГОПОГЛОЩАЮЩИХ УСТАНОВОК**

**Ю.Г. Пастернак, В.М. Питолин, М.Н. Федоров, Д.М. Федоров**

В работе рассматриваются математическая модель, адекватно описывающая ЭМП, создаваемое системой индукционного нагрева, применительно к задаче влагопоглощения, и результаты экспериментальной проверки распределения электромагнитного поля вокруг источника, представляющего собой индуктор, а также расчет напряженности электрической компоненты поля в заданном объеме пространства, создаваемого индуктором, состоящим из нескольких витков медного провода, основанный на математической модели нагрева диэлектрической таблетки, помещенной внутрь электронно-лучевых трубок. Рассматривается воздействие электромагнитных полей на человека, технологические процессы, состоящих из нескольких однотипных источников. Приводится расчет границ санитарно-защитной зоны для трех индукторов на стадии проектирования промышленных производственных участков. Построение математической модели прогнозирования уровня распределения Е-составляющей электромагнитного поля позволило посредством компьютерного моделирования оценить зависимость формы санитарно-защитной зоны вокруг исследуемого объекта от взаимного расположения источников электромагнитного поля, к которым подведена одинаковая мощность от генераторов высокочастотного нагрева. Проведено изучение влияния геометрических и электромагнитных свойств системы индукционного нагрева на излучаемое поле; выяснение общих закономерностей поведения электромагнитного поля в ближней зоне и формулирование рекомендаций по определению линейных размеров зоны, где напряженность электрической компоненты поля меньше нормируемых значений. Инструментальные измерения и расчетные значения параметров электромагнитного поля подтвердили адекватность предложенной модели

Ключевые слова: математическая модель, установки высокочастотного нагрева, электромагнитное поле, влагопоглощение

**Введение**

Установки высокочастотного нагрева (ВЧ) получили широкое распространение в конвейерном производстве электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). Прежде всего, при ВЧ нагреве не загрязняется окружающая среда химическими веществами, появляется возможность обеспечения достижения высоких скоростей градиента температуры в материале, осуществления избирательного нагрева при воздействии на локальный участок обрабатываемого объекта (ЭЛТ). Технологические процессы с использованием скоростного ВЧ нагрева легко поддаются механизации и автоматизации. В конвейерном производстве, накладывающем временные ограничения на проведение технологических операций, применение ВЧ нагрева весьма предпочтительно. При производстве ЭЛТ поддержание нормативной чистоты технологического процесса (вакуумной гигиены) обеспечивается посредством ис-

пользования влагопоглощающей установки, представляющей собой ВЧ генератор, связанный через фидерную линию с индуктором. Технологическая операция поглощения влаги в ЭЛТ осуществляется с помощью испарения таблетки в высокочастотном поле, создаваемом установкой индукционного нагрева [1,5,6,7,8]. Наряду с достоинствами метода ВЧ нагрева, описанного выше, есть и недостатки, заключающиеся в загрязнении рабочей зоны (гомосферы) электромагнитным излучением (ЭМИ) и его отрицательном воздействием на человека, присутствующего в ноосфере (опасной зоне).

**Описание проблемы**

Традиционно расчет установки ВЧ нагрева сводился к определению максимального выделения мощности на объекте нагрева, представляющего собой материалы с разными электрофизическими свойствами, в данном случае диэлектрик [1,5,6,7,8].

Задачей настоящего исследования является создание математической модели для прогноза уровня ЭМИ частотой 440 кГц в ближней зоне для системы источников с последующим определением границ зоны, превышающей значение электрической составляющей электромагнитного поля (ЭМП) согласно ГОСТ 12.1.006-84 [2,4,10,11].

Одним из вопросов, рассматриваемых в данной работе, является расчет напряженности электрической компоненты поля в заданном объеме пространства, создаваемого индуктором, состоящим из нескольких витков медного провода, осно-

---

Пастернак Юрий Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-77-29, e-mail: [paster-nakyg@mail.ru](mailto:paster-nakyg@mail.ru)

Питолин Владимир Михайлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-76-78, e-mail: [Pitol@mail.ru](mailto:Pitol@mail.ru)

Федоров Михаил Николаевич – ВГПУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8 (473) 2-23-38-52, e-mail: [FMN@myrambler.ru](mailto:FMN@myrambler.ru)

Федоров Дмитрий Михайлович – ВИ ГПС МЧС России, канд. техн. наук, старший преподаватель, тел. 8-910-344-33-41, e-mail: [FDM@myrambler.ru](mailto:FDM@myrambler.ru)

ванный на математической модели нагрева диэлектрической таблетки, помещенной внутрь ЭЛТ.

### Экспериментальная часть

Вид одного из индукторов с ферромагнитным сердечником приведен на рис. 1.

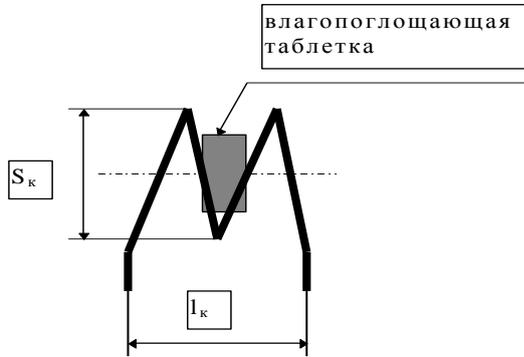


Рис. 1. Индуктор с диэлектрической таблеткой

Искомая E- компонента ЭМП удовлетворяет уравнениям Максвелла

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + j\omega \epsilon_a \vec{E} \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega \mu_a \vec{H} \quad (2)$$

Решить систему уравнений Максвелла для исследуемой структуры проще с помощью векторного электрического потенциала, удовлетворяющего волновому уравнению Гельмгольца, которое вытекает из вышеприведенной системы уравнений [3,5,9,12].

В соответствии с [3,5,9,12], векторный электрический потенциал, создаваемый одиночным витком с электрическим током, можно представить как

$$A_m(r) = \frac{\mu_0 \mu^c I_m}{4\pi L} \int \frac{\exp(-ik|r-r'|)}{|r-r'|} dl', \quad (3)$$

где  $I_m^c$  - амплитуда стороннего электрического тока, протекающего через виток;  $|r-r'|$  - текущее расстояние от центра витка до точки наблюдения;  $k$  - волновое число свободного пространства.

Величина напряженности электрической компоненты определяется как

$$E = \frac{1}{i\omega \mu_a \epsilon_a} \text{grad}(\text{div}(A_m(r))) - i\omega A_m(r) \quad (4)$$

С учетом того, что  $\text{div}(A_m(r))=0$ , т.к. поле является соленоидальным, можно сформулировать окончательное выражение для расчета напряженности электрической компоненты поля

$$E = -i\omega A_m(r) \quad (5)$$

Интегрирование производится в сферической системе координат. В результате получаем выражение для электрической компоненты поля в ближней зоне

$$E(r, \theta, i) := \frac{N_i \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{eff}}(i) \cdot l_i \cdot \pi \cdot (\text{rad}_i)^2 \cdot f_i}{2} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \sin(\theta) \quad (6)$$

где  $r$  - расстояние от центра индуктора до наблюдаемой точки,  $i$  - номер источника,  $f_i$  - частота  $i$ -го источника,  $N_i$  - количество витков в  $i$ -м индукторе,  $\text{rad}_i$  - радиус  $i$ -го сердечника,  $\theta$  - угол места в сферической системе координат. Величина эффективной магнитной проницаемости таблетки  $\mu_{\text{эфф}}(i)=1$

### Обсуждение результатов

В работе осуществлена проверка адекватности полученных математических моделей экспериментальным данным. Рис. 2 иллюстрирует удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей напряженности электрической компоненты, (В/м) от расстояния до индуктора. Различия при расстояниях, меньших 0.2 м вызваны погрешностями измерений при расстояниях, сопоставимых с длиной измерительной антенны.

Построение математической модели прогнозирования уровня распределения E - составляющей ЭМП позволило посредством компьютерного моделирования оценить зависимость формы санитарно-защитной зоны вокруг исследуемого объекта от взаимного расположения источников ЭМИ, к которым подведена одинаковая мощность от ВЧ генераторов. Диаметр каждой катушки составлял 5 см, число витков - 3, КПД каждого индуктора принимали равным 80%. Генераторы работали на частоте 440 кГц, ток в каждой катушке составлял 1000 А.

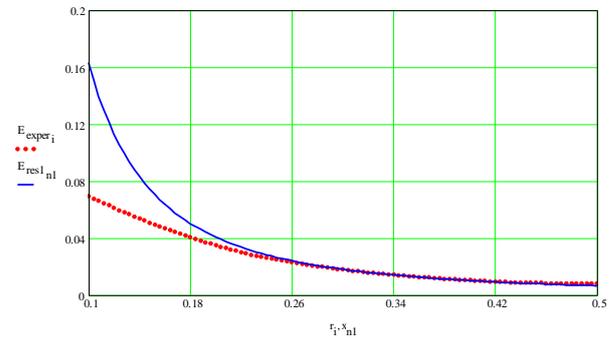
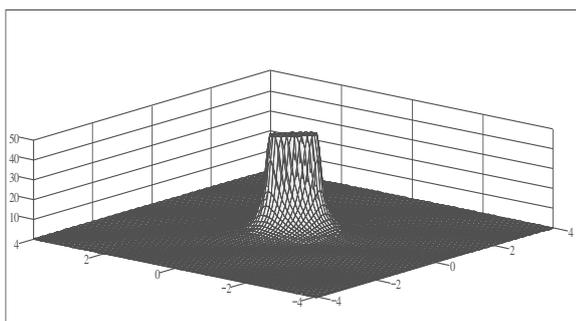


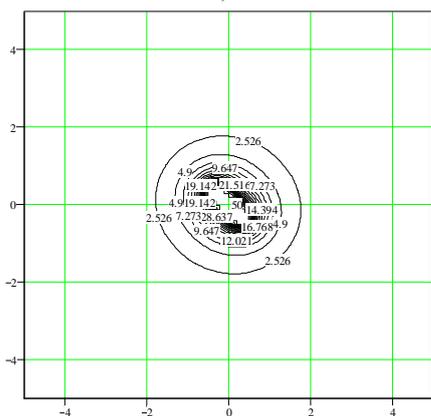
Рис. 2. Сравнение экспериментальной (кривая из точек) и расчетной (сплошная кривая) напряженностей поля, создаваемых индуктором при частоте 440 кГц

Результаты прогнозирования распределения уровней E-компоненты поля для предполагаемых планов размещения установок индукционного нагрева при различных значениях расстояния между установками показаны на рис. 3-5.



X, Y, E<sub>kont</sub>

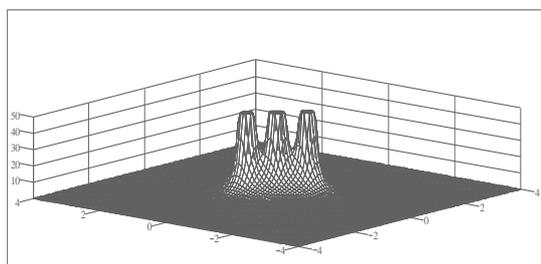
а)



E<sub>kont</sub>

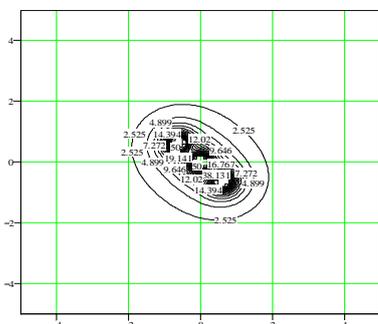
б)

Рис. 3. Распределение поля для системы источников с координатами:  $(x_1=0, y_1=0)$ ;  $(x_2=0.25, y_2=-0.25)$ ;  $(x_3=-0.25, y_3=0.25)$ .



X, Y, E<sub>kont</sub>

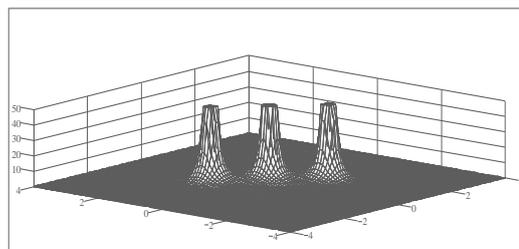
а)



E<sub>kont</sub>

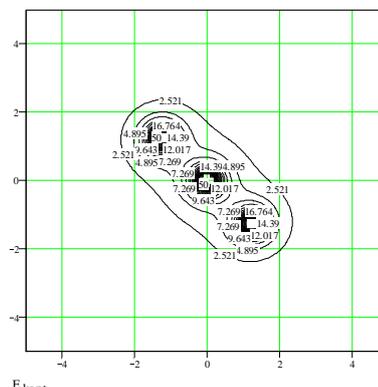
б)

Рис. 4. Распределение поля для системы источников с координатами:  $(x_1=0, y_1=0)$ ;  $(x_2=0.5, y_2=-0.5)$ ;  $(x_3=0.5, y_3=0.5)$ .



X, Y, E<sub>kont</sub>

а)



E<sub>kont</sub>

б)

Рис. 5. Распределение поля для системы источников с координатами:  $(x_1=0, y_1=0)$ ;  $(x_2=1, y_2=-1)$ ;  $(x_3=-1, y_3=1)$ .

Предложенный план размещения установок ВЧ нагрева, соответствующий рис. 3, наглядно демонстрирует сильное наложение ЭМП от различных установок. Структура суммарного поля близка к структуре поля, создаваемого одним источником. Так как технологическая операция влагопоглощения является промежуточной, то это накладывает ограничения по времени на выполнение операции и на то, что конвейер регламентирует темп работы и, соответственно, постоянное нахождение человека в зоне, где уровень поля превышает нормированное значение.

При увеличении расстояния между источниками ЭМП в два раза (рис. 4) все равно наблюдалось сильное наложение полей. И только увеличив расстояние в 4 раза, можно добиться такой структуры поля, при которой существуют безопасные участки между соседними установками, рис. 5.

Структура алгоритма программной реализации модели пространственного распределения E - компоненты ЭМП приведена на рис. 6. В основном модуле, реализованном в Borland Delphi 5.0, осуществляется ввод параметров установки ВЧ нагрева и диэлектрической таблетки. После этого производится вызов программного комплекса математических расчетов MathCad и передача в него требуемых данных. MathCad осуществляет расчет распределения электрической и магнитной составляющей поля системы двух индукторов. Передача результатов расчета основному модулю дает возможность их дальнейшего использования, в том числе вывода в наглядном виде.

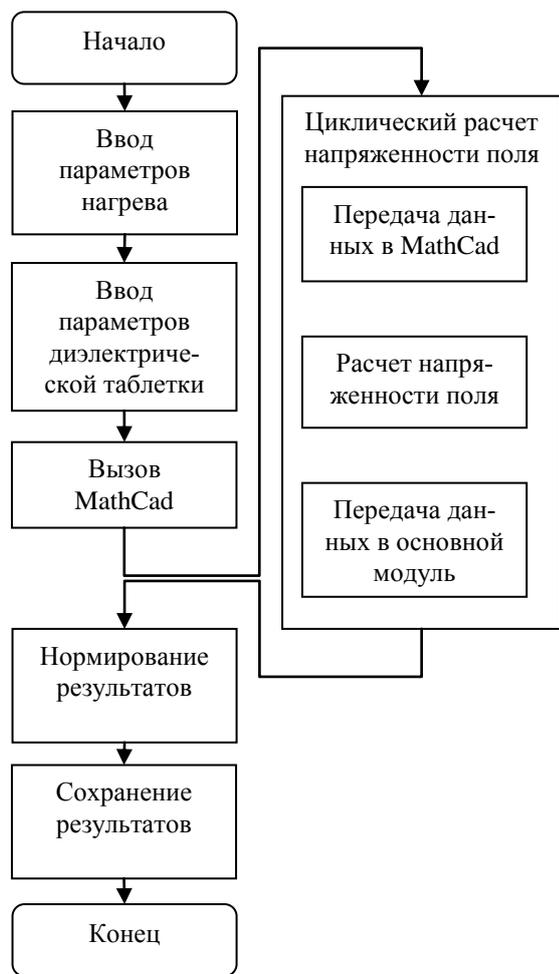


Рис. 6. Структура алгоритма расчета распределения ЭМП

### Заключение

Итогами данной работы является создание математической модели, адекватно описывающей ЭМП, создаваемое системой индукционного нагрева применительно к задаче влагопоглощения; изучение влияния геометрических и электромагнитных свойств системы индукционного нагрева на излучаемое поле; выяснение общих закономерностей поведения электромагнитного поля в ближней зоне и формулирование рекомендаций по определению линейных размеров зоны, где напряженность электрической компоненты поля меньше нормируемых значений.

Программная реализация, осуществленная в виде программного комплекса, разработанного в среде Borland Delphi 5.0, позволяет произвести численную оценку результатов моделирования участка индукционного нагрева и осуществить сравнение результатов моделирования с уже существующими и эксплуатируемыми участками.

Воронежский государственный технический университет  
 Воронежский государственный педагогический университет  
 Воронежский институт государственной противопожарной службы МЧС России

### Литература

1. Княжевская Г.С. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов / Г.С. Княжевская, М.Г. Фирсова, Р.Ш. Килькеев; под ред. А.Н. Шамова. - 2 изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ие, 1989. - 64 с.
2. Немком В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немком, В.Б. Демидович. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1988. 280 с
3. Крылов В.И. Вычислительные методы: В 2-х ч. / В.И. Крылов, В.В. Бобков, П.И. Монастырский. - М.: Наука, 1976. - 392с.; 1977. - 399 с.
4. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов и др. - Л.: Энергоиздат, 1981.
5. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рысин. - Л.: Энергия, 1974.
6. Фёдоров Д.М. Моделирование распределения электромагнитного поля воздушных линий электропередач методом зеркальных отображений / Д.М. Фёдоров, В.М. Питолин, М.Н. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7. - №8. - С. 9-12.
7. Фёдоров Д.М. Математическая модель распределения напряжённости электрической компоненты ЭМП воздушной ЛЭП / Д.М. Фёдоров, В.М. Питолин // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Всерос. конф. - Воронеж, 2010. - С. 26-27.
8. Фёдоров Д.М. Алгоритм расчета электромагнитных полей трехфазной линии произвольной геометрии / В.М. Питолин, Д.М. Фёдоров // Интеллектуальные информационные системы: труды Всерос. конф. - Воронеж, 2010. - С. 40-41.
9. Фёдоров Д.М. Оценка эффективности комплексного двухэтапного метода оптимизации формы биологически опасной зоны ВЛЭП / Д.М. Фёдоров, В.М. Питолин // Системные проблемы надёжности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в инновационных проектах (ИННОВАТИКА - 2011): материалы междунар. конф. и Рос. науч. шк. - М.: Энергоатомиздат, 2011. Ч. 2. - С. 156-159.
10. Питолин В.М. Моделирование зоны воздействия электромагнитных полей гектометрового диапазона на человека / В.М. Питолин, М.Н. Фёдоров, Д.М. Фёдоров // Проблемы и перспективы обеспечения комплексной безопасности личности и общества в условиях современности: материалы 1 науч.-практ. конф. с междунар. участием. - Воронеж: Наука-Юнипресс, 2012. - Вып. 1. С. 95.
11. ГОСТ 12.1.006-84 Система стандартов безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля
12. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. М.: Наука, - 1989. - 544 с.

# PREDICTING THE SPATIAL STRESS DISTRIBUTION OF THE E-COMPONENT OF ELECTROMAGNETIC FIELD SYSTEM OF WATER-ABSORBING INSTALLATIONS

Y.G. Pasternak<sup>1</sup>, V.M. Pitolin<sup>2</sup>, M.N. Fedorov<sup>3</sup>, D.M. Fedorov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [pasternakyg@mail.ru](mailto:pasternakyg@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [Pitol@mail.ru](mailto:Pitol@mail.ru)

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [FMN@myrambler.ru](mailto:FMN@myrambler.ru)

<sup>4</sup>PhD, Assistant Professor, Voronezh Institute of the State Fire Service of Russian Emergencies Ministry, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [FDM@myrambler.ru](mailto:FDM@myrambler.ru)

The paper considers the mathematical model that adequately describes the EMF created by the induction heating system, with regard to the problem of moisture absorption, and the results of an experimental test of the distribution of the electromagnetic field around a source that is an inductor. The article considers calculation of the electric field strength in a given volume of space created by an inductor consisting of several turns of a copper wire, based on the mathematical model of heating a dielectric tablet placed inside electron-beam tubes. The influence of electromagnetic fields on humans, technological processes, consisting of several sources of the same type, is considered. The calculation of the boundaries of the sanitary protection zone for three inductors at the design stage of industrial production sites is given. The construction of a mathematical model for predicting the level of distribution of the E-component of the electromagnetic field made it possible, through computer simulation, to evaluate the dependence of the form of the sanitary protection zone around the investigated object on the mutual arrangement of sources of the electromagnetic field to which the same power was supplied from the generators of high-frequency heating. The article studies the effect of the geometric and electromagnetic properties of the induction heating system on the emitted field, general laws governing the behavior of the electromagnetic field in the near-field zone and the recommendations for determining the linear dimensions of the zone where the electric field strength is less than the normalized values. Instrumental measurements and calculated values of the electromagnetic field parameters confirmed the adequacy of the proposed model

Key words: mathematical model, high-frequency heating installations, electromagnetic field, moisture absorption

## References

1. Knyazhevskaya G.S., Firsova M.G., Kil'keev R. Sh., Shamova A. N. "High-frequency heating of dielectric materials", ("Vysokochastotnyy nagrev dielektricheskikh materialov"), Leningrad, Mashinostroenie, 1989, 64 p.
2. Nemkom V.S., Demidovich V.B. "Theory and calculation of induction heating devices" ("Teoriya i raschet ustroystv induktsionnogo nagreva"), Leningrad, Energoatomizdat, 1988, 280 p.
3. Krylov V.I., Bobkov V.V., Monastyrskiy P.I. "Computational methods. In 2 parts." ("Vychislitel'nye metody: v dvukh chastyakh"), Moscow, Nauka, 1976, 392 p.; 1977, 399 p.
4. Slukhotskiy A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A. "Induction heating plants" ("Ustanovki induktsionnogo nagreva"), Leningrad, Energoizdat, 1981.
5. Slukhotskiy A.E., Rysin S.E. "Inductors for induction heating" ("Induktory dlya induktsionnogo nagreva"), Leningrad, Energia, 1974.
6. Fyedorov D.M., Pitolin V.M., Fyedorov M.N. "Modeling of the distribution of the electromagnetic field of overhead power lines by the method of mirror images", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 8, pp. 9-12.
7. Fyedorov D.M., Pitolin V.M. "Mathematical model of the distribution of the electric power component of the EMF of an air power line", *Proc. of All-Russian Conf. "New technologies in scientific research, design, management, production" (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovani, upravlenii, proizvodstve: trudy Vseros. konf.)*, Voronezh, 2010, pp. 26-27.
8. Fyedorov D.M., Pitolin V.M., Fyedorov M.N. "Algorithm for calculating the electromagnetic fields of a three-phase line of arbitrary geometry", *Proc. of All-Russian Conf. "Intellectual information systems" (Intelektual'nye informatsionnye sistemy: trudy Vseros. konf.)*, Voronezh, 2010, pp. 40-41.
9. Fyedorov D.M., Pitolin V.M., Fyedorov M.N. "Estimation of the effectiveness of a complex two-stage method for optimizing the form of the biologically dangerous zone of HTTL", *Proc. of the international conference and the Russian scientific school. Part 2. "System problems of reliability, quality, information-telecommunication and electronic technologies in innovative projects (INNOVATIKA - 2011)" (Sistemnyye problemy nadozhnosti, kachestva, informatsionno-telekommunikatsionnykh i elektronnykh tekhnologii v innovatsionnykh proyektakh (INNOVATIKA - 2011): materialy mezhdunar. konf. i Ros. nauch. shk.)*, Moscow, Energoatomizdat, 2011, pp. 156-159.
10. Fyedorov D.M., Pitolin V.M., Fyedorov M.N. "Modeling the zone of exposure to electromagnetic fields of the hectometric range over a human", *Proc. of 1 scientific and practical conference with international participation "Problems and prospects for ensuring complex security of people and society under modern conditions" ("Problemy i perspektivy obespecheniya kompleksnoy bezopasnosti lichnosti i obshchestva v usloviyakh sovremennosti: materialy 1 nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. ucha-stiyem")*, Voronezh, Nauka-Yunipress, 2012, pp. 95.
11. GOST 12.1.006-84 "System of occupational safety standards. Electromagnetic fields of radio frequencies. Permissible levels at the workplace and requirements for monitoring"
12. Nikolskiy V.V., Nikolskaya T.I. "Electrodynamics and propagation of radio waves" ("Elektrodinamika n rasprostranenie radiovoln"), Moscow, Nauka, 1989, 544 p.

## МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Б.В. Матвеев, В.А. Серeda

Предлагается методика построения непримитивных корректирующих циклических кодов длиной с кратностью равной байту для цифровых систем передачи и обработки информации, включая устройства памяти, а также систем передачи данных, использующих обратную связь. В таких системах важную роль играет правильный выбор корректирующего кода, обеспечивающий исправление или обнаружение ошибок и повышающий их эффективность. Разрядность данных обычно используют кратной 8 (байту), что напрямую связано с соответствующей кратностью процессорных устройств (16, 32, 64). При этом число информационных и проверочных символов кода также должно быть кратным байту и может выбираться одинаковым или отличаться в пределах той же кратности. Наиболее часто циклические корректирующие коды являются примитивными, и их длина не соответствует кратности байту. Это приводит к необходимости выбора непримитивных циклических кодов, набор которых, к сожалению, ограничен. В связи с этим в ряде случаев возникает потребность построения непримитивного циклического кода для решения определенных задач в цифровых системах, что может быть реализовано с помощью конкретной методики выбора образующего полинома. Образующий полином циклического кода должен удовлетворять следующим требованиям: должен быть ненулевым; вес его не должен быть меньше кодового расстояния кода; должен иметь максимальную степень числа проверочных символов в коде; все разрешенные кодовые комбинации циклического кода должны иметь свойство делимости на полином без остатка. Для получения нового полинома для циклического кода была разработана специальная программная процедура, реализованная на ЭВМ. Последовательность действий в процедуре следующая: формирование набора двоичных чисел с заданной разрядностью; отбор двоичных чисел с весом большим или равным кодовому расстоянию корректирующего кода; формирование полиномов из набора двоичных чисел; построение образующей матрицы кода по полиномам; проверка образующей матрицы кода на существование кода с заданным кодовым расстоянием; переход к новому полиному в случае невыполнения условия по кодовому расстоянию; фиксация всех полиномов, удовлетворяющих требованиям существования образующей матрицы кода. Таким образом, предложенная методика выбора непримитивных полиномов для циклических корректирующих кодов длиной кратной байту может быть реализована для получения других еще не построенных корректирующих циклических кодов для применения их в цифровых устройствах различного назначения.

Ключевые слова: циклический код, кодовое расстояние, обработка информации

### Введение

В системах цифровой обработки информации имеющих устройства памяти, а также в различных системах передачи данных важную роль играет правильный выбор корректирующего кода, обеспечивающий исправление или обнаружение ошибок и повышающий эффективность функционирования систем. В цифровых системах разрядность данных обычно берут кратной 8 (байту), что напрямую связано с соответствующей кратностью, используемой в ЭВМ (16, 32, 64) [1]. При этом число информационных и проверочных символов кода также должно быть кратным байту и может выбираться одинаковым или отличаться в пределах той же кратности.

Однако большинство циклических корректирующих кодов являются примитивными [2] и их длина не соответствует кратности байту. Выбор непримитивных циклических кодов с требуемой длиной ограничен и не всегда подходит для решения конкретных задач. В связи с этим в ряде случаев возникает необходимость построения

непримитивного циклического кода под конкретное применение в цифровых системах.

Для решения такой задачи требуется определенная методика получения непримитивных циклических кодов, структура которых отлична от примитивных кодов. Разработке такой методики и посвящена предлагаемая статья, где на примере известных кодов примитивного БЧХ (15, 7) с кодовым расстоянием  $d = 5$  и непримитивного кода (17, 9) с  $d = 5$  [3] рассматриваются процедуры предлагаемой методики и последовательность их выполнения.

### Постановка задачи

Недостатком кода (15, 7) является не кратное байту число информационных символов  $k = 7$  при кратности числа проверочных символов  $r = 8$ . Таким образом, наиболее подходящим корректирующим кодом был бы циклический код (16, 8) с  $k = 8$  и кодовым расстоянием  $d = 5$ , на примере получения которого и излагается суть предлагаемой методики.

Информационные и проверочные символы в кодовой комбинации циклического кода располагаются в строго определенных местах. В частности, как правило, первые  $k$  символов являются информационными, а остальные символы – проверочными. Такие коды обозначаются  $(n, k)$ . В корректирующих кодах с исправлением ошибок кодовое расстояние (минимальное количество

Матвеев Борис Васильевич – ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, тел. 8 960 1384561, e-mail: matveevzavkaf@mail.ru

Серeda Владимир Александрович – ВГТУ, магистрант, тел. 8 920 444 64 15, e-mail: sereda.volodya2010@yandex.ru

символов, которыми одна разрешенная кодовая комбинация отличается от другой) связано с числом исправляемых ошибок  $t$  соотношением

$$d \geq 2t + 1. \quad (1)$$

Однако вопрос об определении минимального числа избыточных символов для построения кода с исправлением  $t$  ошибок до настоящего времени не решен, существует лишь ряд верхних и нижних оценок границы этой области [4]. Для этой цели наиболее часто используют оценки Хемминга и Варшавова-Гильберта при вычислении числа проверочных символов  $r$  корректирующего кода длиной  $n$  с кодовым расстоянием  $d$ .

Применительно к рассматриваемой задаче следует оценить возможность существования циклического корректирующего кода (16, 8), с числом информационных символов 8 вместо 7, как у кода БЧХ (15, 7).

Границу Хемминга получают из следующих соображений. Пусть задана кодовая комбинация с блоковой длиной  $n$ , и в ней возникают независимые ошибки кратностью до  $t$  включительно. Общее число ошибок в комбинации складывается из однократных, двукратных, трехкратных и т.д. до  $t$ -кратных ошибок и может быть определено из равенства

$$N_{ош} = C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^t. \quad (2)$$

Это число ошибок должно найти соответствие в количестве проверочных символов  $r$  и определяться через них как соотношение

$$2^r - 1 \geq C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^t$$

или

$$2^r \geq 1 + C_n^1 + C_n^2 + C_n^3 + \dots + C_n^t. \quad (3)$$

Из (3) получается граница Хемминга для проверочных символов корректирующего кода

$$r \geq \log_2 \sum_{i=0}^t C_n^i, \quad (4)$$

которую можно интерпретировать как границу существования кода при минимальной избыточности, необходимой при заданных  $k$  и  $t$ .

Применительно к нашему случаю с  $n = 16$  и  $t = 2$  получим в соответствии с (4)

$$r \geq \log_2 [1 + C_{16}^1 + C_{16}^2]. \quad (5)$$

Отсюда после вычисления логарифма получаем

$$r \geq 7.1. \quad (6)$$

Из (6) следует, что наименьшее значение числа проверочных символов для циклического кода (16, 8) может быть оценено как  $r = 8$  и увеличение числа информационных символов с 7 до 8 допустимо, при применении соответствующего образующего полинома циклического кода  $P(x)$ .

Образующий полином  $P(x)$  циклического кода должен удовлетворять следующим требованиям [3]:

1.  $P(x)$  должен быть ненулевым;

2. вес  $P(x)$  не должен быть меньше кодового расстояния кода  $d_{\min}$ , т.е.  $[P(x)] \geq d_{\min}$ ;
3.  $P(x)$  должен иметь максимальную степень  $r$  (число проверочных символов в коде);
4. все разрешенные кодовые комбинации циклического кода должны иметь свойство делимости на  $P(x)$  без остатка.

Расширение информационного пространства ( $k = 8$ ) у кода (15, 7) с образующим полиномом  $P(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + 1$  приводит к образующей матрице, показанной на рис. 1.

$$\begin{bmatrix} 10000000 & 00000001 \\ 01000000 & 11101000 \\ 00100000 & 01110100 \\ 00010000 & 00111010 \\ 00001000 & 00011101 \\ 00000100 & 11100110 \\ 00000010 & 01110011 \\ 00000001 & 11010001 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Образующая матрица циклического кода (15, 7) с расширением информационного пространства

Как видно из рис. 1 циклический код (16, 8) с такой матрицей не обеспечивает требуемого кодового расстояния  $d = 5$ , необходимого для исправления двух ошибок ( $t = 2$ ), так как верхняя строка матрицы, принадлежащая к разрешенной кодовой комбинации, имеет вес  $d = 2$ .

Отсюда следует, что повышенные требования к числу информационных символов могут быть реализованы при другом образующем полиноме  $P(x)$ , который должен удовлетворять требованиям, упомянутым выше.

### Методика

Для получения нового  $P(x)$  для циклического кода (16, 8) с  $d = 5$  была разработана специальная программная процедура, реализованная на ЭВМ.

Последовательность действий в процедуре следующая:

1. Формирование набора двоичных чисел с разрядностью 7;
2. Отбор двоичных чисел с весом  $P(x) \geq d_{\min}$ ;
3. Формирование  $P(x)$  из набора двоичных чисел;
4. Построение образующей матрицы кода по  $P(x)$ ;
5. Проверка образующей матрицы кода на существование кода (16, 8) с  $t = 2$ ;
6. Переход к новому  $P(x)$  в случае невыполнения условия п. 2;
7. Фиксация всех  $P(x)$  по требованиям п. 5.

Формирование двоичных чисел следует проводить, начиная с требования минимального количества единиц в них, чтобы обеспечивалось необходимое кодовое расстояние  $d = 5$ . Первая строка такого набора формируется в

виде  $|0000111|_1$ , где внутренняя часть отражает двоичное число, полином  $P(x) = 100001111$  и вес его  $[P(x)] = 5$ . Вторая строка образует следующий полином, т.е.  $P(x) = |0001011|_1 = 100010111$  и т.д. Всего полиномов при таком выборе образуется, как  $C_7^3 = 35$ . Последний 35 полином будет  $P(x) = 111100001$ , отражающий десятичное число 112. Первый полином отражал число 7, второй 11.

По набору полиномов строятся образующие матрицы циклического кода (16, 8) и проверяются на предмет их соответствия условиям существования кода с  $d = 5$ .

Проверка осуществляется по правой (проверочной) части образующей матрицы, первая часть которой является единичной матрицей (см. рис. 1).

Условия проверки следующие:

1. число единиц в любой строке правой части образующей матрицы должно составлять не менее чем  $d-1$ , т.к. одна единица разрешенной кодовой комбинации для этого случая находится в левой части по определению единичной матрицы;
2. сумма по модулю 2 двух любых строк правой части образующей матрицы должна содержать число единиц большее или равное  $d-2$ ;
3. сумма по модулю 2 трех любых строк должна содержать число единиц большее или равное  $d-3$ ;
4. сумма по модулю 2 четырех любых строк (в общем случае  $2t$  строк) должна содержать число единиц большее или равное одной (в общем случае  $d-2t$ ).

Невыполнение хотя бы одного из условий проверки свидетельствует о не принадлежности полинома циклического кода (16, 8) к коду с величиной  $d \geq 5$ .

Проверка полиномов с весом  $[P(x)] = 5$  показала наличие только трех образующих полиномов, выполняющих условие 1, но 2 из них при проверке второго условия не обеспечили величину кодового расстояния большую или равную  $d-2 = 3$ . В связи с этим проверка для этого случая третьего и четвертого условия не производилась. Третий полином  $|0011100|_1$  обеспечил выполнение всех условий и может использоваться для кода (16, 8).

Дальнейшая проверка полиномов с весом  $[P(x)] = 6$  не обеспечила получение циклического кода (16, 8) с кодовым расстоянием  $d \geq 5$ . При трех полиномах  $[P(x)] = 6$ , выбранных из 35 возможных, все обеспечили построение образующей матрицы циклического кода (16, 8) только с кодовым расстоянием  $d = 2$ . Для  $[P(x)] = 7$  из возможных 21 полинома было выбрано 5, обеспечивающих

предварительное построение образующей матрицы циклического кода (16, 8). Из пяти построенных образующих матриц две обеспечили для кода (16, 8) кодовое расстояние  $d = 2$ , две показали наличие у кода (16, 8) только кодового расстояния  $d = 1$ .

Образующая матрица с полиномом

$$P(x) = 111010111 \Rightarrow x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$$

показала соответствие ее структуры циклическому коду (16, 8) с  $d = 5$ .

Полиномы с  $[P(x)] = 8$  при их количестве семь не обеспечили соответствующего построения матрицы циклического кода (16, 8) с  $d = 5$ . Все они показали возможность построения образующей матрицы только с кодовым расстоянием  $d = 4$ .

Таким образом, только два непримитивных полинома циклического кода, первый  $P(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$  и второй  $P(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$  обеспечивают построение корректирующего циклического кода (16, 8) с  $d = 5$  и  $t = 2$ . Из двух полученных полиномов первый в справочниках не приводится, второй полином соответствует таблице в [3].

Образующая матрица корректирующего циклического кода (16, 8)  $P(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$  показана на рис. 2

$$\begin{bmatrix} 10000000 & 10011110 \\ 01000000 & 01001111 \\ 00100000 & 11001100 \\ 00010000 & 01100110 \\ 00001000 & 00110011 \\ 00000100 & 11110010 \\ 00000010 & 01111001 \\ 00000001 & 11010111 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Образующая матрица корректирующего циклического кода (16, 8)

Образующая матрица корректирующего кода (16, 8) с  $P(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$  показана на рис. 3.

$$\begin{bmatrix} 10000000 & 01001110 \\ 01000000 & 00100111 \\ 00100000 & 10001111 \\ 00010000 & 11011011 \\ 00001000 & 11110001 \\ 00000100 & 11100100 \\ 00000010 & 01110010 \\ 00000001 & 00111001 \end{bmatrix}$$

Рис. 3. Образующая матрица корректирующего циклического кода (16, 8)

$$с P(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

### Выводы

Отсюда следует, что предложенная методика выбора непримитивных полиномов для циклических корректирующих кодов длиной кратной байту может быть реализована для получения других еще не построенных корректирующих циклических

кодов для применения их в цифровых устройствах различного назначения. Так при обработке предлагаемой методики наряду с известным [3] полиномом кода (17, 9)

$P(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$  получен второй

полином кода (17, 9)  $P(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$  с кодовым расстоянием  $d = 5$  и  $t = 2$ , имеющий производящую матрицу (рис. 3), позволяющую при существующем в ней наборе строк, по сравнению с предыдущей матрицей, например, проще организовать мажоритарное декодирование кода (16, 8), полученного из кода (17, 9).

1. Basic Algorithm for the Coherent Digital Processing of the Radio Signals / A.N. Glushkov, V.P. Litvinenko, B.V. Matveev, O.V. Chernoyarov, A.V. Salnikova // *Proceeding of the 2015 International Conference on Space Science & Communication*. – Malaysia, Langkawi, 2015. – 5 p.

2. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. 800 с.

3. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, мл. Дж. Кейн; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. 392 с.

4. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Улдон; пер. с англ. М.: Мир, 1976. 593 с.

Воронежский государственный технический университет

## METHODOLOGY OF CONSTRUCTION OF CORRECTIVE CYCLIC CODES FOR DIGITAL SYSTEMS OF INFORMATION TRANSMISSION AND PROCESSING

**B.V. Matveev<sup>1</sup>, V.A. Sereda<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: sereda.volodya2010@yandex.ru

A technique is proposed for constructing non-primitive corrective cyclic codes with a length equal to a byte for digital systems for transferring and processing information, including memory devices, as well as data transmission systems using back-coupling. In such systems, the right choice of the corrective code plays an important role, providing correction or detection of errors and increasing their effectiveness. The bit capacity of the data is usually a multiple of 8 (byte), which is directly related to the corresponding multiplicity of the processor devices (16, 32, 64). At the same time, the number of information and verification code symbols must also be a multiple of a byte and can be chosen the same or different within the same multiplicity.

Most often the cyclic corrective codes are primitive, and their length does not correspond to the multiplicity of a byte. This leads to the need to select non-primitive cyclic codes, the collection of which is limited, unfortunately. In this connection, in a number of cases, there arises the need to construct a non-primitive cyclic code for solving certain problems in digital systems, which can be realized with the help of a specific method of selecting a generator polynomial.

A generator polynomial of a cyclic code must satisfy the following requirements: it must be non-zero; its weight should not be less than the code distance of the code; it should have the maximum degree of the number of check symbols in the code; all allowed code combinations of the cyclic code should have the property of divisibility on the polynomial without an excess.

To obtain a new polynomial for cyclic code, a special software procedure was developed, implemented on a computer. The sequence of actions in the procedure is as follows: the formation of a set of binary numbers with a given digit capacity; selection of binary numbers with a weight greater than or equal to the code distance of the corrective code; formation of polynomials from a set of binary numbers; constructing a generator matrix of the code by polynomials; checking the generator matrix code for the existence of a code with a given code distance; transition to a new polynomial if the condition is not fulfilled by code distance; fixation of all polynomials satisfying the requirements for the existence of a code generator matrix. Thus, the proposed method for selecting non-primitive polynomials for cyclic corrective codes with a length multiple of a byte can be realized to obtain other correction codes that have not yet been constructed for the use in digital devices of various purposes

Key words: cyclic code, code distance, information processing

### References

1. Glushkov A.N., Litvinenko V.P., Matveev B.V., Chernoyarov O.V., Salnikova A.V. "Basic Algorithm for the Coherent Digital Processing of the Radio Signals", *Proceeding of the 2015 International Conference on Space Science & Communication*, Malaysia, Langkawi, 2015, p. 5

2. Proakis J. "Digital Communication" (Russian ed.: Prokis D. "tsifrovaya svyaz", Moscow, Radio i svyaz', 2000, 800 p.)

3. Clark J., Kane Jr. J. "Encoding with error correction in digital communication systems" (Russian ed.: Klark D., Keyn D. "Kodirovanie s ispravleniem oshibok v sistemakh tsifrovoy svyazi", Moscow, Radio I svyaz', 1987, 392 p.)

4. Peterson W., Weldon E. J. Jr. "Error-correcting codes" (Russian ed.: Piterson U., Ueldon E., "Kody ispravlyayushchie oshibki", Moscow, Mir, 1976, 593 p.)

## ДИАГНОСТИКА МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

М.И. Горлов, А.А. Скоморохов, Д.М. Жуков

В современной технике повсеместно распространено применение микроконтроллеров (МК) в качестве управляющих компонентов. Это обусловливается рядом причин, в числе которых простота разработки и внедрения, дешевизна, относительно низкое энергопотребление, малые габариты и широкий спектр применения. При использовании микроконтроллеров в таких областях, как автомобильная электроника, медицинская техника и пр., встает вопрос об обеспечении надлежащей надежности данных приборов [1].

На сегодняшний день лидирующими методами контроля качества и надежности полупроводниковых изделий являются разрушающие методы, достоверность которых неоднократно доказана. Среди современных диагностических методов самыми актуальными являются неразрушающие методы контроля качества, так как они позволяют, не повреждая кристалл, определить его внутренние свойства. В связи с этим ведется активная работа по поиску альтернативных методов разбраковки полупроводниковых изделий.

В данной статье описан метод диагностического неразрушающего контроля качества микроконтроллеров, основанный на измерении критического напряжения питания. В статье доказывается зависимость минимального рабочего напряжения от дефектности интегральной схемы, которая проявляется в разбросе параметров исходных материалов и нестабильности технологических процессов при производстве полупроводниковой продукции.

Метод ориентирован на разделение микроконтроллеров по надежности на этапе как выходного, так и входного контроля интегральных схем с целью повышения уровня качества электронно-компонентной базы. Метод актуален для устройств, закладываемых в схемы с повышенными требованиями к качеству используемых управляющих компонентов

Ключевые слова: микроконтроллер, управляющее устройство, критическое напряжение питания, качество интегральных схем

Известные методы определения потенциальной надежности или сравнения надежности интегральных схем (ИС), основанные на критическом напряжении питания (КНП), базируются на последовательном снижении напряжения питания с номинального до некоторого минимального значения, при котором ИС сохраняет функционирование [2].

Применение метода КНП для диагностирования микроконтроллеров позволит выявить наиболее чувствительные к низкому напряжению питания конструктивные блоки ядра и периферии, затем на основании полученных данных разделять МК по надежности.

Основная идея данного метода заключается в следующем: МК программируется тестирующей программой нацеленной на диагностирование определенного блока периферии или ядра, затем происходит измерение КНП.

Особый интерес представляет ядро МК – микропроцессор. Исследование микропроцессора представляет собой наиболее сложную задачу. Для реализации исследования потребуется разложить программу микроконтроллера на такты и не подвергать критическому напряжению блок ввода/вывода информации, так как логические уровни «0» и «1» зависимы от напряжения питания.

Объектом исследования был выбран микроконтроллер ATmega8A в силу схожести архитектуры с множеством МК других производителей и распространенности во всех направлениях машиностроения и электроники (обработчики датчиков: термометры, тахометры, тонометры; арифметико-логическое устройства (АЛУ): калькуляторы, вольтметры, часы, схемы управления и прочие устройства).

Для того чтобы осуществить метод КНП для микроконтроллера необходимо изучить его архитектуру. На рис. 1 изображена полная блок-схема всех узлов микроконтроллера ATmega8A.

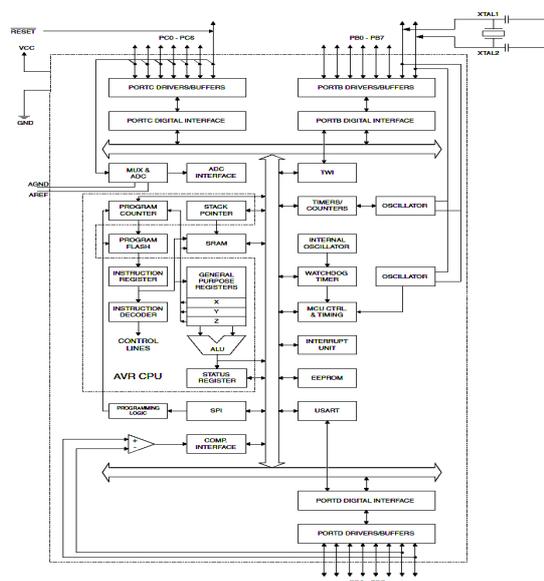


Рис. 1. Блок-схема ATmega8A [3]

Горлов Митрофан Иванович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 243-76-95  
Скоморохов Александр Иванович - ВГТУ, магистр, e-mail: skomorohov.aa@yandex.ru  
Жуков Дмитрий Михайлович - ВГТУ, аспирант, e-mail: ddimochka@mail.ru

Из данной схемы видно, что ядро состоит из множества неразделимых функциональных блоков. Процессор является исполнителем команд, которые хранятся в блоке флеш-памяти, промежуточные результаты и настройки хранятся в регистрах общего назначения, конечные результаты выводятся из МК блоком ввода/вывода данных.

Надежность микроконтроллера, будет определяться самым подверженным к критическому напряжению блоку. Из вышеперечисленных блоков отдельно от ядра можно исследовать блок ввода/вывода информации, что практически дает нам возможность оценить устойчивость ядра микроконтроллера к КНП.

В исследуемый микроконтроллер загружается вычислительная операция. Согласно данным из технической документации (рис. 2) процессор выполняет ее за один такт тактирующего сигнала, и в течение этого же такта записывает результат в регистр. Последующими тактами из регистра информация выдается на порт ввода/вывода.

Для упрощения исследования эксперимент разделяется на два этапа:

1. Поиск критического напряжения питания для блока ввода/вывода информации. КНП - значение напряжения при котором заведомо известный результат вычисления АЛУ будет искажен. Данный процесс автоматизирован, и менее трудоемок чем второй этап.

2. Поиск КНП для ядра МК. Изучение работы процессора "в обход" блока ввода/вывода информации требует понимания, что происходит в ядре МК при каждом тактирующем импульсе. Такты подаются однократно, процессы обработки внутренних команд и вычисления АЛУ происходят при пониженном напряжении питания, а вывод результата через блок ввода/вывода – при нормальном.

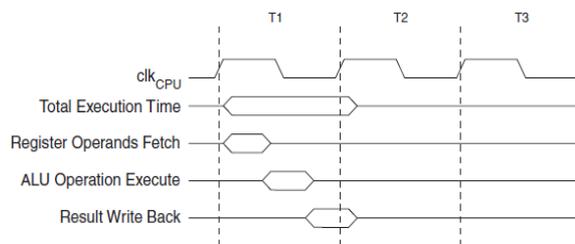


Рис. 2. Временная диаграмма вычислительного процесса [3]

Таким образом, методом КНП можно установить, при каком минимальном напряжении питания ядро может корректно функционировать. Произведя исследования на выборке микроконтроллеров можно разделить их по надежности. Для получения большего числа информативных параметров метод КНП проводится при разных температурах (в пределах рабочих температур), например, от плюс 10 до плюс 85°C. На основании данного исследования будет выявлена зависимость влияния температуры на КНП. Данный метод можно рассматривать как разновидность метода "Термо-КНП".

### Методика исследования

Для осуществления метода КНП используется схема показанная на рис. 3. Схема содержит все основные узлы технологической оснастки и исследуемого микроконтроллера.

Для исследования методом случайной выборки были отобраны по 1-3 интегральной схеме из трех производственных партий.

Исследованию КНП от температуры (в пределах 10 - 85 °С) подверглись шесть микроконтроллеров АТМega8А (рис. 4), результаты сведены в табл. 1.

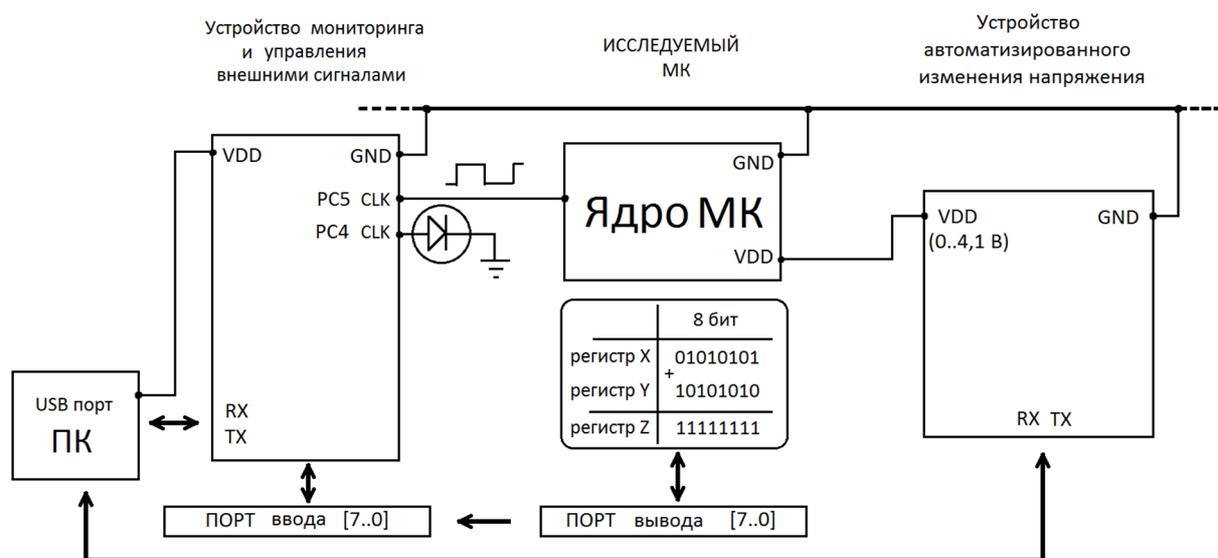


Рис. 3. Схематичное представление исследования

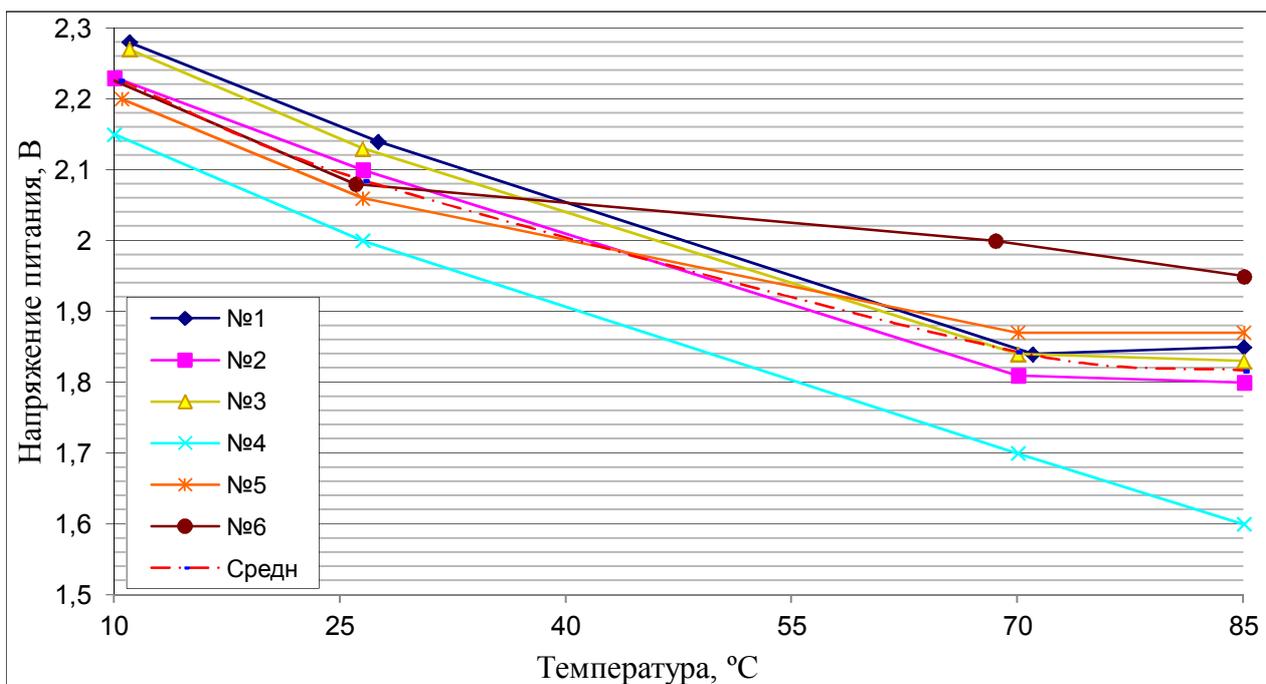


Рис. 4. Зависимость КНП от температуры

Таблица 1

Результаты измерения КНП

Се- рия	Обра- зец №	Измерения КНП				
		Темпер.	11	27.5	71	85
1503	1	Темпер.	11	27.5	71	85
		Отказ	2.28	2.14	1.84	1.85
1503	2	Темпер.	10	26.5	70	85
		Отказ	2.23	2.1	1.81	1.8
1503	3	Темпер.	11	26.5	70	85
		Отказ	2.27	2.13	1.84	1.83
1414	4	Темпер.	10	26.5	70	85
		Отказ	2.15	2	1.7	1.6
1431	5	Темпер.	10.5	26.5	70	85
		Отказ	2.2	2.06	1.87	1.87
1431	6	Темпер.	9.5	26	68.5	85
		Отказ	2.23	2.08	2	1.95
Ср. знач.	Ср. знач.	Темпер.	10.33	26.6	69.9	85.0
		Отказ	2.23	2.09	1.84	1.82

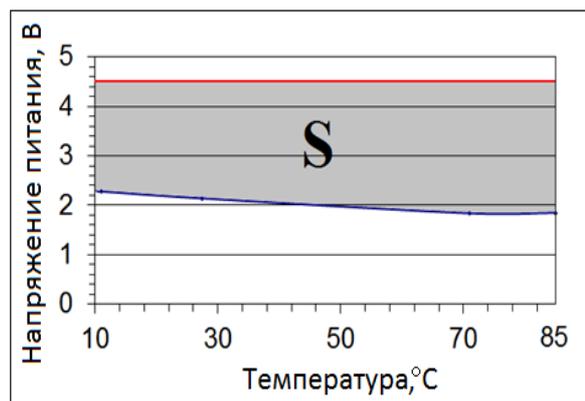


Рис. 5. Пояснение к расчету информативной площади КНП от температуры окружающей среды

За минимально допустимое напряжение питания принято значение, указанное в технической документации на данный микроконтроллер – 4.5 В. Эксперимент показал, что КНП ядра микроконтроллера имеет прослеживаемую зависимость от температуры.

Для систематизации анализа результатов и последующего разделения микроконтроллеров по КНП, используется площадь области на графике с одной стороны ограниченная прямой 4.5 В (соответствующей минимальному рабочему напряжению согласно технической документации), с другой - кривой зависимости КНП от температуры окружающей среды в пределах от 10 до 85°C (рис. 5).

Данная площадь количественно выражает стойкость микроконтроллера к понижению питающего напряжения в диапазоне температур

от 10 до 85°C. В общем случае можно выделить следующую закономерность:

1. У основной массы микроконтроллеров площадь имеет значение близкое к среднестатистическому значению по всей выборке.
2. У менее стойких микроконтроллеров информативная площадь будет в диапазоне от нуля (так как будет стремиться к номинальному значению, заявленному в технической документации) до среднестатистического значения.
3. У более стойких микроконтроллеров информативная площадь будет выше среднестатистического значения.

Примечание: кривая зависимости КНП от температуры окружающей среды не должна пересекать прямую 4.5 В, так как минимальное напряжение питания не может быть выше, чем заявленное в

технической документации, такие микросхемы отбраковываются на производстве.

В последующем значение информативной площади будет связано с качеством технологических процессов при изготовлении микросхем и дефектностью структуры ИС.

### Результаты исследования

Таблица 2  
Разделение образцов по информативной

Номер образца	Информативная площадь КНП	Серия
4	198.04	1414
2	189.66	1503
ср. знач.	188.25	-
5	187.64	1431
3	185.03	1503
6	184.91	1431
1	184.14	1503

Из табл. 2 видно, что КНП внутри одной серии микросхем может изменяться (серия 1503), что свидетельствует о колебаниях параметров технологических процессов при изготовлении полупроводниковых материалов и технологических процессов изготовления ИС. Дефектность в данных структурах не одинакова [4].

Чтобы доказать зависимость КНП от дефектности структуры, воспользуемся внешним дестаби-

лизирующим фактором, таким как электростатический разряд (ЭСР). При воздействии ЭСР к исследуемым ИС будет возрастать дефектность кристаллов и, как следствие, будет происходить изменение КНП.

В табл. 3 отражена зависимость значения КНП у образцов от воздействия дестабилизирующего фактора ЭСР.

Образцы подверглись электростатическим разрядам величиной 12 кВ по модели тела человека через контакты питания (Vss) и земли (Gnd). Через каждые 50 разрядов измерялся уровень КНП. За отказ микроконтроллера принята величина КНП, при которой наблюдалось нарушение очередности выполнения команд, происходил сбой в вычислениях АЛУ или микроконтроллер полностью отключался.

Воздействие ЭСР повреждает информацию записанную во Flash-память микроконтроллера, поэтому в ходе проведения эксперимента потребовалась периодическая перезапись программы микроконтроллеров, после чего эксперимент продолжался.

По данным табл. 3 прослеживается зависимость количества внесенных дефектов на изменение КНП. Образцы под номером 1, 3 и 6 после 250 ЭСР величиной 12 кВ достигли уровня КНП большего, чем допускается технической документацией на данный микроконтроллер (больше 4.5 В), в то время как образцы под номером 2, 4 и 5 не достигли критического уровня КНП, т.к изначально обладали меньшей дефектностью.

В последующем будет проведен отжиг микроконтроллеров, что приведет к частичной релаксации дефектов полученных в результате воздействий ЭСР. При повторном измерении КНП ожидается восстановление величины минимального питающего напряжения до состояния предшествующего воздействиям ЭСР, что еще раз подтвердит зависимость КНП от дефектности структуры.

Таблица 3

Влияние дефектности кристалла на уровень КНП

Величина КНП \ Кол-во ЭСР (12 кВ)	Кол-во ЭСР (12 кВ)					
	0	50	100	150	200	250
Образец №1	2.16	2.65	3.11	3.6	4.12	4.61
Образец №2	2.11	2.58	3.05	3.52	4.02	4.46
Образец №3	2.14	2.61	3.1	3.6	4.1	4.59
Образец №4	2.01	2.45	2.93	3.41	3.89	4.36
Образец №5	2.07	2.55	3.03	3.53	4.01	4.49
Образец №6	2.09	2.57	3.06	3.58	4.06	4.54

## Выводы

При осуществлении выходного контроля качества ИС на заводе изготовителе и входного контроля потребителем, микроконтроллеры с уровнем КНП равным 2.5 вольт и микроконтроллеры с уровнем КНП равным 4.49 вольт считаются одинаково годными, об этом заявлено в технической документации, но по уровню КНП можно провести дополнительную оценку качества и выделить группы образцов повышенной надежности, а также отследить нарушение технологических процессов при изготовлении ИС, если тенденция кривизны информативной площади КНП выпускаемых микросхем будет значительно отличаться от среднестатистического значения.

Таким образом, уровень КНП может являться информативным параметром при анализе качества микроконтроллеров и его ядра.

## Литература

1. Лебедева Е.М. Методы обеспечения высокой надежности устройств на микроконтроллерах/ Е.М. Лебедева, О.Б. Лебедев, Е.С. Мезга// Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. – № 3
2. Горлов М.И. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий / М.И. Горлов, В.А. Сергеев. - Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2014. - С. 406.
3. Общие ресурсы по технической документации на микроконтроллеры Atmel. URL: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8\\_L\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf)
4. Метод отбраковки потенциально ненадежных изделий по значению критического напряжения функционирования/ М.И. Горлов, В.Т. Грищенко, В.И. Бойко, В.Н. Микрюков // Проблемы качества и надежности электронной техники, радиоэлектронной аппаратуры и средств управления: тез. докл. науч.-техн. конф. – Минск, 1988. – С. 19-20.

Воронежский государственный технический университет

## DIAGNOSTICS OF MICROCONTROLLERS ACCORDING TO THE RESULTS OF MEASUREMENT OF CRITICAL SUPPLY VOLTAGE

M.I. Gorlov<sup>1</sup>, A.A. Skomorokhov<sup>2</sup>, D.M. Zhukov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
tel. 8(473) 243-76-95

<sup>2</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: skomorokhov.aa@yandex.ru

<sup>3</sup>Graduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: ddimochka@mail.ru

In modern technology, the use of microcontrollers (MCs) as control components is ubiquitous. This is due to a number of reasons, including simplicity of development and implementation, cheapness, relatively low power consumption, small dimensions and a wide range of applications. When using microcontrollers in such areas as automotive electronics, medical equipment, etc., the question arises of ensuring the proper reliability of these devices.

To date, the leading methods of quality and reliability control of semiconductor products are destructive methods, the validity of which has been repeatedly proven. Among modern diagnostic methods, the most relevant are non-destructive methods of quality control, since they allow not to damage the crystal to determine its internal properties. In this connection, active work is being done to find alternative methods for sorting semiconductor products.

This article describes a method for diagnostic nondestructive quality control of microcontrollers, based on measuring the critical supply voltage. The article proves the dependence of the minimum working voltage on the defectiveness of the integrated circuit, which shows itself in the spread of the parameters of the initial materials and the instability of technological processes in manufacture of semiconductor products.

The method is focused on division of microcontrollers according to the reliability at the stage of both output and input control of integrated circuits in order to improve the quality of the electronic component base. The method is relevant for devices placed in circuits with increased requirements to the quality of the used control components

Key words: microcontroller, control device, critical supply voltage, quality of integrated circuits

## References

1. Lebedeva E. M., Lebedev O. B., Mezga E. S. "Methods of support of high reliability of devices with microcontrollers" ("Metody obespecheniya vysokoy nadezhnosti ustroystv na mikrokontrollerakh"), *Informatics, ADP equipment and engineering education (Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie)*, 2014, no. 3
2. Gorlov M.I., Sergeev V.A. "The modern diagnostic methods of quality and reliabilities control of semiconductor products" ("Sovremennye diagnosticheskie metody kontrolya kachestva i nadyezhnosti poluprovodnikovyykh izdeliy"), *Ulyanovsk, UISTU Publ.*, 2014, 406 p.
3. "The general resources according to technical documentation for Atmel microcontrollers" ("Obshchie resursy po tekhnicheskoy dokumentatsii na mikrokontrollery Atmel"), available at: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8\\_L\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_datasheet.pdf)
4. Gorlov M.I., Grishchenko V.T., Boyko V.I., Mikryukov V.N. "Method of rejection of potentially unreliable products on value of critical tension of functioning" ("Metod otbrakovki potencial'no nenadezhnykh izdeliy po znacheniyu kriticheskogo napryazheniya funktsionirovaniya"), *Proc. of technical Sientific Conference "Problems of quality and reliability of the electronic equipment, radio-electronic equipment and control facilities" (Tez.dokl. nauch.-tehn. konf. "Problemy kachestva i nadezhnosti jelektronnoj tekhniki, radiojelektronnoj apparatury i sredstv upravleniya")*, Minsk, 1988, pp. 19-20.

## ЦИФРОВОЙ ДЕМОДУЛЯТОР «В ЦЕЛОМ» ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ, КОДИРОВАННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ УОЛША

В.П. Литвиненко, А.А. Шафоростова, А.Н. Глушков, А.А. Макаров

Рассматриваются возможность аппаратной реализации и характеристики цифрового демодулятора «в целом» фазоманипулированных сигналов, кодированных последовательностями Уолша, на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Обработка сигнала «в целом» позволяет значительно повысить помехоустойчивость демодулятора по сравнению с поэлементным приемом и последующим декодированием кодовых комбинаций, однако известные технические решения требуют значительных вычислительных затрат, что затрудняет их реализацию при обработке высокочастотных сигналов. Использование некогерентной обработки сигналов с фазовой манипуляцией дает возможность отказаться от фазовой синхронизации демодулятора, что существенно упрощает аппаратуру. Описывается быстрый цифровой алгоритм некогерентной демодуляции кодированного фазоманипулированного сигнала «в целом», требующий выполнения минимального числа простых арифметических операций за период несущей. На исследуемый демодулятор получен патент РФ. Для его реализации на ПЛИС на языке VHDL разработано описание алгоритма демодуляции, проведен синтез HDL-кода и имплементация его при фиксированных параметрах сигнала. Проводится оценка затрат аппаратных ресурсов различных серий современных ПЛИС фирмы Xilinx для различных параметров обрабатываемого сигнала, определяется рабочий частотный диапазон и мощность, потребляемая кристаллом на высокой тактовой частоте. Приводится выражение для расчета вероятности ошибки демодуляции. Методами статистического имитационного моделирования в системе Matlab/Simulink проверяется работоспособность реализации демодулятора на базе ПЛИС, исследуется его помехоустойчивость при различных параметрах сигнала. Результаты исследований свидетельствуют о возможности аппаратной реализации предлагаемого демодулятора

Ключевые слова: фазовая манипуляция, цифровая демодуляция, коды Уолша, ПЛИС, VHDL, Matlab

### Введение

Двоичные сигналы с относительной фазовой манипуляцией (ОФМ) находят широкое применение в системах передачи дискретной информации. Они допускают некогерентную демодуляцию, не требующую фазовой синхронизации опорного генератора. Кодирование позволяет повысить помехоустойчивость приема сообщений, особенно при обработке кодовой комбинации «в целом» [1], при этом операции демодуляции и декодирования объединяются в общую процедуру формирования отклика на каждую допустимую кодовую комбинацию. Решение принимается по максимальному значению отклика.

**Постановка задачи.** Известные алгоритмы демодуляции «в целом» [1] требуют больших вычислительных затрат, и актуальной является разработка быстрых цифровых алгоритмов некогерентной демодуляции «в целом» сигналов с фазовой манипуляцией на основе базового алгоритма [2], аппаратная реализация такого демодулятора описана в [3]. Двоичные последовательности Уолша и их свойства описаны, например, в [4]. Длина последовательности с элементами  $\pm 1$  равна  $M = 2^m$  ( $m$  - целое число). Они представляются строками матрицы Адамара, которая, например, при  $M = 4$  имеет вид

$$A_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

число последовательностей равно  $M$ .

Коды Уолша ортогональны и используются в системах передачи дискретной информации, поэтому для повышения помехоустойчивости представляет интерес исследование возможностей их демодуляции «в целом».

**Демодулятор.** Структурная схема цифрового демодулятора «в целом» сигналов на основе последовательностей Уолша при  $M = 4$  показан на рис. 1.

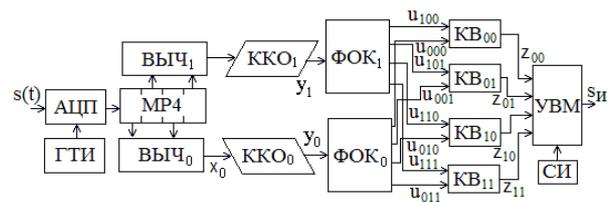


Рис. 1

Входной радиосигнал  $j$ -го элемента  $k$ -й кодовой комбинации с двоичной ФМ имеет вид

$$s_{kj}(t) = S \cos(2\pi f_0 t + \psi + a_{kj} \cdot \pi / 2), \quad (2)$$

где  $S$  - амплитуда,  $\psi$  - начальная фаза,  $f_0$  - несущая частота,  $a_{kj} = \pm 1$  - двоичный информационный символ последовательности Уолша из матрицы (1),  $k, j = 0, (M-1)$ .

Входной сигнал (2) поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), квантующий его с частотой  $f_{KB} = 4f_0$  (по четыре отсчета  $S_{i0}, S_{i1},$

Литвиненко Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 271-44-57, e-mail: litvinvp@gmail.com.  
Шафоростова Анна Алексеевна – ВГТУ, студент, тел. 8-950-776-18-62, e-mail: annshaforostova@gmail.com.  
Глушков Алексей Николаевич – Воронежский институт МВД РФ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 242-14-41, e-mail: a.glushkov75@yandex.ru.  
Макаров Александр Андреевич – Национальный исследовательский университет «МЭИ», аспирант, тел. 8-977-811-93-83, e-mail: o\_v\_ch@mail.ru.

$s_{i2}, s_{i3}$  на  $i$ -м периоде несущей  $T_0 = 1/f_0$  [2, 3]). Они последовательно запоминаются в многоразрядном регистре сдвига на 4 отсчета (МР4) и в вычитателях ВВЧ<sub>0</sub> и ВВЧ<sub>1</sub> формируются два квадратурных отсчета вида

$$x_{i0} = s_{i0} - s_{i2}, \quad x_{i1} = s_{i1} - s_{i3}, \quad (3)$$

которые смещены во времени на четверть периода (сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ ).

Значения  $x_{i0}$  и  $x_{i1}$  поступают в каналы квадратурной обработки ККО<sub>0</sub> и ККО<sub>1</sub> [3], их структурные схемы показаны на рис. 2, в которых реализуется быстрый алгоритм [2] вычисления величин

$$y_{i0} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)0} = \sum_{i=0}^{N-1} (s_{(i-k)0} - s_{(i-k)2}), \quad (4)$$

$$y_{i1} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)1} = \sum_{i=0}^{N-1} (s_{(i-k)1} - s_{(i-k)3}), \quad (5)$$

$N$  - число периодов несущей  $T_0$  в двоичном элементе кода.

Значения  $x_{i0}$  поступают на вход сумматора СУМ<sub>01</sub> ККО<sub>0</sub>, в котором складываются с предыдущим значением  $x_{(i-1)0}$ , записанным ранее в многоразрядный регистр сдвига на одну ячейку МР<sub>01</sub>, после чего в регистр записывается  $x_{i0}$ .

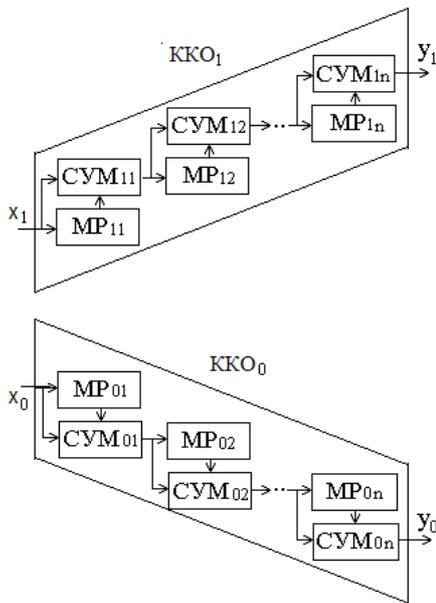


Рис. 2

Аналогично сумма  $x_{i0} + x_{(i-1)0}$  складывается с ранее записанным в регистр МР<sub>02</sub> сдвига на три ячейки значением  $x_{(i-2)0} + x_{(i-3)0}$ , после чего данные в регистре сдвигаются. Далее процесс быстрых вычислений производится аналогично и на выходе  $n$ -го каскада появляется сумма (4),

$$n = \log_2 N. \quad (6)$$

Аналогично вычисляется сумма (5) в ККО<sub>1</sub>. Значения  $y_{i0}$ ,  $y_{i1}$  поступают на формирователи откликов каналов ФОК<sub>0</sub> и ФОК<sub>1</sub>, структурные схемы

которых представлены на рис. 3, где вычисляются суммы и разности соседних пар величин  $y_{i0}$ ,  $y_{(i-N)0}$  и  $y_{i1}$ ,  $y_{(i-N)1}$  а затем суммы и разности этих пар, отстоящих на  $2N$  периодов.

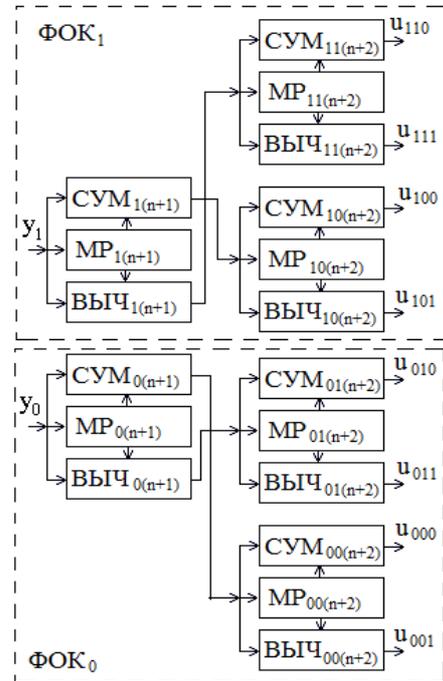


Рис. 3

По полученным откликам на выходах ФОК в момент поступления синхроимпульсов СИ цикловой синхронизации формируются отклики  $z_m$  демодулятора на каждую разрешенную кодовую комбинацию,

$$z_m = \sqrt{u_{0m}^2 + u_{1m}^2}, \quad (7)$$

$m = 00, 01, 10$  или  $11$ , по наибольшему из которых в устройстве выбора максимума (ВВМ) принимается решение о принятом кодовом слове.

**Реализация на ПЛИС.** Актуальной задачей является оценка затрат аппаратных ресурсов ПЛИС, необходимых для реализации рассматриваемого демодулятора. На языке описания аппаратуры интегральных схем (VHDL) [5] разработана его параметризованная RTL-модель. Входными воздействиями являются сигнал сброса, тактовый сигнал АЦП с частотой  $f_{KB} = 4f_0$  и шина данных АЦП. Выходным сигналом является демодулированная последовательность принятых данных. В зависимости от разрядности входных отчетов АЦП, а также от числа периодов  $N$  несущей, автоматически выбирается минимально необходимое число звеньев в канале квадратурной обработки и разрядность накопительных регистров.

Для оценки данных об объеме доступных ресурсов различного типа рассматривались ПЛИС фирмы Xilinx различных семейств [6, 7]. Критериями выбора являются: количество аппаратных ресурсов, стоимость, наличие ПЛИС в бесплатной версии программы ISE WebPACK. В рамках иссле-

дования использованы: XC6SL25 (Spartan-6), XC7K70T (Kintex-7), XC7A100T (Artix-7) стоимостью \$22, \$174 и \$194 соответственно.

Для проведения сравнительного анализа для каждой ПЛИС проводился синтез HDL-кода и имплементация при фиксированных параметрах: длине кодовой последовательности Уолша  $M=4$ , количестве периодов несущей  $N=64$ , разрядности шины АЦП  $R=12$ .

Временной анализ выявил, что реализованный демодулятор способен функционировать на высоких частотах. Для ПЛИС из семейства Spartan-6 максимально возможная тактовая частота составляет 578 МГц, для XC7A100T – 474 МГц, для XC7K70T – 619 МГц.

Анализ потребляемой мощности проводился при частоте дискретизации 200МГц. В ходе анализа выявлено, что ПЛИС седьмого поколения (XC7A100T и XC7K70T) потребляют 88 и 84 мВт соответственно, ПЛИС шестого поколения (XC6SL25) – 40 мВт.

**Оценка аппаратных затрат.** В таблице приведены результаты (используется/всего) количественной оценки требуемых аппаратных ресурсов (Slice Registers – D-триггеры, Slice LUTs – коммутационный элемент, DSP – аппаратный умножитель) для заданных параметров.

Как видно из таблицы, ПЛИС используют незначительное количество внутренних ресурсов для реализации работы демодулятора, что позволяет увеличить длину кодовой последовательности  $M$  и количество периодов несущей  $N$  на информационный символ.

ПЛИС / Эл-ты	XC6SL25	XC7K70T	XC7A100T
Slice Registers	766/30064 (2,55%)	763/82000 (0,93%)	763/126800 (0,6%)
Slice LUTs	3275/15032 (14,26%)	2891/41000 (7,05%)	2891/63400 (4,56%)
DSP	8/32 (21,05%)	8/240 (3,33%)	8/240 (3,33%)

Необходимо также учитывать влияние характеристик демодулятора на величину аппаратных ресурсов. Исследование влияния длины кодовой последовательности проводилось на ПЛИС XC7A100T (Artix-7) при количестве периодов несущей  $N=128$  и разрядности шины АЦП  $R=12$ . Зависимость количества Slice Registers, Slice LUTs, DSP (в процентах) от длины кодовой последовательности  $M$  представлена на рис. 4.

Анализируя полученную гистограмму, можно сделать вывод, что увеличение длины кода Уолша приводит к незначительному увеличению числа D-триггеров и увеличению числа блоков LUTs и DSP пропорционально  $M$ .

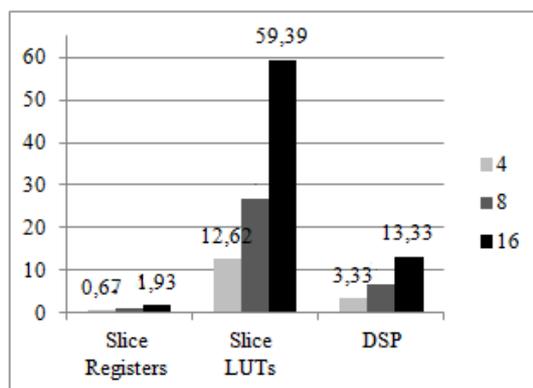


Рис. 4

**Помехоустойчивость.** Для оценки помехоустойчивости исследуемого демодулятора «в целом» при наличии гауссовского шума с независимыми отсчетами и дисперсией  $\sigma_{ш}^2$  используется выражение для вероятности ошибки [3]

$$p_{ош} = \sum_{k=0}^{M-1} \binom{M-1}{k} \frac{(-1)^{k-1}}{k+1} \exp\left(-M \frac{2k}{k+1} \frac{h_2^2}{2}\right), \quad (8)$$

$h_2$  - отношение сигнал/шум на бит,

$$h_2 = \sqrt{N} \frac{S}{\sigma_{ш}}. \quad (9)$$

Теоретическая зависимость  $p_{ош}(h_2)$  для  $M=4$  изображена на рис.5.

Исследование помехоустойчивости демодулятора «в целом» на основе последовательностей Уолша осуществлялось с помощью программы System Generator пакета ISE WebPACK. Полученные зависимости  $p_{ош}(h_2)$  для различного числа периодов несущей  $N$  представлены на рис.5.

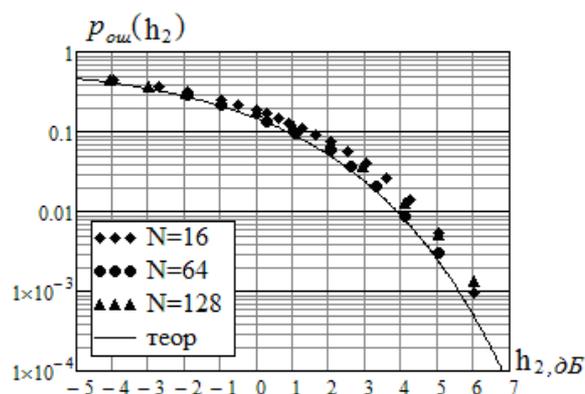


Рис. 5

Как видно, результаты моделирования согласуются с расчетами, следовательно, можно сделать вывод о достоверности RTL-модели математическому описанию демодулятора «в целом».

#### Выводы

Таким образом, демодулятор «в целом» высокочастотных фазоманипулированных последовательностей Уолша [3] может быть эффективно реализован на базе современных ПЛИС. Обеспечивается возможность некогерентной демодуляции «в

целом» высокочастотных фазоманипулированных сигналов, кодированных последовательностями Уолша, с приемлемыми техническими характеристиками.

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

#### Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. /Л.М. Финк. М.: Советское радио, 1970.-728 с.
2. Basic Algorithm for the Noncoherent Digital Processing of the Narrowband Radio Signals/ A. N. Glushkov, V. P. Litvinenko, B. V. Matveev, O. V. Chernoyarov// *Applied Mathematical Sciences*. 2015. Vol. 9. №. 95. P. 4727 – 4735.

3. Патент РФ № 2556429 от 16.06.2015. Некогерентный цифровой демодулятор «в целом» кодированных сигналов с фазовой манипуляцией.

4. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. М.: Радио и связь, 1985. - 384 с.

5. VHDL. Справочное пособие по основам языка / В.П. Бабак, А.Г. Корченко, Н.П. Тимошенко, С.Ф. Филоненко. М.: Додэка - XXI, 2008. 224 с.

6. Xilinx (2009a) Spartan-6 Family Overview, Vol. DS160 (V1.0), Xilinx Inc.

7. Xilinx (2010a) 7 Series Overview, Vol. DS150 (V1.0), Xilinx Inc.

Воронежский государственный технический университет

Воронежский институт МВД РФ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

### DIGITAL DEMODULATOR "AS A WHOLE" OF PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS CODED WITH WALSH FUNCTION

V.P. Litvinenko<sup>1</sup>, A.A. Shaforostova<sup>2</sup>, A.N. Glushkov<sup>3</sup>, A.A. Makarov<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: annshaforostova@gmail.com

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: a.glushkov75@yandex.ru

<sup>4</sup>Graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation  
e-mail: o\_v\_ch@mail.ru

The possibility of the hardware implementation and the characteristics of the digital demodulator "as a whole" of phase-shift keyed signals encoded with Walsh sequences based on erasable programmable logic device (EPLD) are considered. Signal processing "as a whole" allows to significantly increase the noise immunity of the demodulator in comparison with the element-wise reception and subsequent decoding of code combinations. However, the known technical solutions require considerable computational costs, which complicates their implementation when processing high-frequency signals. Using incoherent signal processing with phase-shift keying makes it possible to avoid phase demodulator synchronization, which greatly simplifies the equipment.

A fast digital algorithm for non-coherent demodulation of the coded phase-shift signal "as a whole" is described, which requires a minimum number of simple arithmetic operations over the period of the carrier. The RF patent was obtained for the demodulator under study. For its implementation on EPLD in VHDL, a description of the demodulation algorithm has been developed, the synthesis of HDL-code has been carried out and its implementation for fixed signal parameters. The hardware costs of various series of modern EPLD by Xilinx are estimated for various parameters of the processed signal, the operating frequency range and the power consumed by the crystal at a high clock frequency are determined. An expression is given for calculating the probability of a demodulation error. Methods of statistical simulation in the Matlab / Simulink system verify the operability of the implementation of a demodulator based on EPLD, its noise immunity at various signal parameters is investigated. The results of the research indicate the possibility of the hardware implementation of the proposed demodulator

Key words: phase-shift keying, digital demodulation, Walsh function, EPLD, VHDL, Matlab

#### References

1. Fink L.M. "The theory of transmission of discrete messages", Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.
2. Glushkov A. N., Litvinenko V. P., Matveev B. V., Chernoyarov O. V. "Basic Algorithm for the Noncoherent Digital Processing of the Narrowband Radio Signals", *Applied Mathematical Sciences*, vol. 9, no. 95, 2015, pp. 4727 – 4735.
3. "Non-coherent digital demodulator "as a whole" of phase-shift keyed signals" ("Nekogerentnyy tsyvrovoy demodulyator "v tselom" kodirovannykh signalov s fazovoy manipulyatsiey"), patent RF no. 2556429, 2015.
4. Varakin L.E. "Communication systems with noise-like signals" ("Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami"), Moscow, Radio i svyaz', 1985, 384 p.
5. Babak V.P., Korchenko A.G., Timoshenko N.P., Filonenko S.F. "VHDL. Manual on the basics of the language" ("VHDL. Spravochnoe posobie po osnovam yazyka"), Moscow, Dodeka - XXI, 2008, 224 p.
6. Xilinx (2009a) Spartan-6 Family Overview, vol. DS160 (V1.0), Xilinx Inc.
7. Xilinx (2010a) 7 Series Overview, vol. DS150 (V1.0), Xilinx Inc.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ FD SOI СТРУКТУРЫ В САПР TCAD

Е.Ю. Плотникова, В.Е. Бельков, А.А. Винокуров, А.В. Арсентьев

Работы в области повышения радиационной стойкости транзисторов в 70-х гг. дали развитие структурам КНС и КНИ, обладающим рядом преимуществ и высокой стоимостью. Дальнейшее совершенствование направления привело к появлению технологии FD SOI – транзисторов с полностью обедненным каналом. Структуры такого типа нашли применение в микропроцессорных устройствах и до последнего времени успешно конкурировали с альтернативной технологией создания транзисторов типа FinFET. Проведен анализ технологии FD SOI и сравнение ее с обычной планарной технологией на объемном кристалле кремния. В работе рассматривается алгоритм моделирования транзистора типа FD SOI в САПР TCAD. Описывается настройка параметров моделирования в модулях Athena и Atlas. Приведены геометрические размеры структуры, обоснована настройка сетки моделирования, названы области структуры. Для численного расчета указаны используемые физические модели и математический метод расчета. В результате моделирования построены выходные характеристики структуры. Анализ ВАХ показал типичные кривые для МОП транзисторов, что указывает на правильность подбора геометрических и электрофизических параметров используемой модели FD SOI транзистора. Разработанный технологический маршрут создания FD SOI транзистора в редакторе Athena может быть использован для изготовления как дискретных транзисторов, так и элементов интегральных схем

Ключевые слова: FD SOI, полностью обедненная структура кремний на изоляторе, САПР Silvaco TCAD, технологический процесс, моделирование ВАХ

### Введение

Изначально технология «кремний на изоляторе» (silicon on insulator, SOI) была разработана для увеличения радиационной стойкости изделий электронной техники, поскольку при уменьшении размера транзистор становится более чувствительным к высокоэнергетическим частицам, способным вызвать сбой в работе приборов. Чтобы повысить радиационную стойкость структур, в 70-х гг. [1] в качестве подложки предложили использовать не кремниевую, а сапфировую пластину ( $Al_2O_3$ ), на которую осаждалась тонкая пленка кремния — КНС (кремний на сапфире).

В транзисторе, изготовленном на классическом объемном кремниевом кристалле, при приложении к затвору поля в канале формируется так называемый инверсный слой, а также возникает утечка тока из канала (рис. 1), поскольку подложка (даже если она заземлена) «вытягивает» часть носителей заряда в обедненный слой (область пространственного заряда, ОПЗ).

В КНС транзисторах были значительно уменьшены токи утечки, поскольку область изолятора отсекает подложку (рис. 2). Вследствие снижения тока утечки понизилась потребляемая мощность, а также уменьшилась паразитная

емкость, что в свою очередь повысило рабочий диапазон частот [2]. Но у КНС технологии был существенный недостаток: создание сверхчистых сапфировых подложек обходилось гораздо дороже создания классических кремниевых пластин.

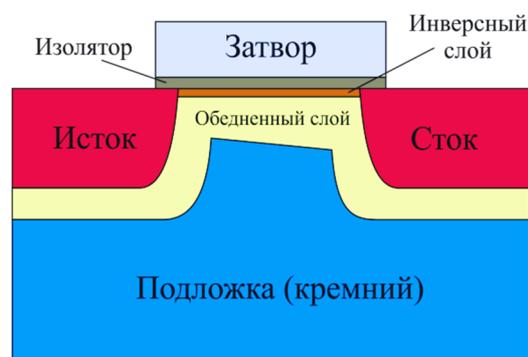


Рис. 1. Полевой транзистор на объемном кристалле кремния

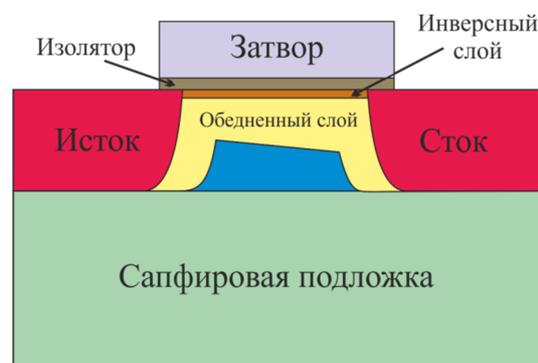


Рис. 2. Полевой транзистор, выполненный по технологии КНС

Плотникова Екатерина Юрьевна – ВГТУ, канд. техн. наук, старший преподаватель, e-mail: [katy-tokra@yandex.ru](mailto:katy-tokra@yandex.ru)

Бельков Вячеслав Евгеньевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: [e314log@gmail.com](mailto:e314log@gmail.com)

Винокуров Александр Александрович – ВГТУ, ассистент, e-mail: [sasha.vinokurov@mail.ru](mailto:sasha.vinokurov@mail.ru)

Арсентьев Алексей Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [aleksej.box@gmail.com](mailto:aleksej.box@gmail.com)

## Структура КНИ

В начале 90-х гг. [1] корпорация IBM предложила технологию кремния на изоляторе, которая во многом повторяла КНС, но в качестве подложки использовала кремний (КНИ структура, рис. 3). По этой технологии на кремниевой пластине был сформирован слой изолятора из оксида кремния, поверх которого наносилась тонкая рабочая пленка кремния. Структура КНИ имела те же преимущества, что и КНС, но была дешевле и лучше приспособлена к технологическому процессу производства на кремнии, принятому на большинстве предприятий электроники.

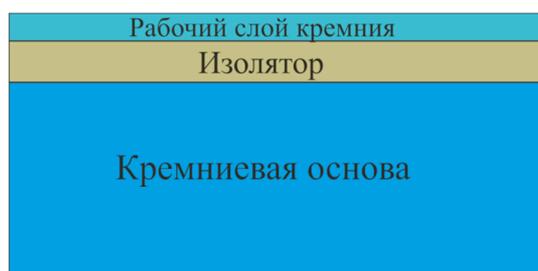


Рис. 3. Полевой транзистор, выполненный по технологии КНИ

## Структура FD SOI

Логическим продолжением технологии КНИ стала структура полностью обедненного КНИ (Fully Depleted SOI, FD SOI) (рис. 4). В ней обедненная область занимает всю толщину кремниевое тела и имеет фиксированный заряд [2].

Особенностью подобных транзисторов является то, что в полностью обедненных приборах практически не происходит накопление основных носителей в базе, и эффекты плавающей базы по сравнению с частично обедненными транзисторами практически отсутствуют.

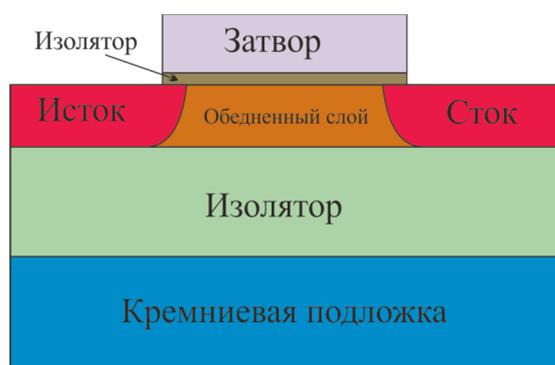


Рис. 4. Схема полевого транзистора, выполненная по технологии FD SOI

Контакт подложки в полностью обедненном КНИ транзисторе можно использовать как своеобразный нижний затвор (back gate), с

помощью которого изменяют пороговое напряжение в канале при смещении затвора. В полностью обедненном КНИ транзисторе приложенное к затвору поле может достигать нижнего затвора. Таким образом, поверхностные потенциалы на двух границах раздела оказываются электрически связанными друг с другом. Прикладывая напряжение на затвор либо на нижний затвор, можно получить инверсный слой в КНИ транзисторе как на границе раздела кремния с тонким подзатворным окислом, так и на границе раздела с толстым скрытым окислом [2].

Уменьшение толщины рабочего слоя кремния в структуре КНИ приводит к уменьшению подпороговых токов утечки вследствие снижения емкости обедненного слоя, но при этом подвижность носителей в канале с уменьшением толщины кремневой пленки заметно падает. Это объясняется тем, что в очень тонких базах толщина кремниевой пленки становится сопоставимой с толщиной инверсного слоя (порядка нескольких нм), то есть в базе происходит объемная инверсия. В результате на носители заряда в канале начинает влиять дополнительный механизм рассеяния на шероховатостях границы раздела со скрытым окислом. Другим источником снижения подвижности является технологическое загрязнение кремниевой пленки неконтролируемыми примесями при изготовлении.

На рис. 5 представлена зависимость тока стока  $I_D$  (мА) от напряжения сток-исток  $U_{DS}$  (В) при фиксированном напряжении на затворе для типового транзистора, выполненного по технологии FD SOI транзисторов [3].

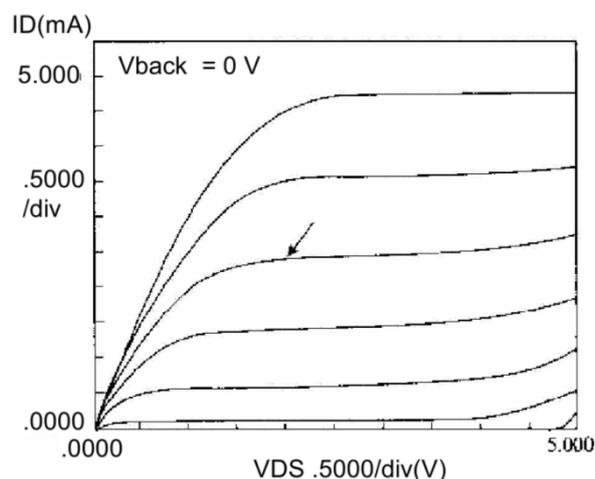


Рис. 5. ВАХ полевого транзистора, выполненного по технологии FD SOI [4]

В настоящее время существуют две основные архитектуры полностью обедненных транзисторов: планарные (FD SOI) и трехмерные (FinFET) [4]. Планарные транзисторы с полностью обедненным каналом выполняются на сверхтонком слое кремния на КНИ подложке (FD SOI), FinFET с чрезвычайно узкими ребрами, встроенными в

кремний – на кремниевой или также на КНИ подложке.

К достоинствам FD SOI технологии относят возможность использования существующих конструкций КМОП-микросхем и легкость адаптации сложно-функциональных блоков различных конструкций и технологических поколений FD SOI микросхем. К тому же FD SOI технология достаточно перспективна как для компаний, занимающихся разработкой микросхем и не располагающих собственным производством, так и для контрактных производителей микросхем.

Также при уменьшении норм топологии соотношение производительности к цене у FD SOI технологии гораздо выше, чем у FinFET технологии [5].

Компания AMD, в прошлом активно использовала SOI технологию для построения своих процессоров в частности, именно эта технология лежала в основе 130-нм, 90-нм, 65-нм, 45-нм и 32-нм процессоров, и лишь в последнем поколении был использован 14-нм FinFET техпроцесс. Однако FinFET характеризуется достаточно сложным технологическим процессом создания и сравнительно высокой стоимостью производства [6,7].

### Моделирование FD SOI

При моделировании МОП-транзисторов обычно анализируются пороговое напряжение, ВАХ, и частотные характеристики в зависимости от параметров структуры. В работах [8] и [9] проводилось моделирование FD SOI транзистора с длиной канала 1 мкм и 0,35 мкм в Silvaco TCAD и сравнение с PD SOI. Авторами данных работ были построены и рассчитаны структуры с использованием моделей *commob*, *srh*, *bgn*, *fldmob*, *hcte*, *impact self*.

В данной статье моделирование осуществляется с учетом важных для субмикронных FD SOI эффектов:

- влияния рассеяния на решетке, на примесях, на экситонах и примесных кластерах при высоких концентрациях примеси;

- утечек на границе кремний-диэлектрик, которые влияют на поперечное электрическое поле по структуре.

Рассматриваемые эффекты учитываются подключением моделей Клаассена (KLA) и Ширахаты (SHI).

### Алгоритм моделирования в САПР TCAD

На данный момент существует два основных (наиболее распространенных) программных комплекса для технологического моделирования полупроводниковых приборов. Это TCAD от Silvaco и Synopsys. Оба САПР предоставляют примерно одинаковые возможности, но сильно отличаются по интерфейсу и подходу к созданию проектов. В Silvaco реализован более

«дружественный» для пользователей Windows подход к работе с редакторами, поэтому выбор был сделан в пользу TCAD от Silvaco.

Программный модуль Athena предназначен для имитационного моделирования как отдельных технологических операций, так и всего технологического маршрута изготовления приборов микроэлектроники. Благодаря этому можно рассчитывать полупроводниковые структуры, различной сложности, в том числе и моделировать структуры транзисторов типа FD SOI. Далее приведена последовательность этапов создания FD SOI транзистора в модуле Athena.

#### 1. Создание подложки.

В начале моделирования создается прямоугольная область 1,6×1,6 мкм, которой присваивается сложный шаг сетки. В области, в которой будет располагаться сам FD SOI, шаг сетки минимален, в остальных – крупнее. Эта область будет служить подложкой, в качестве материала используется кремний.

```
line x loc=0.00 spac=0.01
line x loc=0.20 spac=0.01
line x loc=0.40 spac=0.01
line x loc=1.00 spac=0.01
line x loc=1.20 spac=0.01
line x loc=1.40 spac=0.01
line x loc=1.60 spac=0.1
```

```
line y loc=0.00 spac=0.01
line y loc=0.08 spac=0.01
line y loc=0.48 spac=0.01
line y loc=1.00 spac=0.01
line y loc=1.25 spac=0.1
line y loc=1.60 spac=0.1
```

#### 2. Создание области кармана

Затем в кремниевой подложке создается слой диэлектрического материала (оксида кремния) толщиной 400 нм (рис. 6).

```
init silicon c.boron=1.0e14 orientation=111 two.d
...
rate.etch machine=kanavki silicon u.h rie
isotropic=0 dir=100
etch machine=kanavki time=45.0 seconds
...
rate.etch machine=karman silicon u.h rie
isotropic=0 dir=100
etch machine=karman time=20.0 seconds
...
deposit oxide thick=0.4 div=50
```

#### 3. Формирование рабочего слоя кремния

В кармане из диэлектрика создается тонкий рабочий слой кремния, легированного бором ( $d = 80$  нм), в котором в дальнейшем будут сформированы области сильнолегированных истока и стока и обедненный носителями заряда канал. Ширина канала составила 180 нм.

```
rate.etch machine=karmanOX oxide u.h rie
isotropic=0 dir=100
etch machine=karmanOX time=2.8 seconds
```

```
...
deposit silicon thick=0.15 c.boron=1e14 DIV=10
etch silicon above p1.y=0
```

#### 4. Формирование областей стока и истока

С помощью ионной имплантации фосфора в рабочем слое кремния создаются сильнолегированные области стока и истока. Степень легирования:  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

```
implant phosphor dose=1.0e17 energy=25
pearson tilt=7 rotation=360 amorph
```

#### 5. Нанесение подзатворного диэлектрика

Далее наносится пленка подзатворного диэлектрика  $\text{SiO}_2$  толщиной 17 нм.

```
deposit oxide thick=0.017 div=10
```

#### 6. Формирование контактов

Следующим этапом наносится слой металла, из которого с помощью травления формируются контакты к областям стока, истока и затвора (рис. 6) [10,11].

```
deposit aluminum thick=0.05 DIV=10
```

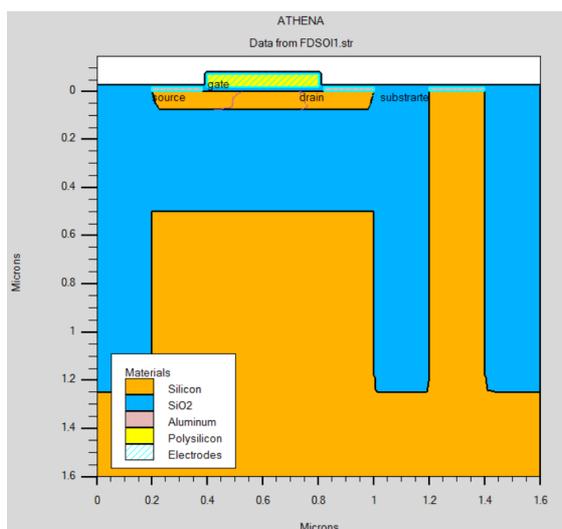


Рис. 6. Структура FD SOI транзистора, построенная в модуле Athena

И формируется область затвора из легированного поликремния. Степень легирования:  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

```
deposit polysilicon thick=0.053 c.boron=1e14
div=10
```

```
deposit photoresist thick=0.01
```

```
etch photoresist left p1.x=0.4
```

```
etch photoresist right p1.x=0.8
```

```
rate.etch machine=PolyGate Polysilicon u.h rie
isotropic=0 dir=100
```

```
etch machine=PolyGate time=5.0 seconds
```

```
etch photoresist all
```

7. На последнем этапе вся структура покрывается тонким слоем защитного окисла.

```
depo oxide thick=0.01
```

И задаются электроды стока, истока, затвора и подложки.

```
electrode name=source x=0.3 y=-0.01
```

```
electrode name=drain x=0.9 y=-0.01
```

```
electrode name=gate x=.6 y=-0.04
```

```
electrode name=substrate x=1.3 y=-0.01
```

Модуль Atlas позволяет рассчитывать электрофизические характеристики микроструктур. Параметры структуры задаются вручную или же экстракцией кода из модуля Athena. В редакторе рассчитываются как дискретные характеристики, так и их семейства.

Если код структуры пишется в модуле Atlas «с нуля», то необходимо сначала задавать размеры сетки для различных областей. В области подложки шаг сетки наиболее крупный, в областях стока, истока и канала он чуть мельче, а шаг в области канала самый мелкий.

Затем задаются и нумеруются области транзистора, им присваиваются соответствующие материалы и определяется их форма. Областям, которые затем будут определены как электроды, присваивается параметр «conductor» - проводящий материал. Важной особенностью построения структуры в модуле Atlas является то, что в структуре не должно быть областей, не заполненных каким-либо материалом. Подобным областям в качестве материала могут быть присвоены - воздух, оксидная пленка, вакуум, газовая среда и т.д.

После того, как области структуры были указаны, на них определяются электроды затвора, истока, стока и подложки, степень и тип легирования, а также параметры контактов.

Для расчета параметров FD SOI транзистора использована модель, пригодная для расчета МОП структур, включающая в себя модели CONMOB, SRH, AUGER, BGN и FLDMOB. В качестве метода расчета параметров был выбран стандартный для расчета полевых транзисторов метод Ньютона.

## Результаты моделирования

На рис. 7 представлено семейство выходных характеристик, моделируемого FD SOI при изменении напряжения на затворе 2, 3 и 4 В.

Если исследовать распределение плотности тока дырок в канале, становится видно, что канал практически полностью заполняется электронами, то есть становится полностью обедненным (рис. 8).

Видно, что у разработанного транзистора ВАХи имеют форму, типичную для МОП-транзисторов. Технологический маршрут создания FD SOI транзистора, созданный в редакторе Athena, может быть использован для изготовления как дискретных транзисторов, так и элементов

интегральных схем. С помощью редактора Atlas было проведено моделирование семейств выходных характеристик разработанной модели FD SOI транзистора.

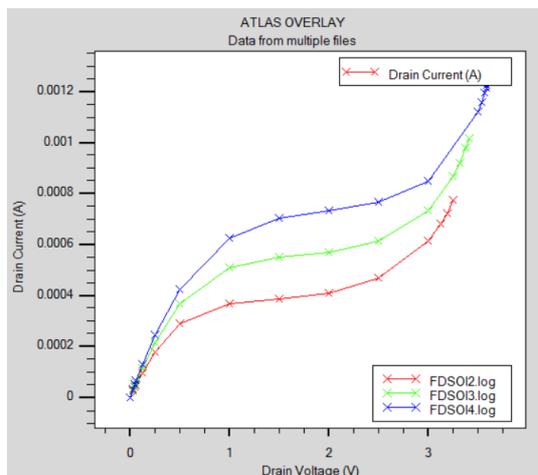


Рис. 7. Выходные характеристики моделируемой FD SOI структуры, рассчитанные в модуле Atlas Silvaco TCAD

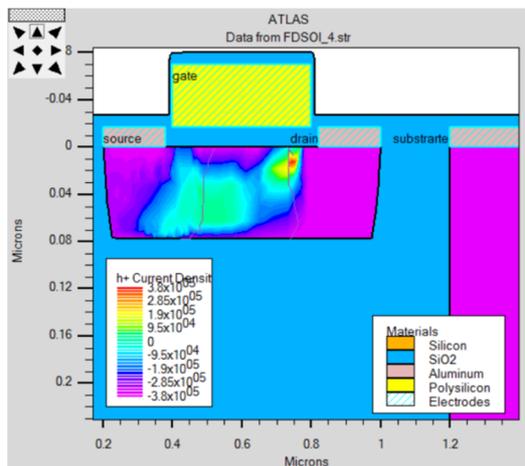


Рис. 8. Плотность тока дырок при смещении затвора 4 В и напряжении сток-исток 10 В

Подпороговый наклон определялся программным методом с помощью расчета зависимости тока стока от напряжения затвор-исток и команды (рис. 9)

```
EXTRACT> extract name="subvt" 1.0/slope(maxslope
(curve(v."gate", log10(abs(i."drain")))))
```

и составил subvt=0.104596 V/decade.

Расчет порогового напряжения проводился так же по кривой из рис. 9 с помощью команды

```
EXTRACT> extract name="vt"
(xintercept(maxslope(curve(v."gate",abs(i."drain")))) -
abs(ave(v."drain"))/2.0).
```

Он составил vt=-0.406603 V.

## Выводы

Полученные выходные характеристики моделируемой структуры сопоставимы с характеристиками реального прибора на основе FD SOI технологии, это указывает на правильность подбора геометрических и электрофизических параметров используемой модели FD SOI транзистора.

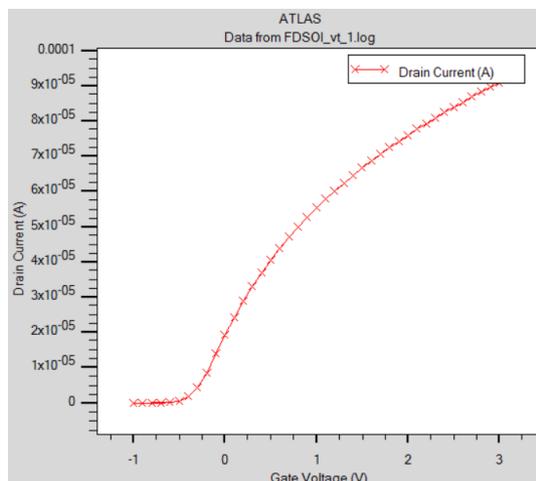


Рис. 9. Определение порогового напряжения и подпорогового наклона зависимости тока стока от напряжения затвор-исток

## Литература

1. Закон Мура против нанометров Часть 2-я: Наши дни [Электронный ресурс] // 01.11.2011. – URL: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics-2.shtml> (дата обращения: 23.04.2017)
2. Транзисторы технологии кремний-на-изоляторе [Электронный ресурс] // 30.05.2016. – URL: <http://poznayka.org/s4183t1.html> (дата обращения: 23.04.2017).
3. Sakurai T. Fully-Depleted SOI CMOS Circuits and Technology for Ultralow-Power Applications / T. Sakurai, A. Matsuzawa, T. Douseki // Published by Springer P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands. – 2006. – 411 p.
4. Петросянец К.О. Компактные модели МОП-транзисторов со структурой КНИ для схемотехнических расчетов / К.О. Петросянец, И.А. Харитонов, Л.М. Самбурский. – М.: МИЭМ, – 2014.
5. Макушин М. Домасштабировались? Экономика уменьшения топологий / М. Макушин // ЭЛЕКТРОНИКА НТБ. – 2014. – №3. – С. 134
6. AMD будет использовать 12-нм технологию FD-SOI в будущих поколениях продуктов / [Электронный ресурс] // 30.05.2016. – URL: [http://ru.gecid.com/news/amd\\_budet\\_ispolzovat\\_12-nm\\_tehnologiyu\\_fd-soi](http://ru.gecid.com/news/amd_budet_ispolzovat_12-nm_tehnologiyu_fd-soi) (дата обращения: 23.04.2017)
7. FD-SOI Technology Innovations Extend Moore's Law / GLOBALFOUNDRIES September 2015
8. Gupta J Comparative Study of Conventional and SOI Inverters using Silvaco TCAD Tool / J. Gupta, S. Choudary, B. Prasad // Advanced Research in Electrical and Electronic Enngineering. – 2014. – Vol. 1. – №3. – pp. 61-65.
9. Rahou FZ. Electrical Characteristics Comparison Between Fully-Depleted SOI MOSFET and Partially-Depleted SOI MOSFET using Silvaco Software / FZ. Rahou,

A. Guen-Bouazza, M. Rahou // *Global Journal of Researches in Engineering*. – 2014. – Vol. XIII. Issue I.

10. Арсентьев А.В. Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем: лабораторный практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные / А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2016.

11. Арсентьев А.В. Методы математического моделирования: лабораторный практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные / А.В. Арсентьев, Е.Ю. Плотникова. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2016.

Воронежский государственный технический университет

## TECHNOLOGICAL AND ELECTROPHYSICAL MODELING OF THE FD SOI STRUCTURE VIA TCAD

**E.Y. Plotnikova<sup>1</sup>, V.E. Bel'kov<sup>2</sup>, A.A. Vinokurov<sup>3</sup>, A.V. Arsent'ev<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [katy-tokra@yandex.ru](mailto:katy-tokra@yandex.ru)

<sup>2</sup>MA, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [e314log@gmail.com](mailto:e314log@gmail.com)

<sup>3</sup>Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [sasha.vinokurov@mail.ru](mailto:sasha.vinokurov@mail.ru)

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [aleksej.box@gmail.com](mailto:aleksej.box@gmail.com)

Work in the field of increasing the radiation resistance of transistors in the 70's gave development to the structures of the CNN and SOI, which have a number of advantages and high cost. Further improvement of the area led to the development of technology FD SOI - transistors with a completely depleted channel. Structures of this type have found application in microprocessor devices and until recently competed successfully with the alternative technology of creating transistors such as FinFET.

The technology of FD SOI is analyzed and compared to conventional planar technology on a bulk silicon crystal. In this paper, an algorithm for modeling a FD SOI transistor via TCAD is considered. It is described how to configure simulation parameters in Athena and Atlas modules. The geometric dimensions of the structure are given, the simulation grid is justified, and the areas of the structure are named. For numerical calculation, the physical models used and the mathematical method of calculation are indicated. As a result of the simulation, the output characteristics of the structure are constructed. The I-V characteristics analysis showed typical curves for MOS transistors, which indicates the correctness of the selection of the geometric and electrophysical parameters of the FD SOI transistor model used. The developed technological route for creating the FD SOI transistor in the Athena editor can be used to fabricate both discrete transistors and integrated circuit elements

Key words: FD SOI, completely depleted structure silicon on the insulator, Silvaco TCAD, technological process, simulation of I-V characteristic

### References

1. "Moore's law against nanometers. Part 2: Our days" ("Zakon Mura protiv nanometrov. Chast' vtoraya: Nashi dni"), available at: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics-2.shtml> (accessed 23.04.2017)
2. "Transistors of silicon-on-insulator technology" ("Transistoriy tehnologii kremnij-na-isolatore"), available at: <http://poznayka.org/s4183t1.html> (accessed 23.04.2017)
3. Sakurai T. Matsuzawa A., Douseki T. "Fully-Depleted SOI CMOS Circuits and Technology for Ultralow-Power Applications", Springer P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands, 2006, 411 p.
4. Petrosyants K.O., Haritonov I.A., Samburskiy L.M. "Compact models of MOS-transistors with the structure of SOI for circuit calculations" ("Kompaktnye modeli MOP-transistorov so strukturoi KNI dlya skhemotekhnicheskikh raschetov"), Moscow, MIEM, 2014.
5. Makushin M. "Got scaled? Economy of topologies reduction" ("Domasshtabirovalis'? Ekonomika umen'sheniya topologii"), *Elektronika NTB*, 2014, no. 3, pp. 134.
6. "AMD will use 12-nm technology FD-SOI in the future generations of products" ("AMD budet ispolsovat' 12-nm tehnologiyu FD-SOI v budushchikh pokoleniyakh produktov"), available at: [http://ru.gecid.com/news/amd\\_budet\\_ispolzovat\\_12\\_nm\\_tehnologiyu\\_fd-soi](http://ru.gecid.com/news/amd_budet_ispolzovat_12_nm_tehnologiyu_fd-soi) (accessed 23.04.2017)
7. FD-SOI Technology Innovations Extend Moore's Law, GLOBALFOUNDRIES September 2015
8. Gupta J., Choundary S., Prasad B. "Comparative Study of Conventional and SOI Inverters using Silvaco TCAD Tool", *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*, 2014, vol. 1, no.3, pp. 61-65.
9. Rahou F.Z., Guen-Bouazza A., Rahou M. "Electrical Characteristics Comparison Between Fully-Depleted SOI MOSFET and Partially-Depleted SOI MOSFET using Silvaco Software", *Global Journal of Researches in Engineering*, 2014, vol. XIII, no. I.
10. Arsentev A.V., Plotnikova E.Y. "Mathematical modeling of technological processes and integrated circuits: laboratory practice: tutorial" ("Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh processov i integralnykh skhem: laboratorniy praktikum: ychebnoe posobie"), e-source, Voronezh, VSTU, 2016.
11. Arsentev A.V., Plotnikova E.Y. "Methods of mathematical modeling: laboratory practice: tutorial" ("Metody matematicheskogo modelirovaniya: laboratorniy praktikum: ychebnoe posobie"), E-source, Voronezh, VSTU, 2016.

## ВЕРИФИКАЦИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ ТРЕТЬЕГО УРОВНЯ, СОЗДАННОЙ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CREO

**В.И. Борисов, П.В. Иевлев, А.В. Муратов, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий**

Конечно-элементный метод, реализованный в программном пакете CREO, является оптимальным инструментом для проектирования радиоэлектронных средств. Для проведения численного модального анализа разработана математическая модель радиоэлектронного модуля третьего уровня на основе 3D компьютерной модели, созданной с помощью CAD-модуля CREO. Численный модальный анализ осуществлен методом конечных элементов в программном комплексе CREO.

С целью верификации конечно-элементной модели проведены испытания созданного изделия методом качающейся частоты. Схема динамического испытания разработана в соответствии с полученными данными при модальном анализе. В качестве направления вынужденных колебаний выбрана вертикальная ось объекта испытания. Резонансные явления наблюдались в диапазоне 100–500 Гц, что соответствует полученной при модальном анализе конечно-элементной модели.

По результатам проведенных испытаний произведена верификация конечно-элементной модели. На основании сравнительного анализа расчетных резонансных частот, полученных в программном комплексе CREO, и резонансных частот, полученных по результатам натурных испытаний на вибростенде, сделан вывод о том, что созданная математическая модель конструкции радиоэлектронного модуля третьего уровня адекватно отражает жесткостные, массовые и геометрические параметры конструкции. Установлено хорошее соответствие результатов с экспериментальными данными, несоответствие не превышает 5%

Ключевые слова: радиоэлектронные модули, проектирование, конечно-элементная модель, статический анализ, модальный анализ

Основная цель дизайнера радиоэлектронных средств состоит в создании модулей всех иерархических уровней и устройств в целом с характеристиками, соответствующими их назначению и условиям эксплуатации. Для снижения стоимости разработки, ускорения процессов конструирования, изготовления и обеспечения всего жизненного цикла радиоэлектронного изделия используют высокоточные и информационные технологии, которые позволяют выбрать лучшее дизайнерское решение, а также провести анализ рисков на всех этапах эксплуатации (рис. 1).

В настоящее время благодаря использованию информационных технологий отмечается общая тенденция к уменьшению количества реальных испытаний радиоэлектронного оборудования и переходу в зону испытаний макетов или прототипов. Зачастую для крупногабаритных изделий (сборки радиоэлектронных шкафов, которые могут достигать до 10 м в длину и иметь массу до 10 т) такие испытания затруднительны или невозможны, кроме того не всегда возможно создание штатных условий испытаний.

Метод конечных элементов и основанное на нем специальное программное обеспечение

Computer-Aided Engineering (CAE) позволяют провести различные виды инженерного анализа радиоэлектронных изделий со сложной геометрией: механический, термодинамический, электромагнитный, анализ прочности и надежности и др.)

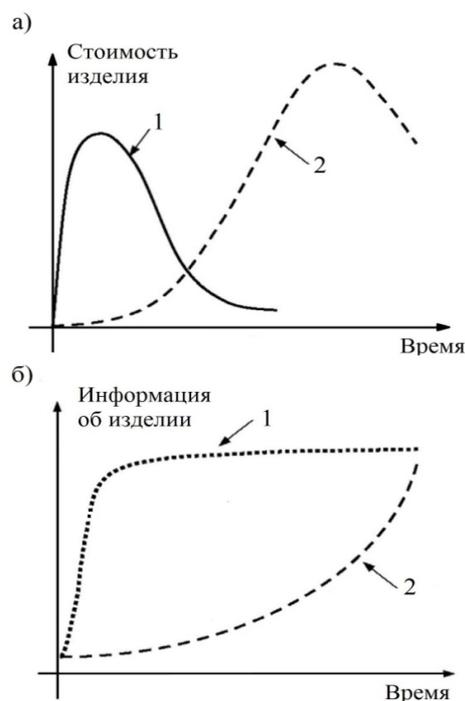


Рис. 1. Зависимости стоимости изделия (а) и информации о нём (б) от времени: 1 - проектирование с использованием компьютерных технологий; 2 - традиционное проектирование [1]

Борисов Василий Иванович – АО «Концерн «Созвездие»,

д-р техн. наук, профессор, e-mail: [bvi@sozvezdie.su](mailto:bvi@sozvezdie.su)

Иевлев Павел Валерьевич – ВГТУ, аспирант, e-mail:

[jevlev92@mail.ru](mailto:jevlev92@mail.ru)

Муратов Александр Васильевич – ВГТУ, д-р техн. наук,

профессор, e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru)

Тураева Татьяна Леонидовна – ВГТУ, канд. физ.-мат.

наук, доцент, e-mail: [fturaeva@mail.ru](mailto:fturaeva@mail.ru)

Турецкий Андрей Владимирович – ВГТУ, канд. техн.

наук, доцент, e-mail: [tav7@mail.ru](mailto:tav7@mail.ru)

В работе [2] проведен анализ возможностей САПР различных производителей при моделировании радиоэлектронных модулей третьего уровня и показано, что решение этой задачи возможно с использованием некоторых средств среднего уровня и любых тяжелых САПР верхнего уровня. Выделены три наиболее перспективных в области радиоэлектроники программных продукта, которые помимо широких универсальных возможностей имеют специализированные модули, ориентированные на применение в радиоэлектронной и приборостроительной отраслях: ANSYS, MSC.NASTRAN и CREO. При этом отмечено, что сочетание параметрического и прямого моделирование, удобство работы с небольшими приложениями и возможность использования в больших проектах, а также лучшее соотношение цена-функциональность на рынке CAE-систем делает использование программного пакета CREO приоритетным.

Для достоверного определения динамических параметров изделия конечно-элементная модель должна с высокой степенью точности соответствовать объекту исследования. Выполнение такого требования при проектировании радиоэлектронных устройств затруднено, поскольку любой модуль представляет собой сборочную конструкцию, а точное моделирование мест соединений и стыков при динамическом поведении конструкции не всегда возможно из-за большого количества неизвестных параметров. Таким образом, решение проблемы точности и достоверности получаемых результатов выдвигает на первый план задачу верификации параметров конечно-элементной модели, созданной средствами CAE.

Основные погрешности при моделировании обусловлены рядом факторов: пренебрежением нелинейностью свойств материалов и воздействий, степенью детализации геометрической модели, выбором типа и размерности конечных элементов. Все это существенно влияет на размерность матриц системы уравнений и приводит к многократному округлению вычисляемых промежуточных и конечных величин.

Базовыми динамическими характеристиками любой механической системы являются собственные частоты и моды колебаний. Разницу значений собственных частот, полученных в натурном и численном экспериментах, можно использовать в качестве критерия соответствия конечно-элементной модели и объекта.

Цель данного исследования – проведение процедуры верификации конечно-элементной модели радиоэлектронного модуля третьего уровня, созданного средствами CREO. Для этого был разработан малогабаритный легкий радиоэлектронный модуль третьего уровня (шкаф), в котором могут быть размещены разъемные и неразъемные вставные модули более низкого иерархического уровня.

При конструировании шкафа использованы три вида материалов: каркас и направляющие изготовлены из алюминиевого сплава Д16 (ГОСТ 4784-97), верхняя и нижняя панели - из алюминиевого

сплава АМг2, линейные опоры – из углеродистой качественной конструкционной стали марки 10 (ГОСТ 1050-88). Физические свойства материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Физические свойства материалов, использованных при конструировании радиоэлектронного модуля

Физические характеристики	Алюминиевый сплав Д16	Алюминиевый сплав АМг2	Сталь конструкционная марки 10
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2,77·10 <sup>3</sup>	2,69·10 <sup>3</sup>	7,82·10 <sup>3</sup>
Предел текучести, МПа	294	205,8	205
Предел прочности, МПа	370	250	340
Модуль Юнга, ГПа	72	71	200
Коэффициент Пуассона	0,32	0,32	0,3
Коэффициент линейного расширения, 1/град	2,29·10 <sup>-5</sup>	2,42·10 <sup>-5</sup>	1,16·10 <sup>-5</sup>

Линейные размеры шкафа: высота – 211,6 мм, ширина – 365 мм, глубина – 271 мм, толщина верхней и нижней панелей – 2 мм; общая масса модуля – 4,6 кг.

Для обеспечения дополнительной жесткости конструкции в качестве вертикальных рам использованы не открывающиеся боковые панели с вентиляционными отверстиями для обеспечения потоков воздушного охлаждения. Нижняя/верхняя и задняя плоские панели являются быстросъемными, для их крепления используется болтовое соединение. Внутри шкафа расположены вертикальные и горизонтальные направляющие для размещения submodule второго уровня как в горизонтальном, так и в вертикальном положениях (рис. 2а).

#### Конечно-элементная модель радиоэлектронного шкафа и модальный анализ

Трехмерная конечно-элементная модель сборочной конструкции созданная в САД-комплексе CREO, представлена на рис. 2б. Некоторые конструктивные особенности (выступы, мелкие отверстия, скругления небольших радиусов) в упрощенной модели отсутствуют. Все элементы конструкции соединены между собой абсолютно жестко, сварные соединения отсутствуют. Предполагалось, что задача является линейной. Анализ проводили для шкафа с верхней панелью и без нее.

Конечно-элементные модели создавали с учетом рекомендаций, описанных в работе [3]. Для уменьшения погрешностей и улучшения сходимости решения для построения конечно-элементной сетки выбраны тетраэдрические элементы, средний размер которых составляет 1/30 длины самой короткой направляющей, т.е. 7 мм. Максимальный размер элементов составлял 13 мм, минимальный – 1 мм.

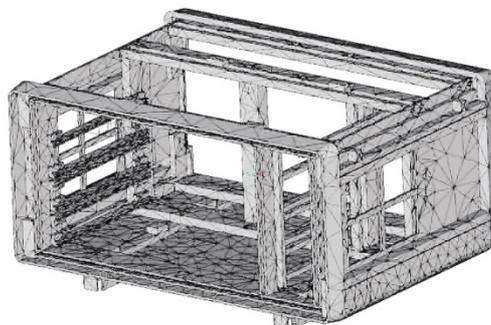
Представленная на рис. 2б модель конструкции без верхней пластины содержит 51581 конечных элементов, 119132 граней и 84170 кромок. Такая модель учитывает основные характерные черты реальной конструкции и, вместе с тем, не требует значительных вычислительных ресурсов.

Для модального анализа выбраны начальные условия: опоры шкафа жестко закреплены. Модаль-

ный анализ проводился в течение 3910 с для конструкции с верхней пластиной и 2756 без нее, при этом выделены первые восемь мод, попадающие в частотный диапазон  $0 \div 500$  Гц. Полученные значения собственных частот для шкафа с верхней пластиной и без нее приведены в табл. 2.



а



б

Рис. 2. Радиоэлектронный модуль третьего уровня: а) закреплен на вибростенде; б) конечно-элементная модель, созданная в программном комплексе CREO

Таблица 2

Результаты модального анализа радиоэлектронного модуля

Особенности конструкции	Собственные частоты, Гц									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Отсутствие верхней панели	151,806	221,321	231,765	260,446	273,956	-	309,97	335,99	348,912	не измеряли
Наличие верхней панели	140,119	-	231,338	-	276,106	298,221	309,663	338,529	396,516	458,51

Сравнение полученных результатов показывает, что наличие закрепленной верхней пластины приводит к тому, что ряд частот перестают быть резонансными. Так, характерные формы колебаний с частотами 221,321 Гц и 260,446 Гц для конструкции без верхней пластины, не зарегистрированы для той же конструкции, но с пластиной. Однако при этом добавилась частота 298,221 Гц, форма колебаний на которой свидетельствует о том, что эта частота может быть обусловлена вибрационными свойствами самой пластины. Поэтому были определены собственные частоты отдельно взятой верхней панели в диапазоне  $10 \div 500$  Гц: 188,639 Гц; 290,383 Гц; 362,54 Гц; 388,442 Гц; 397,153 Гц. Действительно, эта частота с погрешностью 2,6 % характерна для самой пластины, поэтому ее отсутствие при исследовании конструкции без верхней пластины является закономерным.

Полученные в модельном эксперименте формы колебаний для конструкции без верхней пластины показаны на рис. 3. Мода колебаний, соответствующая собственной частоте 298,221 Гц конструкции (№6 в табл. 2) и собственной частоте верхней пластины 290,383 Гц, в случае испытаний без нее не была реализована, поэтому на рисунке отсутствует.

Результаты, полученные для конструкции с верхней пластиной аналогичны.

По результатам численного эксперимента определены наиболее оптимальные места установки датчиков ускорения и их направления: средняя часть верхней передней горизонтальной планки каркаса (датчик N1), средняя часть верхней (датчик N2) и нижней (датчик N3) панелей для выявления колебаний в вертикальной плоскости.

#### Результаты натурного эксперимента

Методика испытаний по определению собственных частот колебаний является достаточно хорошо изученной. Методы определения собственных частот из экспериментальных данных подробно описаны в работах [4,5].

Наиболее простой метод измерения вибрации реализуется с помощью пьезоэлектрического датчика, который позволяет проводить измерения с высокой точностью в диапазоне низких частот и относительно больших амплитуд вибрации. В нем механические колебания контролируемого объекта преобразуются в электрический сигнал, пропорциональный ускорению. Вместе с тем высокая инерционность, приводящая к искажению формы сигнала,

делает невозможным применение таких датчиков для измерения вибрации высокой частоты и малой амплитуды. Кроме того, для исследуемых объектов, обладающих малой массой, а значит и небольшой инерционностью, такой датчик может оказать влияние на характер вибрации, что вносит дополнительную погрешность в измерения. Объект данного ис-

следования позволяет провести экспериментальный модальный анализ с использованием пьезодатчика.

В состав экспериментального комплекса входят: испытательная вибрационная электродинамическая установка ВС103К, усилители сигналов, датчик и персональный компьютер (рис. 4).

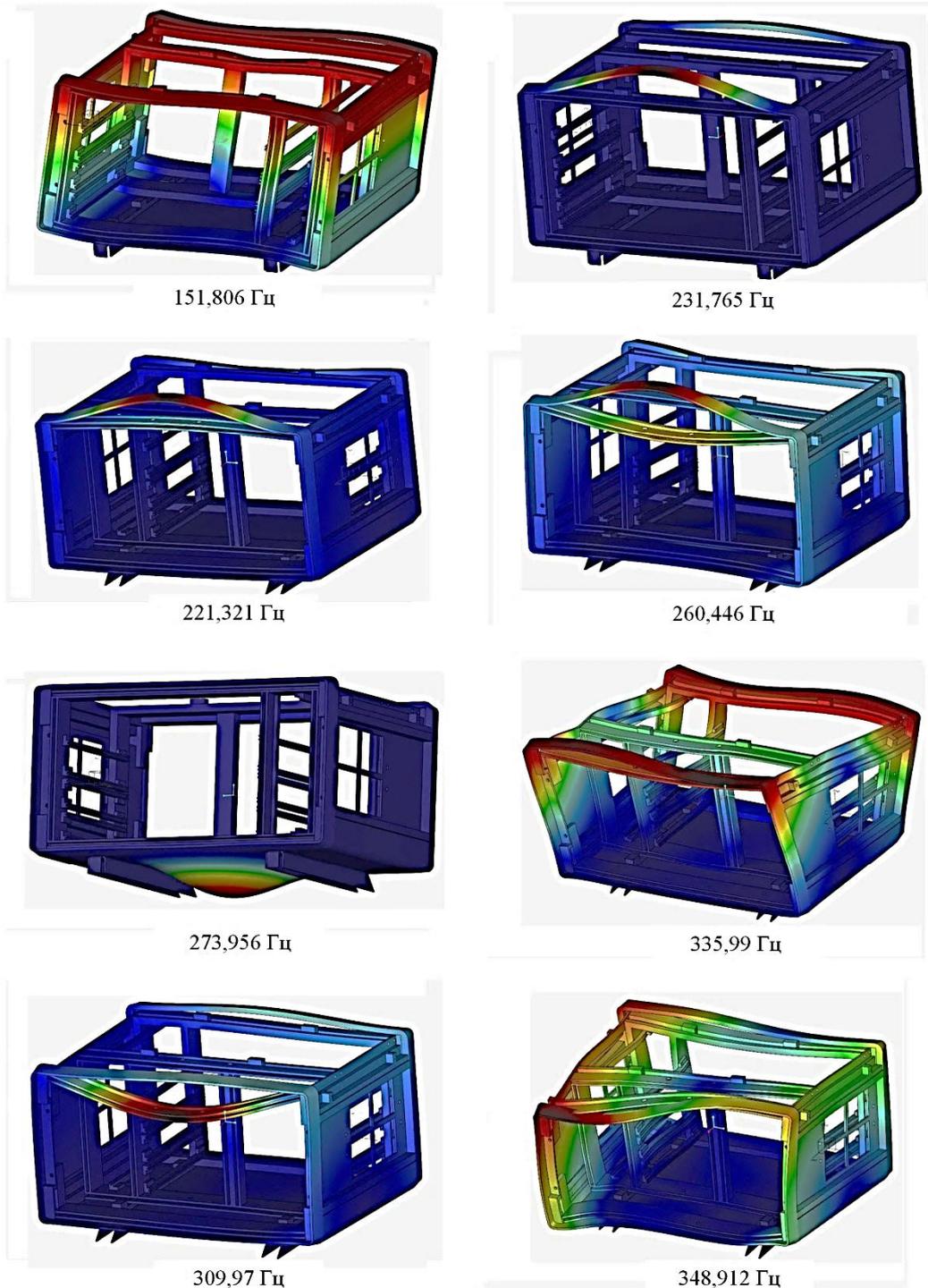


Рис. 3. Формы колебаний радиоэлектронного шкафа, соответствующие резонансным частотам

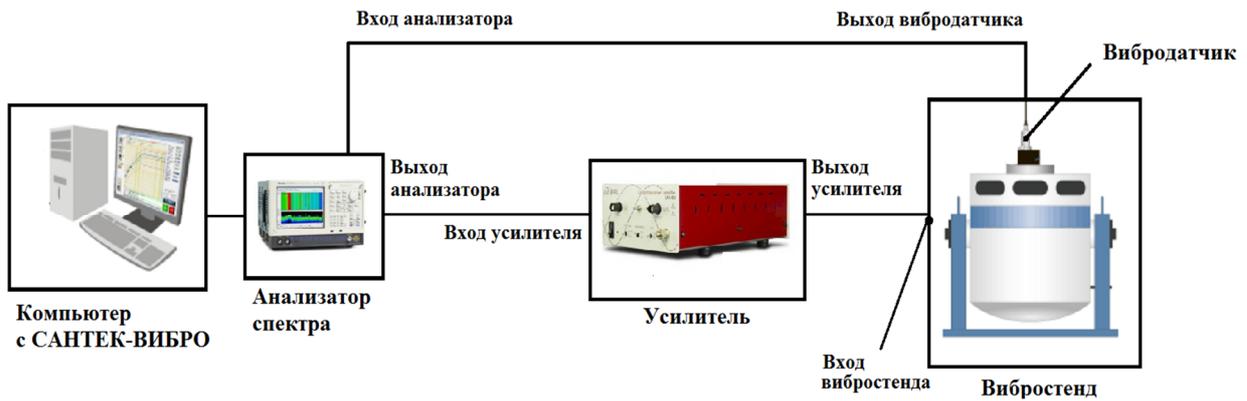


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для модальных исследований при условии нагружения в вертикальном направлении

Вибростенд позволяет испытывать конструкции массой до 90 кг при виброускорениях до  $100 \text{ м/с}^2$ . В качестве датчика использован пьезоэлектрический преобразователь общего назначения АР37, предназначенный для измерения вибрационного и ударного ускорений. Собственная частота датчика в закрепленном состоянии более 45 кГц, что находится вне пределов частотного диапазона собственных частот радиоэлектронного модуля. Датчик передает сигнал от вибростенда к компьютеру.

Первая резонансная частота подвижной системы вибростенда без нагрузки согласно технической документации ВС103К составляет не менее 2,3 кГц и, как и собственная частота пьезомодуля, не попадает в исследовательский диапазон частот. Т.о., влияние подвижной платформы и пьезодатчика на динамические характеристики объекта испытаний пренебрежимо мало.

Для управления режимом испытаний на синусоидальную вибрацию и измерения параметров вибрации использовался программно-аппаратный комплекс цифрового управления вибрацией «САНТЕК-ВИБРО», в котором управление заданием параметров испытательных режимов и измерением осуществляется по амплитудным или среднеквадратическим значениям параметров вибрации: виброускорения, виброскорости и виброперемещения. Эти параметры взаимно зависимые и при задании или определении одного из них программа автоматически пересчитывает остальные по следующим формулам:

$$D = d - \text{виброперемещение в мм};$$

$$v = 2\pi f d - \text{виброскорость в мм/с, } f - \text{частота};$$

$$a = \frac{(2\pi f)^2 d}{1000} - \text{виброускорение в м/с}^2.$$

Натурные испытания по выявлению резонансных частот проведены с соблюдением требований ГОСТ 28203-89 в режиме синусоидальной вибрации

с качающейся частотой в вертикальном направлении [6,7].

Радиоэлектронный модуль закрепляли на платформе стенда в эксплуатационном положении так, что его центр тяжести совпадал с осью виброшток. В качестве контрольной точки, сигнал в которой был использован для управления режимом испытания, выбрана точка части основания исследуемого радиоэлектронного модуля, находящаяся в непосредственной близости к точкам крепления конструкции.

Поиск резонансных частот осуществлен путем непрерывного изменения частоты по экспоненциальному закону во времени в диапазоне 10-550 Гц со скоростью качания 1 октава/мин  $\pm 10\%$ . Верхняя граница частоты определена из расчета  $1,1 f_0$ , где  $f_0 = 500 \text{ Гц}$  - верхняя частота диапазона в соответствии с требованиями стандарта. Выбранная скорость изменения частоты позволила обеспечить возможность обнаружения и регистрации резонансов. При этом задано минимально возможное значение амплитуды ускорения контрольной точки, оно поддерживалось постоянным и составляло  $1g$ , где  $g$  - ускорение свободного падения.

В качестве ответного спектра выбран спектр виброускорения, поскольку пьезодатчик (акселерометр) измеряет именно ускорение и его не нужно специально преобразовывать, что позволяет уменьшить погрешности измерений. При построении спектров для горизонтальной оси, по которой отложена шкала частот, использован логарифмический масштаб. По вертикальной оси отложено относительное вибрационное ускорение. На рис. 5 показаны места закрепления датчиков на передней верхней планке (рис. 5а), в центральной части верхней панели (рис. 5в) и нижней панели (рис. 5д), а также представлены соответствующие спектрограммы виброускорений - откликов на вынужденное воздействие, зафиксированные пьезоэлектрическими датчиками (рис. 5 б,г,е). На снятых спектрограммах виброускорений все пики наблюдаются в пределах одной октавы  $100 \div 1000 \text{ Гц}$ .

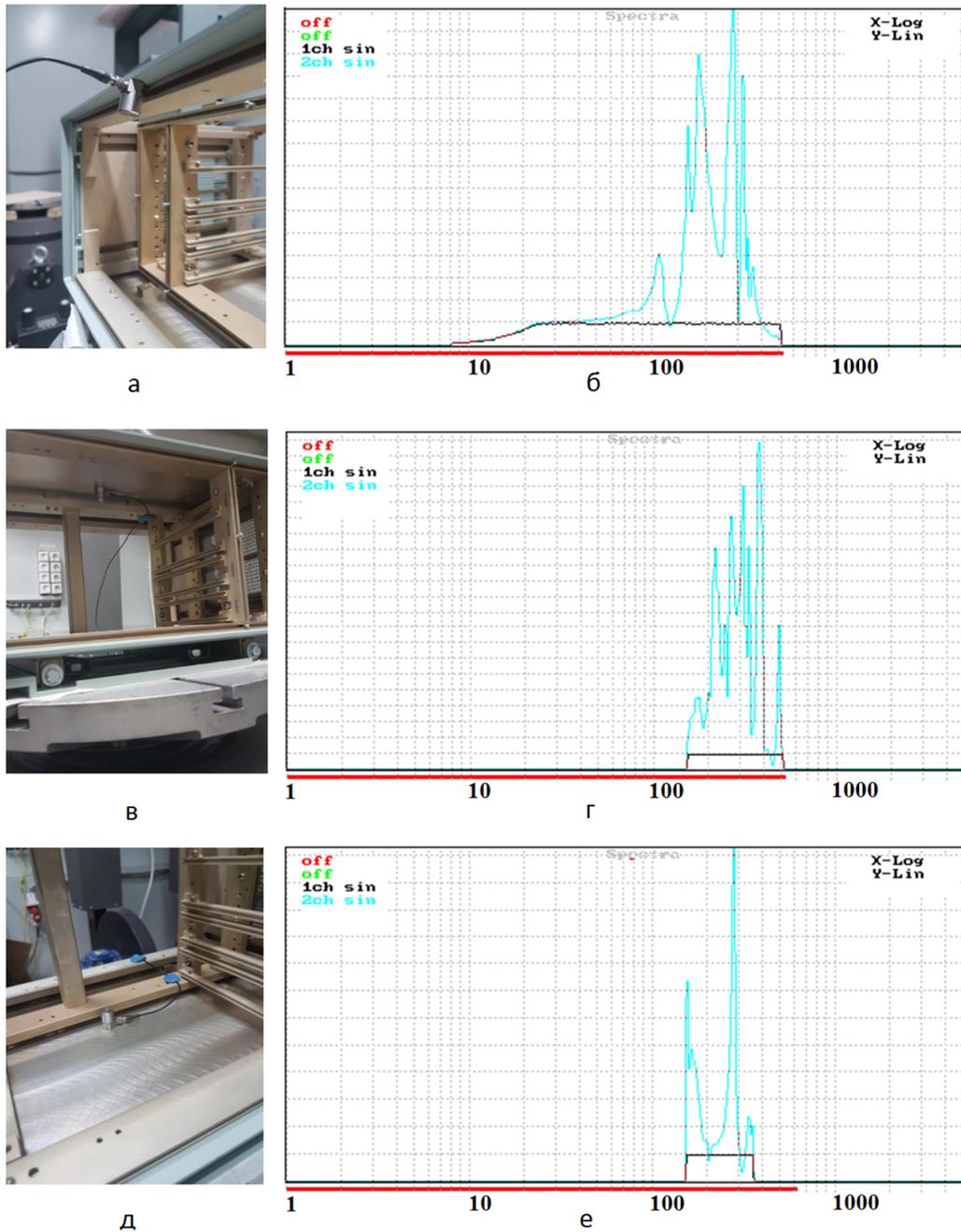


Рис. 5. Результаты экспериментального определения резонансных частот:  
 а, в, д – места закрепления датчиков N1, N2 и N3 соответственно;  
 б, г, е – соответствующие спектрограммы

В табл. 3 представлены результаты, полученные в результате анализа виброспектрограмм: значения резонансных частот, указаны номера датчиков, значения максимальных ускорений соответствующих точек, а также относительные погрешности значений резонансных частот, полученных в модельном и натурном экспериментах.

Вибрационный пик, ожидаемый на частоте 298,221 Гц для конструкции с верхней панелью (эта

частота является собственной частотой колебаний панели), экспериментально четко не зарегистрирован. Причину этого авторы видят в близости резонансных частот 298,221 и 309,97 Гц, вследствие чего происходит расширение и слияние пиков, производя общий повышенный ответ. На спектрограмме в отсутствие четко выраженного пика значение виброускорения на этой частоте составляет 12,5g (рис. 5г).

Резонансные частоты, полученные в модельном и натурном экспериментах

N моды колебаний	Резонансная частота, Гц		N датчика	Виброускорение, ng, где g – ускорение свободного падения	Относительная погрешность, %
	Модельный анализ	Натурный эксперимент			
1	151,806	158	1	9,8g	3,9
		153	3	7,5g	0,8
	140,119	169	2	4,5g	17,1
2	221,321	214	2	13g	3,4
3	231,765	240	2	9g	3,4
4	260,446	268	1	18,3g	2,8
5	273,956	274	3	45g	0,02
		267	2	16g	2,6
6	298,221	-	2	12,5g	-
7	306,663	310	1	12g	0,01
		305	2	18g	0,5
8	338,529	329	1	4,8g	2,1
		331	2	14g	1,5
		340	3	2,3g	0,4
9	348,912	350	1	3,5g	0,3
		367	2	21g	4,9
10	458,51	476	2	9g	3,7

### Заключение

Количественное сравнение результатов, полученных при реальных испытаниях конструкции, с результатами испытаний ее прототипа показал хорошее соответствие. Отклонения расчетных значений резонансных частот 2-10 (табл. 3) от экспериментальных не превышают 5%. Для первой резонансной частоты два датчика показали несоответствие менее 4%, третий датчик – 17,1 %. Таким образом, получена хорошая воспроизводимость собственных частот для данной группы экспериментов, что позволяет сделать вывод об адекватности построенной конечно-элементной модели средствами программного продукта CREO.

Хорошее согласование результатов делает использование CREO перспективным в части анализа откликов конструкции на различные виды механических воздействий для выявления слабых мест во время эксплуатации, а также для оптимизации конструкции и выбора необходимой упаковки для транспортировки.

### Литература

1. Kuang-Hua Chang. Product Design Modeling using CAD/CAE. The Computer Aided Engineering Design Series/ Kuang-Hua Chang. - Academic Press is an Imprint of Elsevier. 2014. - 438 p.

2. Средства инженерного анализа конструкций радиоэлектронных модулей третьего уровня / С.Ю. Белецкая, П.В. Иевлев, А.В. Муратов, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: ежегод. Междунар. симпозиум. Пенза, 2017 (в печати).

3. Оптимизация процессов проектирования радиоэлектронных модулей третьего уровня средствами CREO PARAMETRIC 3.0 / П.В. Иевлев, А.В. Муратов, С.А. Слинчук, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т. 12. - № 6. С. 96-103.

4. Ewins D.J. Modal Testing: Theory, Practice and Application. 2nd edition. Baldock: Research Studies Press LTD, 2000. 574 p. Код доступа: <https://ru.scribd.com/doc/164868863/Modal-Testing-Theory-and-Practice-2nd-Edition>, дата обращения 14.05.2017.

5. Heylen W., Lammens S., Sas P. Modal Analysis Theory and Testing. Leuven: KUL Press, 1997. Код доступа: <http://mech.vub.ac.be/avrg/publications/ModalAnalysis.pdf>, дата обращения 14.05.2017.

6. ГОСТ 28203-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Fc и руководство: Вибрация (синусоидальная). Введ. 1990-01-03. - М.: Стандартинформ. 2006. 23 с.

7. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н.П. Сергеев, А.А. Кондрашин. - М.: Техносфера, 2005. - 504 с.

АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж

Воронежский государственный технический университет

## VERIFICATION OF FINITE ELEMENT MODEL OF THIRD LEVEL RADIO-ELECTRONIC MODULE, CREATED BY MEANS OF CREO PROGRAM COMPLEX

V.I. Borisov<sup>1</sup>, P.V. Ievlev<sup>2</sup>, A.V. Muratov<sup>3</sup>, T.L. Turaeva<sup>4</sup>, A.V. Turetskiy<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Full Doctor, Professor, company "Contsern "Sozvezdie"", Voronezh, Russian Federation  
e-mail: bvi@sozvezdie.su

<sup>2</sup>Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: ievlev92@mail.ru

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

<sup>4</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: tlтураeva@mail.ru

<sup>5</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: tav7@mail.ru

The finite element method implemented in the CREO software package is the optimal tool for the design of radioelectronic facilities. To carry out the numerical modal analysis, a mathematical model of a third-level radio-electronic module has been developed based on a 3D computer model created with the help of the CREO CAD module. The numerical modal analysis is carried out by the finite element method in the CREO program complex.

In order to verify the finite element model, the created product has been tested by the swept frequency method. The dynamic test scheme has been developed in accordance with the data obtained during the modal analysis. The vertical axis of the test object has been chosen as the direction of the forced oscillations. Resonant phenomena have been observed in the range of 100-500 Hz, which corresponds to the finite element model obtained in the modal analysis.

Based on the results of the tests, the finite element model has been verified. According to the comparative analysis of the calculated resonance frequencies obtained in the CREO software package and the resonant frequencies obtained from the results of full-scale tests on the shaker, it has been concluded that the created mathematical model of the construction of the third level radio-electronic module adequately reflects the stiffness, mass and geometric parameters of the structure. The results are in good agreement with the experimental data; the discrepancy does not exceed 5%

Key words: radio-electronic modules, design, finite element model, static analysis, modal analysis

### References

1. Kuang-Hua Chang "Product Design Modeling using CAD/CAE", *The Computer Aided Engineering Design Series*, Elsevier, 2014, 438 p.
2. Beletskaya S.YU., Ievlev P.V., Muratov A.V., Turaeva T.L., Turetskiy A.V., Khudyakov Yu.V. "Means of engineering design & analysis of electronic modules of the third level" ("Credstva inzhenernogo analiza konstruktsiy radioelektronnykh moduley tret'ego urovnya"), *The annual international Symposium "Reliability and quality" (Ezhegodnyy mezhdunarodnyy simpozium "Nadyezhnost' i kachestvo")*, Penza, 2017 (in press).
3. Ievlev P.V., Muratov A.V., Slinchuk S.A., Turaeva T.L., Turetskiy A.V. "Optimization of design processes of electronic modules of the third level of CREO PARAMETRIC", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 96-103.
4. Ewins D.J. "Modal Testing: Theory, Practice and Application. 2nd edition", Baldock, Research Studies Press LTD, 2000, 574 p.
5. Heylen W., Lammens S., Sas P. "Modal Analysis Theory and Testing", Leuven, KUL Press, 1997.
6. GOST 28203-89 "The main methods of testing the impact of external factors. Part 2. Tests. Test FC and guidance: Vibration (sinusoidal)", Moscow, Standartinform Publ., 2006, 23 p. (in Russian)
7. Fedorov V.K., Sergeev N.P., Kondrashin A.A. "Inspection and testing in designing and production of radio-electronic devices" ("Kontrol' i ispytaniya v proektirovanii i proizvodstve radioelektronnykh sredstv"), Moscow, Tekhnosfera, 2005, 504 p.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИПОЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПУТЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

**В.В. Глотов**

Решение вопросов электромагнитной совместимости становится в настоящее время неотъемлемым элементом деятельности предприятий - разработчиков и изготовителей технических средств, основой которых, как правило, являются печатные узлы. Обычная печатная плата может иметь сотни или даже тысячи цепей. При этом каждый контур является потенциальным источником энергии, который в конечном итоге может непреднамеренно воздействовать на другие цепи или элементы. В статье представлена печатная плата массивом магнитных диполей, найденным из оптимизации генетических алгоритмов, основанных на сканировании ближнего поля. Основная идея заключается в реализации сбалансированной многокритериальной оптимизации с учетом как точности (лучше приспособленной к полю), так и эффективности (меньше диполей) за счет правильного определения генов и процесса эволюции. Количество и расположение используемых диполей, определенных из оптимизации, а не заранее определенного эмпирического значения, дают более эффективное представление печатной платы. Кроме того, метод работает с несколькими видами информации ближнего поля (амплитуда, амплитуда и фаза, любой компонент или комбинация) при условии, что данная информация достаточна для электромагнитной характеристики

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, печатные платы, диполь, излучения

Основная идея оптимизации состоит в том, чтобы создать две подгруппы с разным числом одновременно развивающихся и конкурирующих друг с другом диполей. Эволюция происходит внутри каждой подгруппы по отдельности и завершается операциями генетических алгоритмов (ГА). Он нацелен на то, чтобы развить подгруппы населения, чтобы лучше соответствовать измеряемой области. Между тем в каждом поколении происходит обоюдное соперничество между двумя подгруппами. Субнаселение с меньшим количеством диполей выигрывает конкуренцию только тогда, когда его согласие с измеренным полем не хуже, чем у другой подгруппы населения. Блок-схема этой оптимизации проиллюстрирована на рис. 1.

Первоначально все население, состоящее из  $P$  индивидов (дипольные массивы), делится на две подгруппы, каждая из которых состоит из  $P/2$  индивидуумов [1].

Одна подгруппа начинает итерацию с  $N$  диполей, а другая с  $N-1$  диполями.

В каждом поколении каждая подгруппа населения развивается посредством операций ГА - отбор, кроссовер и мутация. Это завершается отдельно, поэтому выбор и кроссовера выполняются внутри каждой подгруппы. Также после каждого поколения существует конкуренция между двумя субпопуляциями путем сравнения их средних значений пригодности.

Исходя из результата конкуренции, если  $N-1$  дипольная популяция превосходит  $N$ -дипольную (например, среднее значение физической пригодности меньше), индивиды в  $N$  - дипольной подгруппе случайным образом опускают 2 диполя, образуя  $N-2$  дипольные массивы. В противном случае эволюция продолжается без изменения дипольного числа в каждой подгруппе населения. Эволюция и конкуренция идут до тех пор, пока население с меньшим количеством диполей не сможет превзойти ту, у которой больше диполей, или будет выполнено другое условие остановки, например. Достигнута максимальная генерация.

Здесь некоторые моменты должны быть отмечены для конкурса. Во-первых, сравнивается их среднее значение пригодности, а не элитарности. Это объясняется тем, что конвергенция каждой подгруппы населения должна быть гарантирована, когда решения (дипольные капли или нет) должны быть сделаны на основе результата конкурса. Только тогда, когда большинство индивидов в подгруппе населения превзойти отдельных лиц в другой, считается, что все население лучше приспособлено. Во-вторых, из-за эффектов  $N^\alpha$  члена в функции пригодности матрица с меньшим количеством диполей допускается лучше устанавливать, даже если согласование с измеренным полем несколько хуже, чем массив с большим количеством диполей. Как упоминалось ранее, параметр  $\alpha$  контролирует вес между точностью и простотой [2].

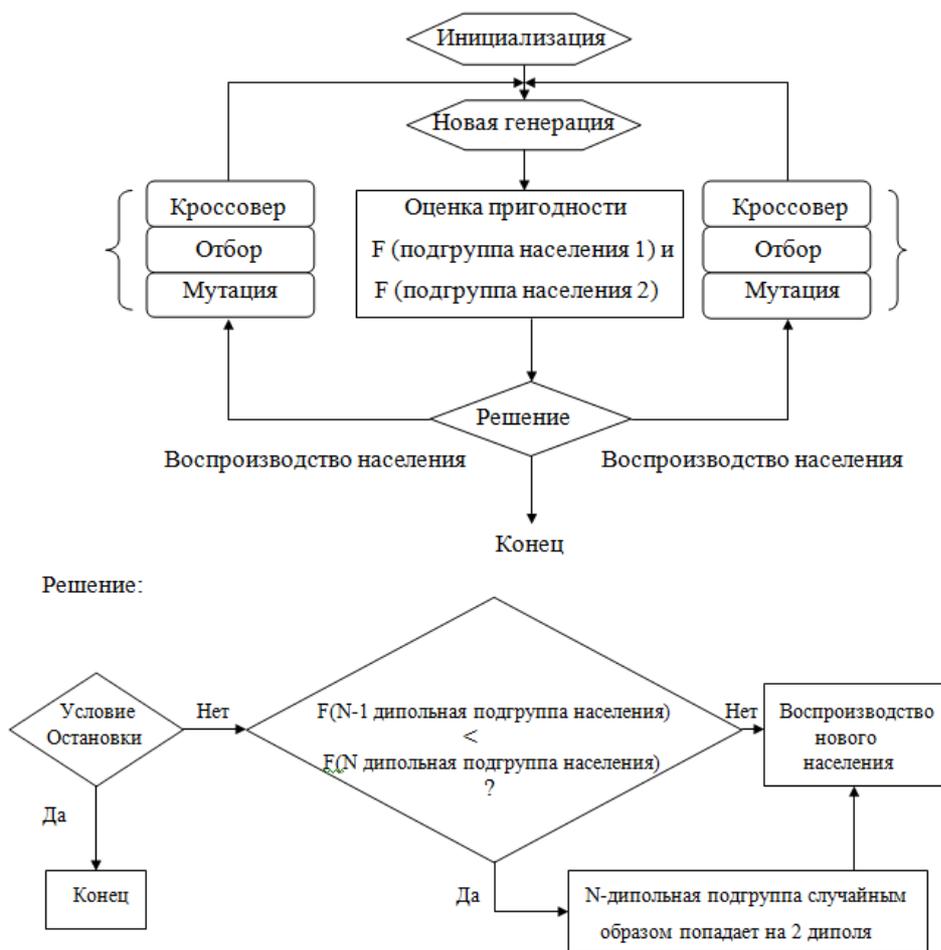


Рис. 1. Блок-схема взаимовыгодной оптимизации

Случайный процесс эволюции. Когда подгруппа населения падает на два диполя, ее предыдущая конвергенция нарушается, но другая подгруппа населения уже хорошо сходится. Поэтому он должен перейти в новое конвергентное стабильное состояние, чтобы превзойти другое. Процесс сближения показан на рис. 2.

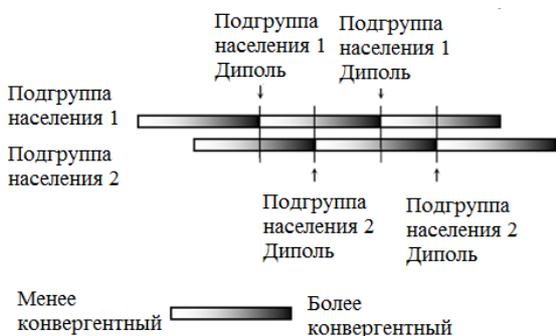


Рис. 2. Иллюстрация сходимости во взаимно-конкурентной оптимизации

Результаты этой оптимизации представлены ниже на примере L - образной микрополосковой платы. Согласно знаниям о

зависимости от параметров измерений, для оптимизации ГА использовались данные с «достаточной» информацией, где разрешение сканирования = 2,5 мм, размер плоскости сканирования = 120 × 75 мм и высота сканирования = 11,5 мм. Оптимизация началась с подгруппы населения  $N_0 = 20$  диполей и нижний предел  $N_0 = 5$ . Размер популяции составлял  $P = 10000$ , а весовой параметр  $\alpha = 0,2$ . Параметры операций ГА были  $p_{cross} = 0,7$ ,  $p_{mutation} = 0,015$ , и элетарная пропорция = 1%. Наконец, конкуренция остановилась при  $N = 7$ , что означает, что моделирование с 6 диполями не может превзойти 7 диполей. Это означает, что 7 является существенным числом для моделирования этой платы в соответствии с этими настройками алгоритма. Расположение этих диполей показано на рис. 3а. Видно, что диполи распределены почти вдоль микрополосковой линии [3]. Это разумно, поскольку на самом деле производятся электромагнитные поля от микрополосковой дорожки. Это означает, что эффективным способом моделирования печатной платы является размещение эквивалентных диполей

вокруг реальных излучающих компонентов, если имеется априорная информация о структуре цепи.

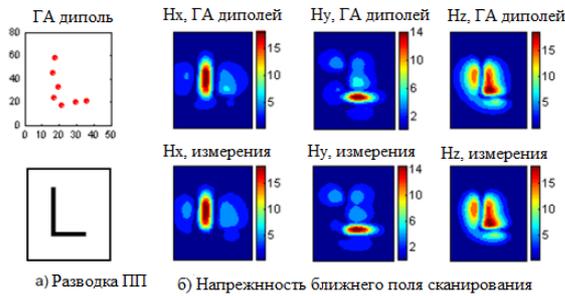


Рис. 3. Эквивалентные диполи для L-образной микрополосковой платы, идентифицированные с помощью оптимизации ГА.

Реконструированное ближнее поле над плоскостью сканирования и предсказанное дальнее поле в плоскости E представлено на рис. 3б и 4, соответственно. Можно наблюдать хорошее согласие с имитацией полного поля, показывая, что эквивалентные диполи, идентифицированные по оптимизации ГА, являются хорошим представлением ПП в качестве источника эмиссии.

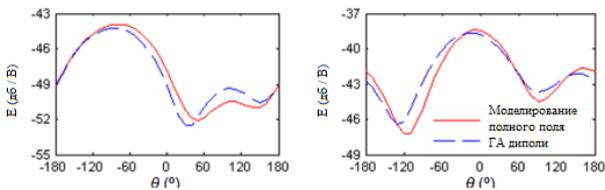


Рис. 4. Дальнее поле в плоскости E, предсказываемое эквивалентными диполями, идентифицированными ГА

Необходимо признать, что в этом методе оптимизации есть некоторые недостатки. Во-первых, нет жесткого механизма для обеспечения глобальной конвергенции этой оптимизации. Все описанные выше методы конвергенции основаны на опыте. Во-вторых, вычислительные затраты чрезвычайно велики. Требование к памяти и вычислительная задача удваиваются, чтобы настроить две подгруппы. Кроме того, время выполнения очень велико, потому что всякий раз, когда подгруппа населения бросает диполи, она должна снова эволюционировать, чтобы сблизиться с другим оптимальным, а затем стать конкурентоспособной по отношению к другой подгруппе населения. Таким образом, эволюция в пределах каждой подгруппы фактически повторяется. В приведенном выше

примере время работы составляет 20 часов на компьютере Intel Core 2 Duo E8400 с тактовой частотой 3,0 ГГц. Однако этот метод способен обеспечить существенное количество и распределение диполей и предсказать излучения. По этим причинам его полезность для теоретических обоснований важнее, чем для практических применений.

Эта оптимизация называется самоконкурентной эволюцией, потому что подгонка к измеряемым полям и поиск минимального количества диполей заканчиваются в эволюции одной и той же популяции. Для реализации этого бинарный параметр  $\gamma_i$  добавляется к набору параметров диполя, который указывает, следует ли использовать этот диполь. Поэтому диполь описывается 9 параметрами, кроме 8 параметров для положения и момента, как упомянуто выше. Весь диполь Массив затем кодируется в хромосому, состоящую из двоичных битов  $N_0 \cdot (2W_1 + 6W_2 + 1)$ , и длина этой хромосомы остается неизменной в процессе оптимизации. В эволюции ГА число диполей изменяется с  $N_0$  на  $N$  в соответствии со значением каждого  $\gamma_i$ , которое развивается с помощью операций ГА на основе значения пригодности [4]. Когда  $\gamma_i = 1$ , соответствующий диполь устанавливается «активным» и вносит вклад в общее поле. Когда  $\gamma_i = 0$ , соответствующий диполь устанавливается/

«Неактивно» и не вносит вклад в общее поле. ГА выполняются для того, чтобы эволюционировать остальные 8 параметров как обычно независимо от значения  $\gamma_i$ . Из-за влияния члена  $N\alpha$  в функции пригодности массив с меньшим количеством диполей более подходит для соответствия, хотя согласование его поля с измеренным полем несколько хуже. Это соревнование с двумя объективами подталкивает алгоритм к оптимальному массиву, генерирующему поле, оснащенное как можно меньшим количеством диполей. Баланс между точностью и простотой контролируется параметром  $\alpha$ .

Эффекты  $\alpha$  проиллюстрированы на примере L-образной микрополосковой платы. Алгоритмы ГА были повторно реализованы путем настройки значения  $\alpha$ . Начальное число диполей  $N_0$  и нижнего предела  $N_1$  были определены как 20 и 5 соответственно. Из-за характера случайного поиска результаты могут отличаться каждый раз. Общий результат представлен на рис. 9 результирующее число диполей  $N$  (диполи с  $\gamma_i = 1$ ) и среднеквадратичная ошибка  $\sigma_{MSE}$ .

Между полем диполей и измеренным полем. Большое значение  $\alpha$  стремится использовать меньшее количество диполей. Но когда  $\alpha$  слишком велико ( $\alpha \geq 0,5$ ), баланс между точностью и простотой нарушается, и результирующее число диполей падает до нижнего предела  $N_1 = 5$ . С другой стороны, когда  $\alpha$  слишком мало ( $\alpha < 0,1$ ), пригодность полностью зависит от согласования поля и результирующего числа диполей остается при стартовом числе  $N_0 = 20$ . Для полевого соглашения очевидно меньшее количество диполей приводит к худшему согласанию. Но когда достигается существенное число диполей (в этом примере - около 8), дальнейшее его увеличение существенно не улучшит согласование поля [5].

Об этом свидетельствует очень незначительное изменение среднеквадратичной ошибки при  $N = 8 \sim 16$ . Учитывая баланс между двумя целями - точность и простоту - значение  $\alpha$  между 0.2 и 0.4 в большинстве случаев является разумным.

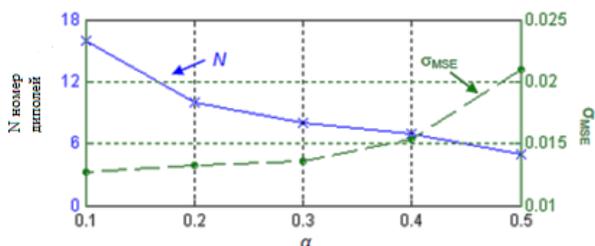


Рис. 5. Количество диполей и согласование полей в зависимости от весового параметра  $\alpha$

У самоконкурентоспособной эволюции есть некоторые преимущества перед

взаимовыгодной эволюцией. Во-первых, реализация алгоритма является стандартной процедурой ГА. Можно обратиться к руководящим принципам ГА для рассмотрения конвергенции и стабильности алгоритма. Во-вторых, поскольку оптимизация завершается внутри одной популяции за один раз, вычислительные затраты менее тяжелые. Для случая L-образной платы время работы на том же компьютере составляло около 5 часов, чтобы достичь конвергенции. Однако, по сравнению с решением обратной задачи, вычислительные требования оптимизации ГА все еще намного тяжелее. Время работы первого составляет порядка нескольких минут, а для второго - нескольких часов.

#### Литература

1. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. - М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.
2. Электронный каталог Лаборатория ЭМС. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.emc-problem.net>.
3. Макаров, О.Ю. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография / О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, М.А. Ромашенко. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.
4. Ромашенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения / М.А. Ромашенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, -№ 4. – С. 106-109.
5. Ромашенко, М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ромашенко Михаил Александрович. - Воронеж, 2014.-36с.

Воронежский государственный технический университет

## OPTIMIZATION OF A DIPOLE MODEL VIA GENETIC ALGORITHMS

V.V. Glotov

Graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [vadik-livny@mail.ru](mailto:vadik-livny@mail.ru)

Solving the issues of electromagnetic compatibility is now becoming an integral part of the activities of enterprises - developers and manufacturers of technical equipment, the basis of which, as a rule, are printed nodes. A typical PCB can have hundreds or even thousands of circuits. In this case, each circuit is a potential source of energy, which can eventually inadvertently affect other circuits or elements. The paper presents a printed circuit board with an

array of magnetic dipoles found from optimization of genetic algorithms based on near field scanning. The main idea is to implement a balanced multi-criteria optimization taking into account both accuracy (better adapted to the field) and efficiency (less dipoles) due to the correct identification of genes and the evolution process. The number and location of the dipoles used, determined from optimization, rather than from a predetermined empirical value, provide a more efficient representation of the printed circuit board. In addition, the method works with several kinds of near field information (amplitude, amplitude and phase, any component or combination), provided that this information is sufficient for the electromagnetic characteristic

Key words: electromagnetic compatibility, printed circuit board, dipole, radiation

#### References

1. Kechiev L.N. "Design of printed circuit boards for high-speed digital hardware" ("Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury"), Moscow, OOO "Grupa IMT", 2007, 616 p.
2. OPAC EMC Laboratory, available at: <http://www.emc-problem.net>.
3. Makarov O.U., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods of providing intra-equipment electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic devices: monograph" ("Metody obespecheniya vnutriapparatumoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruksiyakh elektronnykh sredstv: monografiya"), Voronezh, VSTU, 2013, 234 p.
4. Romashchenko M.A. "Basic EMC software analysis tasks in designs REM and the principles of its implementation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.
5. Romashchenko M.A. "Methods of optimal construction design of radio-electronic devices with regard to electromagnetic compatibility and interference immunity. Dr. tech. sci. diss." ("Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruksiy radioelektronnykh sredstv s uchyetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti. Diss. dokt. tekhn. nauk"), Voronezh, 2014, 36 p.

## МЕХАНИЗМ И ПРОЦЕССЫ КОМБИНИРОВАННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

М.В. Кондратьев, Е.В. Смоленцев, В.П. Смоленцев

Показана эффективность интенсификации процесса электроэрозионной обработки путем подогрева места разряда. В комбинированном процессе эффективным источником тепловой энергии оказался факел плазмы, поэтому перед нанесением покрытия предложено облучить поверхность детали, придав лучу осциллирующее движение в направлении подачи электрода-инструмента. Приведены требования к покрытиям: структура и др. Учтены основные факторы, влияющие на протекание механизма нанесения покрытия: режим электроэрозионного и плазменного процесса, жидкотекучесть материала электрода.

Приведено принципиальное отличие комбинированного процесса от ранее использованного процесса последовательного нанесения покрытий, разнесенного по времени. Это позволяет сохранять суммарную тепловую энергию покрытия с минимальными потерями и снижать градиенты температур, вызывающих внутренние напряжения в покрытии и его растрескивание. Поэтому для получения качественного покрытия при рассмотрении механизма и процессов комбинированной обработки смещение луча плазмы на стадии нанесения упрочняющего слоя относительно электрода-инструмента должно быть минимальным, но во всех случаях последний слой должен наноситься на покрытие, полученное электроэрозионным методом до его остывания за счет теплоотдачи

Ключевые слова: подогрев, покрытие, электроэрозионное упрочнение, плазма

### Введение

Для проектирования технологических процессов комбинированного нанесения износостойких покрытий необходимо раскрыть последовательность этапов воздействий, описывающих формирование поверхностных слоев, обладающих требуемыми эксплуатационными характеристиками. Предлагаемый механизм позволяет разработать систему управления процессом нанесения покрытий и создает базу для разработки математической модели исследуемого процесса.

### Механизм комбинированного получения покрытия

Анализ ранее выполненных исследований [1-5] дает возможность сформировать условия для разработки механизма получения износостойких покрытий, где наблюдается несколько этапов протекания процесса.

I этап приведен на рис. 1.

На этом этапе (рис.1) плазменный луч используется для предварительного подогрева зоны нанесения покрытия, при котором его

направляют так, чтобы предельная температура поверхности детали не превышала границы плавления металла. Здесь может использоваться сканирование луча с частотой, при которой время нагрева зоны Нл (рис. 1) достаточно, чтобы достичь заданной температуры и успеть вернуть луч на центральную часть капли, только что нанесенной электроэрозионным методом.

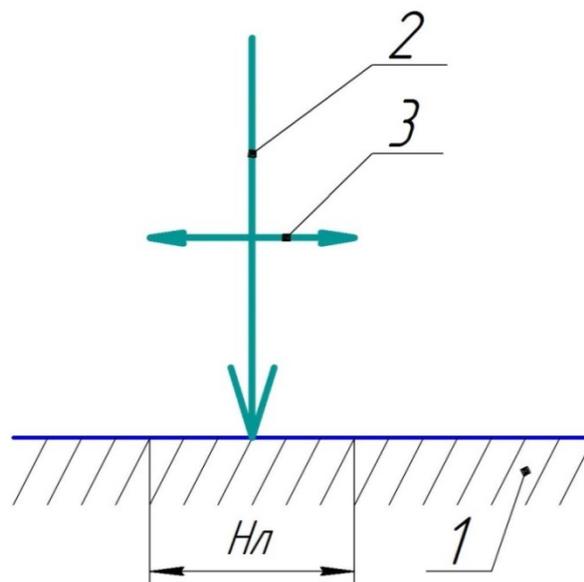


Рис. 1. Подогрев детали лучом плазмы. 1 – деталь; 2 – луч плазмы; 3 – амплитуда сканирования; Нл – зона подогрева детали

Кондратьев Михаил Вячеславович - ВГТУ, старший преподаватель, e-mail: [540520@mail.ru](mailto:540520@mail.ru)  
Смоленцев Евгений Владиславович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)  
Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [Vsmolen@inbox.ru](mailto:Vsmolen@inbox.ru)

Обычно амплитуду сканирования луча ограничивают 2-3 диаметрами капли на границе с поверхностью детали, что не

превышает 1,2-1,5 мм. Это соответствует зоне эффективного нагрева [5; 6] при частоте 120-150 Гц и зависит от скорости перемещения и мощности луча плазмы. Сканирование луча позволяет объединить подвод тепловой энергии на подогрев, расплавление и перегрев покрытия, получение упрочняющего слоя и разработать режимы обработки, при которых обеспечивается получение качественного износостойкого покрытия при минимальном расходе энергии.

**II этап.** Охватывает электроэрозионное нанесение покрытия на поверхность участка Нл детали при совмещении времени попадания капли на деталь с подводом тепла лучом плазмы (рис. 2; 3).

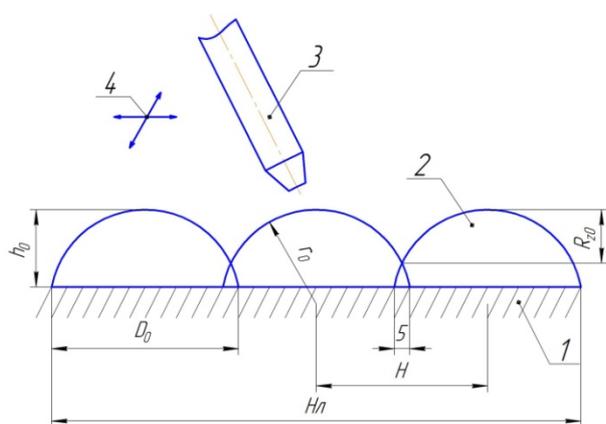


Рис. 2. Нанесение капель покрытия. 1 – деталь; 2 – капля; 3 – электрод-инструмент; 4 – перемещение электрода; 5- перекрытие капель;  $R_{z0}$  – высота неровностей;  $h_0$  – толщина покрытия;  $r_0$  – радиус капли; Нл – зона подогрева детали;  $D_0$  - диаметр основания отдельной капли;  $H$  – шаг между каплями

Температура капли (рис. 2) должна быть выше температуры плавления металла покрытия (по [7; 8] на 200-300К). С учетом подогрева можно увеличить время текучести материала покрытия и обеспечить растекание капли независимо от времени действия луча плазмы, при котором формируется профиль покрытия толщиной  $h_0$  с высотой неровностей  $R_{z0}$  (рис. 2). Радиус капли ( $r_0$ ) можно принять постоянным, хотя он может существенно изменяться, как и диаметр  $D_0$ . Шаг между каплями ( $H$ ) имеет меньшую величину, чем  $D_0$ , т.к. происходит перекрытие соседних капель (5 на рис. 2).

Электрод-инструмент (3 на рис. 2) может перемещаться в любом направлении (4 на рис. 2), но это должно происходить синхронно с движением луча плазмы (рис. 3).

**III этап.** На этом этапе (рис. 3), который при комбинированном покрытии связан со вторым, происходит дальнейший разогрев материала капли и увеличение ее текучести.

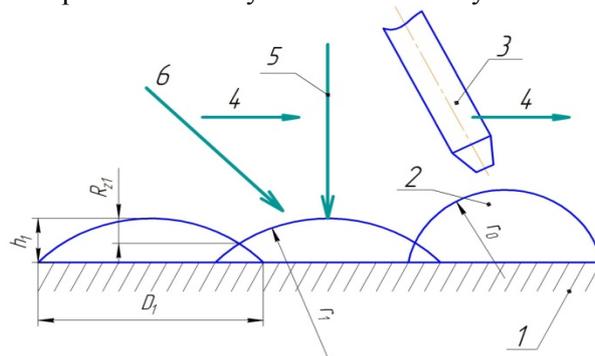


Рис. 3. Выравнивание поверхности детали при воздействии луча плазмы. 1 – деталь; 2 – капля; 3 – электрод-инструмент; 4 – перемещение электрода; 5-луч плазмы; 6 – плазмообразующий газ;  $h_1$  – толщина покрытия;  $R_{z1}$  – высота неровностей;  $D_1$  - диаметр основания отдельной капли;  $r_1$  – радиус капли

Можно принять, что подводимая лучевая энергия (рис. 3) хотя и вводится последовательно с расплавом капли, но в расчетах и при построении механизма покрытия может приниматься как сконцентрированный параметр теплоты, воздействующий на каплю после ее законченного формообразования при электроэрозионном покрытии. При этом можно не учитывать отвод тепла в деталь и окружающую среду, т.к. интервал времени между нанесением капли и началом воздействия на нее луча практически отсутствует.

За счет тепловой энергии плазмы происходит (рис. 3) повышение нагрева капли 2, что вызывает повышение ее жидкотекучести и растекание от диаметра  $D_0$  до диаметра  $D_1$  с возрастанием радиуса с  $r_0$  до  $r_1$ . При этом толщина покрытия ( $h_1$ ) уменьшается относительно  $h_0$ , но увеличивается перекрытие между соседними каплями (2 на рис. 2) и достигается меньшая шероховатость поверхности ( $R_{z1} < R_{z0}$ ).

Следует также учитывать, что дополнительный подогрев капли лучом плазмы снижает градиент температур при ее остывании, вызывает образование внутренних напряжений растяжения. Последнее может приводить к образованию микротрещин в покрытии (а иногда и в материале детали), что снижает не только износостойкость, но и механические характеристики изделия. Перепад температур особенно сильно влияет на хрупкие материалы и в этом случае расчеты

перемещений луча (5 на рис. 3) нужно выполнять с учетом минимизации градиентов температур.

На рассматриваемом этапе большое влияние на качество покрытия оказывает выбор плазмообразующего (6 на рис. 3), а иногда горючего и защитного газа, который защищает деталь и покрытие от окисления в горячем состоянии. Электроэрозионная обработка материалов, устойчивых к окислению, может создавать условия для повышения усталостной прочности [7; 8; 9], что подтверждает полезное воздействие инертных газов в комбинированном процессе обработки для повышения эксплуатационных характеристик изделий. Следовательно, при комбинированном нанесении покрытий одним из режимных параметров может являться состав и расход плазмообразующего газа (6 на рис. 3), что ранее [8; 9], в расчетах не учитывалось.

На третьем этапе проявляется необходимость синхронного перемещения луча и электрода со средней скоростью 4 (рис. 3), что следует учитывать при назначении частоты сканирования луча в пределах зоны Нл подогрева детали и принимать ее как режимный параметр комбинированного процесса.

IV этап включает получение на покрытии после электроэрозионного процесса (рис. 3) износостойкого твердого покрытия (рис. 4), получаемого лучом плазмы.

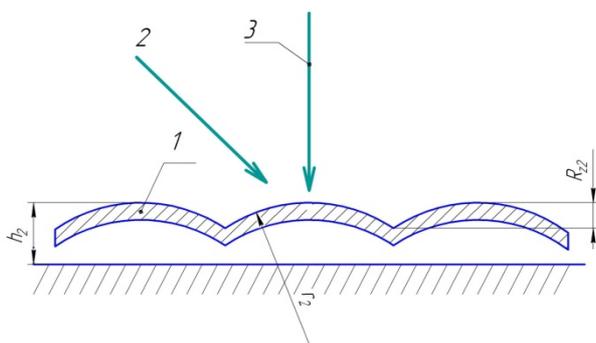


Рис. 4. Формирование износостойкого покрытия лучом плазмы. 1 – покрытие; 2 – плазмообразующий газ; 3 – луч плазмы;  $h_2$  – общая толщина покрытия;  $R_{z2}$  – высота неровностей;  $r_2$  – радиус капли

Здесь (рис. 4) формируется покрытие 1, толщина которого соизмерима с шероховатостью  $R_{z2}$ , что практически не изменяет параметры поверхностного слоя после нанесения покрытия электроэрозионным методом и получения износостойкого слоя. Это позволяет принять в расчетах  $h_2 = h_1$ ;  $r_2 =$

$r_1$ ;  $R_{z2} = R_{z1}$ , что упрощает моделирование комбинированного процесса без нарушения его физической сущности.

Экспериментально установлено [5-7], что шероховатость покрытия с износостойким слоем снижается по сравнению с предшествующим профилем. Это не противоречит полученному механизму, т.к. износостойкое покрытие утолщается в углублениях между каплями, что снижает высоту микронеровностей. Таким образом, формируется принципиально новый износостойкий слой, где даже после износа выступающих частей покрытия и раскрытия его неупрочненных частей эксплуатационные характеристики не ухудшаются, а скорее улучшаются, т.к. сохраняется практически начальная толщина упрочняющего покрытия ( $h_2$  на рис. 4). Выступившие после износа детали участки покрытия, обладающие меньшей твердостью, приобретают роль смазки, что снижает возможность «схватывания» контактных поверхностей, например шибберных запорных устройств, работающих при высоких контактных давлениях (перепад давлений перекачиваемых нефтепродуктов может достигать 15-20 МПа) и в условиях агрессивных химических воздействий сред.

#### Применение результатов для повышения эксплуатационных показателей изделий

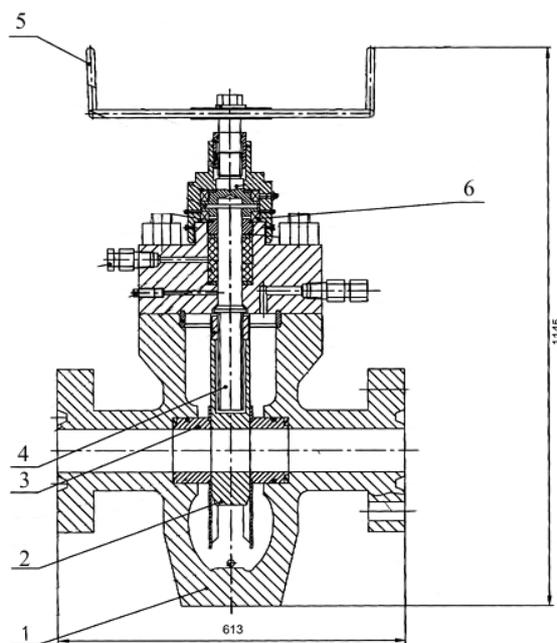


Рис. 5. Запорное устройство (затвор) для перекрытия течения нефтегазовых сред: 1 – корпус; 2 – шиббер; 3 – седло; 4 – шток; 5 – маховик; 6 – подшипник

На рис. 5 показано запорное устройство для трубопроводов по перекачке нефти, в том числе сернистой, где основные элементы (шибер и седло) выполнены из нержавеющей сплавов, но без покрытий даже они не обеспечивают работоспособность при заданном ресурсе изделия. Применение износостойкого комбинированного покрытия позволяет получить герметичные соединения с ресурсом безотказной работы в несколько раз превышающим установленное заказчиком значение (не менее 15 лет эксплуатации).

Проведены экспериментальные исследования (рис. 6, 7), показавшие широкие возможности снижения контактного трения (рис. 6) и возрастания износостойкости пар трения в узлах запорного устройства типа приведенного на рис. 5. Были проведены испытания образцов из стали 1Х18Н10Т. В качестве покрытия использовался чугун СЧ24. Зона контактного трения аналогична имеющейся в устройстве ( $0,33 \text{ см}^2$ ). Давление между контактными поверхностями - 160 Н. Скорость перемещения между контактными поверхностями 0,1 м/сек. Количество испытанных образцов - 6. Шероховатость исходной контактной поверхности  $R_z=5 \text{ мкм}$ . Испытания проводились в углеводородной среде.

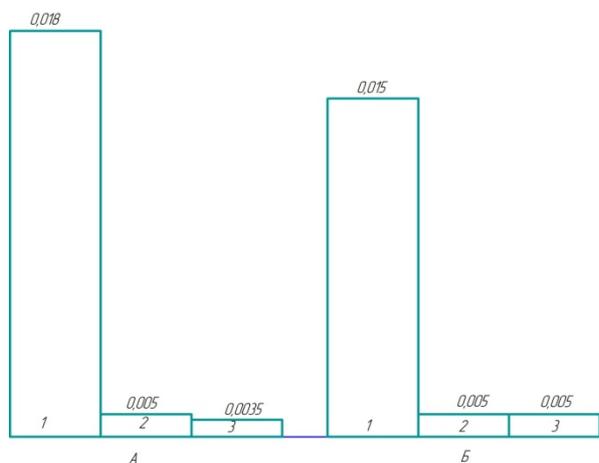


Рис. 6. Изменение коэффициента контактного трения в процессе эксплуатации запорного устройства (рис. 5) А – в начале процесса эксплуатации устройства; Б – после 7000 циклов включения-выключения. 1 - без покрытия контактирующих поверхностей; 2 - с электроэрозионным покрытием чугуном СЧ24 толщиной 0,2 мм; 3 - после плазменного упрочнения покрытия

На рис. 7 приведена информация о динамике износа шибера, контактирующего с седлом (рис. 5). По горизонтали отложены циклы двойных перемещений сопрягаемых

поверхностей при выполнении операций открытия-закрытия магистралей.

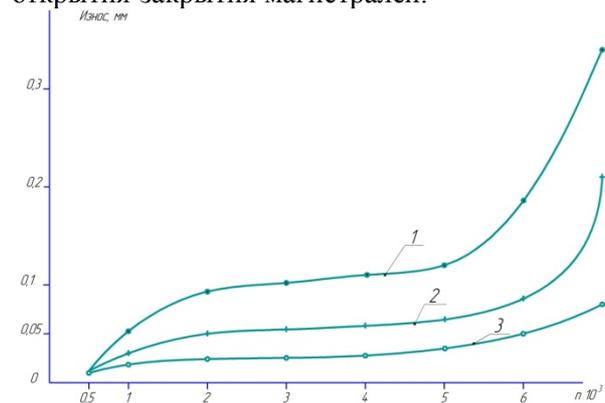


Рис. 7. Износ сопрягаемых поверхностей покрытий 1 - без покрытия контактирующих поверхностей; 2 - с электроэрозионным покрытием чугуном СЧ24 толщиной 0,2 мм; 3 - после плазменного упрочнения покрытия

Анализ рис. 6 и 7 показывает, что нанесение комбинированных покрытий дает значительное повышение эксплуатационных характеристик узлов трения. Так, при отсутствии плазменного слоя трение (по сравнению с испытанием покрытия без упрочнения) изменяется незначительно, но износостойкость (рис. 7) изделий после покрытия и плазменного упрочнения возрастает относительно исходного состояния (1 на рис. 7) до 2,5 раз, что оправдывает необходимость в дополнительных затратах на нанесение и плазменное упрочнение покрытия для повышения его износостойкости.

## Заключение

Рассмотрен комбинированный процесс нанесения износостойких покрытий при одновременном воздействии тепловых потоков от электроэрозионного разряда и лучевой энергии от действия плазмы. Показано, что ввиду кратковременности процесса формирования капли и упрочняющего покрытия механизм достижения на нем требуемых эксплуатационных свойств может рассматриваться как совмещение явлений последовательного теплового воздействия, где плазменный нагрев способствует лучшему растеканию капли и повышению качества поверхностного слоя. Это снижает контактное трение, способствует росту износостойкости пар трения в изделиях и служит научной базой для разработки новых способов [8; 9] нанесения покрытий с особыми эксплуатационными свойствами [10].

#### Литература

1. А.с. 1484518 СССР, В 23 Н 9/00. Способ электроэрозионного легирования / Ю. И. Манохин, Б. С. Никешин, В. Н. Терехин и др., Кузбасский политехнический институт.- 4265624/31-08 ; заявл. 22.06.1987 ; опубл. 07.06.1989, Открытия. Изобретения, Бюл. №21.
2. А.с. 1509205 СССР, В 23 Н 9/00. Устройство для электроэрозионного легирования / В. С. Тарасов. – 4206597/25-08; заявл. 06.03.1987; опубл. 23.09.1989, Открытия. Изобретения, Бюл. №35.
3. Meyer U. Mechanical Plating. Die Entwicklung des Ferfarens / U. Meyer // Galvanotechnik. - 1982. -V.73. - P. 994-996.
4. Brooks A. Mechanical Plating / A. Brooks // Metal Finishing. – 1985. - V.81. - № 8 - P.53-57.
5. Кадырметов А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров: монография / А.М. Кадырметов. - Воронеж: Научная книга, 2013. -260 с.
6. Бутенко В.И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В.И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. - 367 с.
7. Бутовский М.Э. Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Ч. 1: Электроэрозионное упрочнение. Техника и технология: учеб. пособие / М.Э. Бутовский. - М.: ИКФ «Каталог», 1998. - 340 с.
8. Пат. 2318637 Российская Федерация, В23Н 5/00. Способ электроэрозионного восстановления чугуновых деталей / В. П. Смоленцев и др., ГОУВПО "ВГТУ". – 2006113860 ; заявл. 24.04.2006 ; опубл. 10.03.2008, Бюл. №7.
9. Пат. 2396153 Российская Федерация, В23Н 9/00 (2006.01). Способ электроэрозионного восстановления детали из стали или чугуна / В. П. Смоленцев, А. В.Бондарь, А. Н. Некрасов, Воронежский механический завод - филиал ФГУП "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева". – 2008120420; заявл. 22.05.2008; опубл. 10.08.10, Бюл. №22.
10. Сафонов С.В. Модификация поверхностного слоя металлических изделий / С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2015. – Т.10. - №2. - С.19-26.

Воронежский государственный технический университет

## MECHANISM AND PROCESSES OF COMBINED COATING

**M.V. Kondrat'ev<sup>1</sup>, E.V. Smolentsev<sup>2</sup>, V.P. Smolentsev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [540520@mail.ru](mailto:540520@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [Vsmolen@inbox.ru](mailto:Vsmolen@inbox.ru)

The effectiveness of intensification of the process of electroerosive treatment by heating the place of discharge is shown. In a combined process, a plasma beam turned out to be an effective source of thermal energy, so it is suggested to irradiate the surface of a part before coating, giving the beam oscillating motion in the direction of supply of the tool electrode. The requirements for coatings are given: structure, etc. The main factors, influencing the course of the coating mechanism, are taken into account: the electroerosion and plasma process conditions, the fluidity of the electrode material.

The principal difference between the combined process and the previously used process of successive, separated by time coating is given. This allows to save the total thermal energy of the coating with minimal losses and to reduce the temperature gradients that cause internal stresses and cracking in the coating. Therefore, in order to obtain a high-quality coating when considering the mechanism and processes of combined treatment, the displacement of the plasma beam at the stage of application of the reinforcing layer relative to the tool electrode should be minimal, but in all cases the last layer should be applied to the coating obtained by the electro-erosion method before its cooling due to heat transfer

Key words: heating, coating, electroerosion hardening, plasma

### References

1. Mansokhin Ju.I., Nikeshin B.S., V.V. Terekhin "Method of electroerosive alloying" ("Sposob elektroerozionnogo legirovaniya"), author's certificate no. 1434513, USSR, 1989.
2. Tarasov V.S. "Device for electroerosive alloying" ("Ustroistvo dlya elektroerozionnogo legirovaniya"), author's certificate no. 1509205, USSR, 1989
3. Meyer U. "Mechanical Plating", *Die Entwicklung des Ferfarens*, Galvanotechnik, 1982, vol.73, pp. 994-996.

4. Brooks A. "Mechanical Plating", *Metal Finishing*, 1985, vol.81, no. 8, pp. 53-57.
5. Kadyrmetov A.M. "Control of technological support of plasma coating processes in the mode of electric parameters modulation" ("Upravlenie tekhnologicheskim obespecheniem protsessov plazmennogo naneseniya pokrytiy v rezhime modulyatsii elektricheskikh parametrov"), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2013, 260 p.
6. Butenko V.I. "Structure and properties of the surface layer of tribosystem components" ("Struktura i svoystva poverkhnostnogo sloya detalei tribosistem"), Taganrog, Publ. TTI SFU, 2012, 367 p.
7. Butovskiy M.E. "Tutorial: Coating and hardening of materials with concentrated energy flows. Part 1: Electroerosion hardening. Technic and Technology" ("Nanesenie pokrytiy i uprochnenie materialov kontsentririvannymi potokami energii. Chast' 1: Elektroerozionnoe uprochnenie. Tekhnika i tekhnologiya"), Moscow, IKF «Katalog», 1998, 340 p.
8. Smolentsev V. P. "Method for electroerosion recovery of cast iron parts" ("Sposob elektroerozionnogo vosstanovleniya chugunnykh detaley"), Patent RF no 2318637, 2008.
9. Smolentsev V.P., Bondar' A.V., Nekrasov A.N. "Method for electroerosion recovery of a steel or cast iron part" ("Sposob elektroerozionnogo vosstanovleniya detail iz stali ili chuguna"), Patent RF 2396153, 2010.
10. Safonov S.V., Grigor'ev S.N., Smolentsev V.P. "Modification of the surface layer of metal elements", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, Voronezh, vol. 10, no. 2, 2015, pp. 19-26.

## ОСОБЕННОСТИ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ ГОФРОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ (ТРД)

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

В статье рассмотрен новый тип звукопоглощающих гофровых конструкций (ЗПК). Особенность данной конструкции заключается в том, что в пространство между гофрами помещают гофрированную вставку, которая обеспечивает повышение акустической эффективности, что подтверждается испытаниями образцов гофровой панели на стенде «канал с потоком» во ФГУП «ЦАГИ».

Рассмотрены основные материалы, применяемые для изготовления гофровых панелей, проведены механические испытания листовых материалов. В статье представлен технологический процесс изготовления гофровой конструкции, при этом рассмотрен этап перфорирования заготовок, который осуществляется на прессе с ЧПУ. Разработана конструкция штампа, позволяющая осуществлять формообразование гофров без утонения материала заготовки. Приведена схема процесса сварки обшивок с гофровым наполнителем. Приведены параметры гофрового наполнителя и вставки.

Выполнены расчеты плотности гофрового наполнителя, определены весовые параметры гофровой панели со вставкой для различных материалов. Определены предельные значения напряжений сжатия для исследуемых материалов.

Методом конечных элементов проведены исследования образцов гофровой панели, в результате которых определен характер потери устойчивости гофров и наиболее нагруженные элементы конструкции. Полученные данные представлены в виде картины распределения напряжений по поверхности гофрового наполнителя

Ключевые слова: гофровый наполнитель, вставка, контактная сварка

В конструкциях летательных аппаратов широкое применение находят гофровые конструкции [1].

Особый интерес представляют их применение в качестве звукопоглощающих конструкций в ТРД.

Так, для осесимметричных оболочек конической формы для горячей части двигателя целесообразно применять звукопоглощающие конструкции (ЗПК) с гофровым наполнителем.

Применение сотовых конструкций при изготовлении осесимметричных оболочек вызывает при формообразовании появление браковочных признаков в виде искажения граней ячеек. Это приводит к снижению ресурсных характеристик панелей, выполненных с сотовым наполнителем, а также непредсказуемому изменению эффекта шумоглушения.

Конструкция с гофровым наполнителем состоит из двух обшивок, одна из которых перфорированная, и гофрового наполнителя (рис. 1).

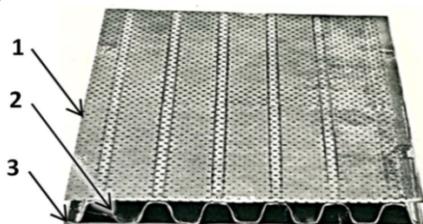


Рис. 1. Конструкция с гофровым наполнителем: 1 – перфорированная обшивка; 2 – гофровый наполнитель; 3 – сплошная обшивка

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

Основные материалы, применяемые для изготовления гофровых панелей – нержавеющие стали (12Х18Н10Т), титановые сплавы (ОТ4-1, ВТ1-0); алюминиевые сплавы (Д16АТ).

Проведены механические испытания образцов листовых материалов (табл. 1). Образцы были изготовлены по ГОСТ 1497.

Таблица 1

Материал	$\delta_r$ , мм	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , МПа
Д16АТ	0,3	402	265	13	68000
ОТ4-1	0,3	760	461	20	12000
12Х18Н10Т	0,3	648	275	37	19800

Гофровые панели обладают:

1. высокой степенью жесткости;
2. монолитностью конструкции;
3. термостойкостью;
4. высоким сопротивлением акустическим усталостным напряжениям;
5. акустической эффективностью.

Акустическая эффективность гофровой панели соответствует по звукопоглощению сотовой конструкции, но уступает ей по весовым характеристикам.

С целью повышения акустической эффективности ЗПК разработан новый тип гофровой конструкции [2], в которой в зону между гофрами помещают гофрированную формы перфорированные вставки (рис. 2).

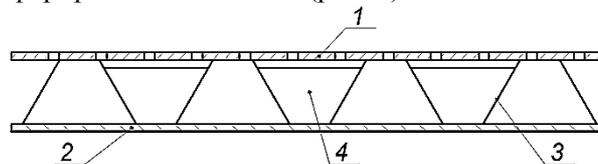


Рис. 2. ЗПК с гофровым наполнителем и вставками: 1 – перфорированная обшивка; 2 – сплошная обшивка; 3 – гофровый наполнитель; 4 – гофровая вставка

Наличие вставки создает дополнительный эффект снижения шума за счет явления резонансного гашения звуковых волн, а также возникающей интерференции звуковых волн, прошедших через перфорированную обшивку.

Во ФГУП «ЦАГИ» на установке «канал с потоком» были проведены акустические испытания, соответствующие полетным условиям. Выявлено, что разработанная конструкция по эффективности превышает существующую однослойную гофрированную конструкцию до 5 EPN дБ, что подтверждает перспективность ее применения в конструкции турбореактивных двигателей.

Разработан технологический процесс изготовления панели с гофрированным наполнителем со вставками.

Схема технологического процесса получения гофрированной панели представлена на рис. 3.

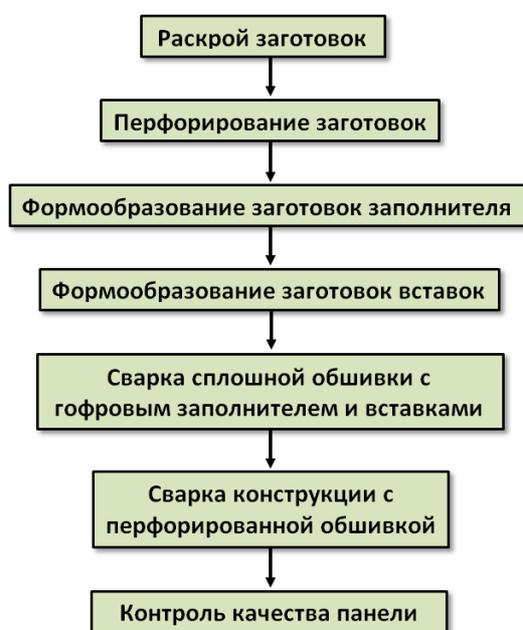


Рис. 3

Перфорирование заготовок осуществляли на дыропробивном прессе с ЧПУ. Диаметр получаемых отверстий составляет 1,1 мм [3].

Процесс формообразования наполнителя и вставок осуществляют на гидравлическом или кривошипно-шатунном прессе.

Схема штампа, разработанная для данного процесса формообразования, приведена на рис. 4. При формообразовании гофра листовая заготовка с помощью пуансона 2 получает форму гофра без утонения материала. Пуансон 5 осуществляет окончательную калибровку гофра.

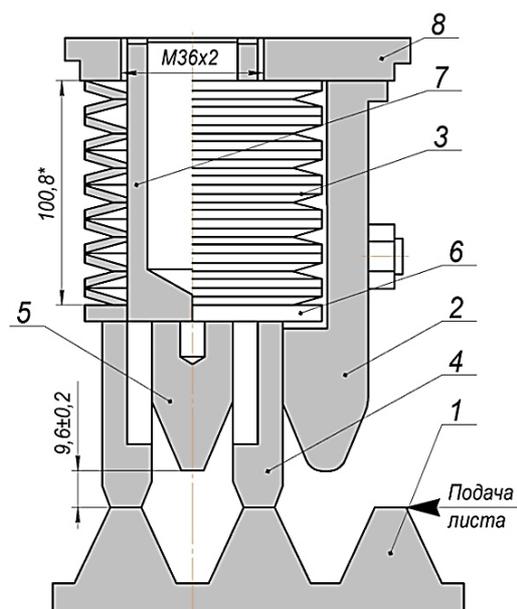


Рис. 4. Штамп для изготовления гофрированного наполнителя и вставки: 1 – матрица; 2 – калибровочный пуансон; 3 – пружина; 4 – прижим; 5 – формовочный пуансон; 6 – опора; 7 – направляющая втулка; 8 – нажимная опора

Такой метод формообразования позволяет получать гофрированный наполнитель с высокой точностью, что необходимо для последующего процесса сварки обшивок с наполнителем.

Процесс соединения гофрированного наполнителя с обшивками осуществляется контактной сваркой.

Схема сварки панели приведена на рис. 5.

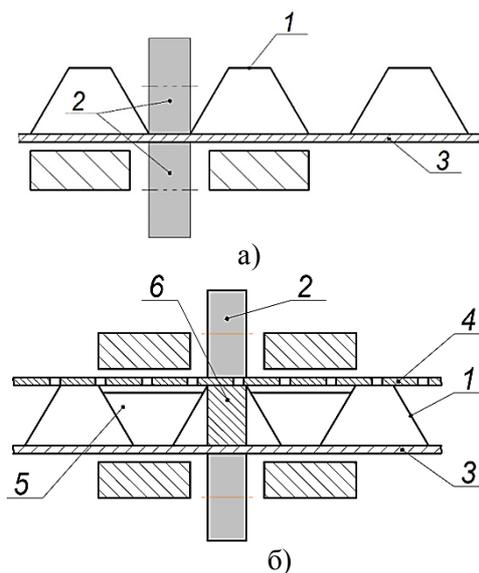


Рис. 5. а) – Сварка гофрированного наполнителя и вставок со сплошной обшивкой; б) – Сварка гофрированного наполнителя с перфорированной обшивкой  
1 – гофрированный наполнитель; 2 – ролик; 3 – сплошная обшивка; 4 – перфорированная обшивка; 5 – вставка; 6 – стержень

Параметры гофрированного наполнителя и вставок показаны на рис. 6 и в табл. 2.

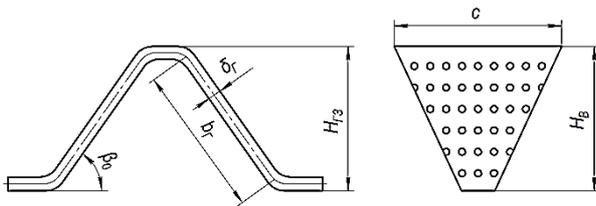


Рис. 6

Таблица 2

№ п/п	Элементы гофровой панели	Толщина $\delta_0, \delta_r, \delta_b$ , мм	Высота $H_{гз}, H_b$ , мм	Угол наклона $\beta_0, \beta_r$ , град	Длина $b_r, b_b$ , мм	Коэффициент формы гофра $K_\beta$
1	Обшивка	0,5	-	-	-	-
2	Заполнитель	0,3	30	55	37	0,58
3	Вставка	0,1	26	35	48	0,2

Плотность гофрового заполнителя определяется по зависимости (1) [4]:

$$\rho_{гз} = \left( \frac{b_r}{H_{гз}} + K_\beta \right) \cdot \frac{\delta_r}{b_r} \rho_m \quad (1)$$

Подставив в приведенную зависимость значения из табл. 2, получим  $\rho_{гз}$  для:

$$12X18N10T \text{ } 92 \text{ кг/м}^3; \text{ OT4-1 } 49 \text{ кг/м}^3; \text{ Д16 } 31 \text{ кг/м}^3$$

Проведен расчет на прочность заполнителя и гофровой панели. Прочность стенок гофра при поперечном сжатии определяется (2):

$$\sigma_{кр \text{ сж } г} = K_\beta \left( \frac{\delta_r}{b_r} \right)^2 E_m \quad (2)$$

где  $E_m$  - модуль упругости материала гофра.

Подставив значения из табл. 1, 2, получим  $\sigma_{кр \text{ сж } г}$  для:

$$12X18N10T \text{ } 7,3 \text{ МПа}; \text{ OT4-1 } 4,5 \text{ МПа}; \text{ Д16 } 2,6 \text{ МПа}$$

Вставка не оказывает влияния на прочность панели при испытании на сжатие.

Методом конечных элементов проведены исследования параметров прочности, которые необходимо учитывать при формообразовании панелей на заданный радиус кривизны. На рис. 7, 8 представлены результаты расчета для панели из Д16АТ - форма потери устойчивости гофра при поперечном сжатии образца, трехслойной панели, распределение напряжений по элементам конструкции. Результаты анализа математической модели соответствуют расчетам панели, полученным аналитическим методом.

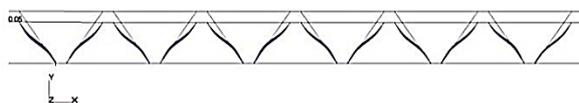


Рис. 7. Форма потери устойчивости

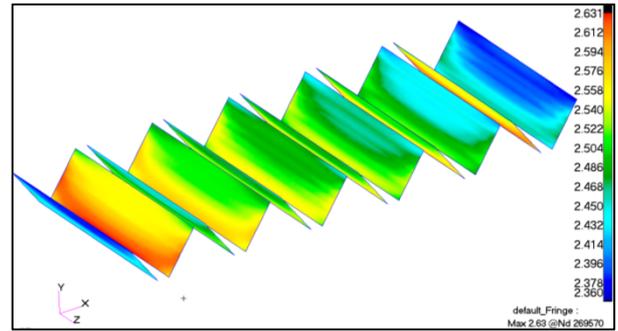


Рис. 8. Распределение напряжений по заполнителю (обшивки скрыты)

Проведен расчет весовых параметров (3) гофровых панелей размером  $1 \text{ м}^2$  для материалов 12X18N10T, OT4-1 и Д16Т (рис. 9, табл. 3).

$$P_{гп} = P_{го} + P_{гз} + P_{гв} + P_{гпр}, \quad (3)$$

где  $P_{го}$  - вес сплошной обшивки;  
 $P_{гз}$  - вес гофрового заполнителя;  
 $P_{гв}$  - вес гофровой вставки;  
 $P_{гпр}$  - вес перфорированной обшивки.

Вес гофровой панели из 12X18N10T составляет 10,9 кг, из OT4-1 - 5,8 кг, из Д16Т - 3,7 кг.

Таблица 3

№ п/п	Материал	$P_{го}, \Gamma$	$P_{гз}, \Gamma$	$P_{гв}, \Gamma$	$P_{гпр}, \Gamma$	$P_{гп}, \Gamma$
1	12X18N10T	3950	2939	762	3160	10811
2	OT4-1	2100	1563	405	1678	5746
3	Д16Т	1350	1003	265	1080	3698

Результаты расчета приведены на рис. 9.

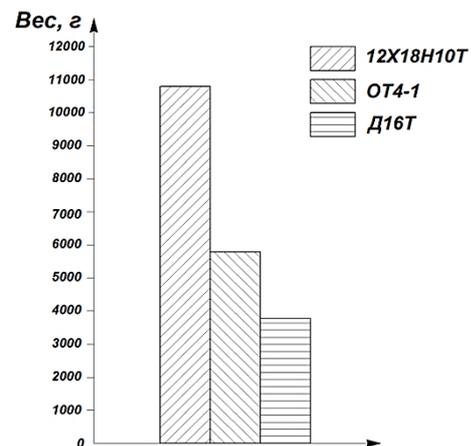


Рис. 9

Наличие вставок увеличивает вес гофрированной панели на 7%. По весовым параметрам целесообразно применять панель из Д16Т. Однако, учитывая термостойкость данного материала, эти панели рекомендованы к применению в холодной части двигателя и канале воздухозаборника. Гофровые панели из 12X18N10T и OT4-1 целесообразно применять в горячей части двигателя с учетом их термостойкости.

## Выводы

1. Разработан новый тип конструкции гофровой панели со вставкой.
2. Проведены механические испытания образцов листовых материалов.
3. Разработан технологический процесс изготовления гофровой конструкции со вставкой.
4. Отражена оценка весовых параметров гофровой конструкции со вставкой.
5. Методом конечных элементов определены наиболее нагруженные участки испытываемого образца при приложении сжимающей нагрузки, позволяющие учитывать ее при разработке процесса формообразования гофровой панели на заданный радиус кривизны.

## Литература

1. Молод, М.В. Получение металлических гофрированных конструкций для панелей летательных аппаратов/ М.В. Молод, Д.В. Аралов, В.И. Максименков// Авиакосмические технологии «АКТ-2008»: тез. IX Всерос. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. – Воронеж: ВГТУ, 2008. – С.8-10.
2. В.И. Максименков, В.А. Тарасов, В.П. Дорошков «Звукопоглощающая панель» Патент 2249258 27.03.2003 ФГУП НИИ АСПК.
3. Молод М.В. Определение параметров перфорированных обшивок при изготовлении сотовых панелей звукопоглощающих конструкций/ М.В. Молод //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева.- 2014.-4.4.-№5(47)- С. 56-62.
4. Панин, В.Ф. Конструкции с сотовым наполнителем. Справочник / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.

Воронежский государственный технический университет

Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж

### ACOUSTIC CORRUGATED HONEYCOMB SANDWICH FEATURES FOR TURBOJET ENGINE HOT SECTION (TJE)

M.V. Molod<sup>1</sup>, V.I. Maksimenkov<sup>2</sup>, V.I. Fedoseev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: molodmv@yandex.ru

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

e-mail: [maksimenkov.v.i@mail.ru](mailto:maksimenkov.v.i@mail.ru)

<sup>3</sup>Design Engineer, Public company "Corporation "Irkut"

e-mail: [vladislav.f@inbox.ru](mailto:vladislav.f@inbox.ru)

The article considers a new type of acoustic corrugated honeycomb structures (ACHS). The peculiarity of such structure is that a corrugated insert is placed in the space between the corrugations, which provides an increase in acoustic efficiency, which is confirmed by testing the samples of a corrugated panel at the "channel with flow" stand at Central Aerohydrodynamic Institute.

The main materials used for manufacturing corrugated panels are considered, mechanical testing of sheet materials is carried out. The article presents the technological process of manufacturing a corrugated structure, also the stage of perforation of blanks, which is performed on a CNC press, is considered. The design of the stamp, allowing to carry out shaping of corrugations without thinning the material of a workpiece, is developed. A scheme of the welding process for coverings with corrugated aggregate is given. Parameters of the corrugated aggregate and insert are given.

The density of corrugated aggregate is calculated, the weight parameters of the corrugated panel with an insert for various materials are determined. The limiting values of compressive stresses for the materials under study are determined.

The finite element method was used to study the samples of the corrugated panel, the character of the loss of stability of the corrugations and the most loaded structural elements were determined as a result. The obtained data are presented in the form of a pattern of stress distribution over the surface of corrugated aggregate

Key words: corrugated honeycomb, insert, seam resistance welding

#### References

1. Molod M.V., Aralov D.V., Maksimenkov V.I. "Metal corrugated honeycomb sandwich realization for aircraft panels", *Proc. of IX All-Russian scientific and technical conference and school of young scientists, graduates and students "Aerospace Technology-2008"*, (Авиакосмические технологии «АКТ-2008»: Тезисы IX Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов), Voronezh, 2008, pp. 8-10
2. Maksimenkov V.I., Tarasov V.A., Doroshkov V.P. "Acoustic honeycomb sandwich" ("Звукопоглощающая панель"), Patent no. 2249258, 2003
3. Molod M.V. "Determination of the parameters of perforated casings in the manufacture of honeycomb panels of sound-absorbing structures" ("Определение параметров перфорированных обшивок при изготовлении сотовых панелей звукопоглощающих конструкций"), *VESTNIK of Samara University*, 2014, vol. 4.4., no. 5(47), pp. 56-62
4. Panin V.F., Gladkov Yu.A. "Construction with honeycomb sandwich" ("Конструкция с сотовым наполнителем") Technical directory, Moscow, Mashinostroenie, 1991, 272 p.

## РАЗРАБОТКА БАЗ ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ САПР БЕЗДЕФЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

В.В. Елисеев, А.М. Гольцев, Л.В. Хливненко, Ю.Б. Рукин

Излагается структура баз данных материалов современных САПР технологических операций листовой штамповки, которые позволяют предсказывать различные браковочные признаки деформационного типа: разрывы, потерю устойчивости в форме образования шейки, рекристаллизационные превращения и линии Людерса. Описывается математическая модель материала, которая используется при создании баз данных САПР ТО и управляющих программ ЧПУ станков при холодной или горячей многопереходной штамповке листовых и профильных деталей с промежуточной термообработкой.

Предельные деформации материала заготовки, по которым проектируется технология гибки, обтяжки, вытяжки резиной и по жесткому пуансону, определяются оригинальными методами измерения геометрии трещин в области разрушения при различных деформированных состояниях заготовки. В процессе холодного пластического формоизменения заготовки и промежуточной термообработки учитываются как накопленная деформация, так и восстановление запаса пластичности в процессе промежуточных термообработок. Параметры этой модели определяются экспериментально.

Предложена методика учета естественного старения материала заготовки с помощью функций деформационного упрочнения и длительности старения термоупрочняемых сплавов, что позволяет автоматически корректировать управляющую программу процесса в случае задержки штамповки по техническим причинам. В результате разбиения технологического процесса на переходы чередованием холодной деформации с промежуточной термообработкой обеспечивается бездефектное изготовление деталей

Ключевые слова: базы данных материалов, механические технологические испытания

### Введение

Благодаря разработанным в последнее десятилетие новым моделям материалов, в первую очередь – моделям разрушения, конечно-элементное моделирование стало эффективным инструментом проектирования более безопасных, экономичных и экологичных конструкций. Особенно широкое применение конечно-элементное проектирование нашло в автомобилестроении.

Важнейшая входная информация такого проектирования сконцентрирована в карте материала, содержащей всё возрастающее число параметров материала. Эти параметры определяются на основе широкого круга испытаний и могут быть разбиты на три группы: параметры поверхности текучести (нагрузки), параметры упрочнения и параметры разрушения.

Создаваемые базы данных или карты материалов используются также в конечно-элементных пакетах для моделирования аварийного разрушения деталей из листа и профиля различных автомобильных и авиационных конструкций. Полученные данные используют-

ся на стадии проектирования изделий различного назначения для повышения надежности эксплуатации, увеличения ресурса пластичности (эксплуатации) деталей и машин.

Разработанные базы данных используются в САПР в листовой штамповке и при создании управляющих программ для прессового оборудования с ЧПУ, а также для корректировки формообразующей оснастки в целях повышения точности геометрии деталей на машиностроительных предприятиях, в КБ и НИИ авиационной промышленности. При этом повышается точность формообразуемых деталей, снижается процент брака путем создания бездефектной технологии на основе надежного предсказания появления браковочных признаков различного типа, сокращается срок технологической подготовки производства изделий.

Целью исследования, описанного в данной работе, является разработка методики построения баз данных материалов САПР и создания на этой основе маршрутной технологии изготовления деталей, отличающейся возможностью выявления технологических дефектов на этапе проектирования.

### Моделирование ортотропно анизотропного листового материала

Модель ортотропно анизотропного листового материала, используемого при проектировании операций листовой штамповки с промежуточной термообработкой [1], описывается

Елисеев Владимир Васильевич – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: evv52@bk.ru

Гольцев Александр Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: amg57@bk.ru

Хливненко Любовь Владимировна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: hlivnenko\_lv@mail.ru

Рукин Юрий Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: y.b.rukin@gmail.com

для случая плоского напряженного состояния следующими уравнениями состояния:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_x &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} [(1-a_x)\sigma_x - a_z\sigma_y]; \\ d\varepsilon_y &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} [(1-a_y)\sigma_y - a_z\sigma_x]; \\ d\varepsilon_z &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (a_y\sigma_x + a_x\sigma_y); \\ d\varepsilon_{xy} &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} a_{xy}\sigma_{xy}; \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, \dots$  - приращения компонент тензора деформаций в системе координат, оси которой совмещены с главными осями анизотропии (при этом ось  $x$  совпадает с направлением прокатки);  $a_x, a_y, \dots$  - параметры анизотропии;  $d\varepsilon_i$  - приращение эквивалентной деформации;  $\sigma_i$  - эквивалентное напряжение;  $\sigma_x, \sigma_y, \dots$  - компоненты тензора напряжений.

Кривая течения, которой задается функциональная связь интенсивностей напряжения и деформации материала в пластической области, аппроксимируется уравнением Свифта:

$$\sigma_i = A(\varepsilon_i + \varepsilon_0)^n, \quad (2)$$

где  $A$  - коэффициент размерности,  $n$  - параметр упрочнения,  $\varepsilon_0$  - добавочная деформация. Эти коэффициенты также являются характеристиками материала. Кривая течения в эквивалентных координатах строится по результатам испытаний на одноосное растяжение [1].

Параметры анизотропии в (1) обычно выражают через параметры Лэнкфорда [2] по формулам:

$$\left. \begin{aligned} a_x &= r_0 / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_y &= r_{90} / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_z &= r_0 r_{90} / (r_0 + r_{90} + r_0 r_{90}); \\ a_{xy} &= \frac{(1 + 2r_{45})(r_0 + r_{90})}{2(r_0 + r_{90} + r_0 r_{90})}. \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $r_0, r_{90}, r_{45}$  - параметры Лэнкфорда соответственно в направлении прокатки, поперек и под углом  $45^\circ$  к прокатке. Параметры определяют также по результатам испытаний на растяжение [1].

Таким образом, поведение листового анизотропного материала в большинстве операций листовой штамповки описывается параметрами  $r_0, r_{90}, r_{45}$  и константами  $A, n, \varepsilon_0$  уравнения кривой течения (2).

### Моделирование естественного старения материала заготовки

Рассмотрим часто встречающийся на практике случай изготовления детали из листа последовательным чередованием холодного пластической деформации с термообработкой.

Проведенные на различных сталях и алюминевых сплавах опыты показали, что кривые течения материала на втором переходе лежат ниже исходной кривой течения [1]. Это означает, что параметр упрочнения материала в результате термообработки релаксирует. В то же время предел текучести предварительно деформированного материала повышается. Следовательно, материал «помнит» частично предшествующую термообработку.

Предполагается, что при промежуточной термообработке параметр упрочнения  $q$  релаксирует со скоростью, пропорциональной величине параметра. Имеем

$$q = \alpha q_{(1)}, \quad (4)$$

где коэффициент влияния промежуточной термообработки  $\alpha$  меняется от 1 при полной релаксации параметра упрочнения до 0 при отсутствии промежуточной термообработки между переходами;  $q_{(1)}$  - величина параметра упрочнения в конце первого перехода. Коэффициент  $\alpha$  определяется по результатам растяжения образцов в два перехода с промежуточной термообработкой [1].

Так как многопереходный процесс отличается от монотонного, то при его описании предлагается использовать модель материала с анизотропным упрочнением, в котором эквивалентное напряжение  $\sigma$  связано с напряжением при одноосном растяжении  $\sigma_0$  соотношением

$$\sigma = \frac{1 + \beta(q)}{1 + \beta(\Delta q)} \sigma_i(\varepsilon_i), \quad (5)$$

где  $\Delta q$  - приращение параметра упрочнения на втором переходе;  $\beta(q)$  - параметр эффекта Баушингера [3].

Функция  $\beta(\varepsilon_{(1)})$  достаточно хорошо описывается выражением:

$$\beta = \beta_m - (\beta_m - \beta_0) \exp(-C\varepsilon_{(1)}), \quad (6)$$

где  $\beta_0, \beta_m, C$  - параметры аппроксимации.

Многие алюминиевые сплавы в состоянии после закалки подвергаются естественному старению, что сказывается как на их свойствах, так и на точности определения напряженно-деформированного состояния заготовки.

Наиболее интенсивно эти свойства меняются в течение первых 2-4 часов естественного старения [4]. Для учета влияния длительности естественного старения на кривую течения, описанную уравнением (2) предложено использовать функцию вида

$$\sigma(e, t) = \sigma_0(e) f(e, t), \quad (7)$$

где  $\sigma_0(e)$  - уравнение стационарной кривой течения, полученной на закаленном сплаве после 2-4 часов естественного старения;  $f(e, t)$  - функция старения.

Так как влияние естественного старения со временем ослабевает и функция  $f(e, t)$  с ростом  $t$  стремится к 1, то функция старения может быть описана выражением

$$f(e, t) = 1 - \theta * \exp(-ke - \lambda t), \quad (8)$$

где параметры  $\theta, k, \lambda$  определяют по результатам испытаний на растяжение термообработанного сплава с различной длительностью естественного старения [4]. Учет длительности естественного старения в соответствующих моделях материала осуществляется подстановкой (8) в уравнение кривой течения (7).

Оценку вероятности появления технологических дефектов в проектируемом процессе производят по предельным деформационным характеристикам материала: предельной деформации устойчивости  $\varepsilon^*$ , предшествующей разрыву заготовки, критической деформации роста зерна  $\varepsilon_{cr}$  и деформации, при которой появляются линии Людерса  $\varepsilon_L$ .

Предельная деформация устойчивости определяется по диаграмме предельных деформаций в координатах: предельная деформация  $\varepsilon^*$ , равная наибольшей главной логарифмической деформации в плоскости листа  $e_1$ ; параметр вида деформированного состояния  $p$ , равный отношению главных деформаций:

$$p = e_2/e_1. \quad (9)$$

Левая ветвь диаграммы предельных деформаций обычно близка к прямой и для ее построения используют испытания на одноосное растяжение и на растяжение в условия плоской деформации.

Для построения правой ветви диаграммы используют результаты испытаний на растяжение в условиях плоской деформации и испытаний на вытяжку полусферическим пуансоном круглых образцов в условиях равномерного двухосного растяжения.

Отметим, что левая ветвь диаграммы используется при тестировании операций обтяжки из листа, а правая - операций вытяжки эластичной средой.

В случае многопереходного деформирования предельные деформации на  $i$ -м переходе с учетом описанной ранее релаксационной модели (4), (5) определяют по формуле:

$$\varepsilon_{(i)}^* = \varepsilon^* - \sum_{k=1}^{i-1} \varepsilon_{(k)} \prod_{j=k}^{i-1} \alpha_{(j)}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon^*$  - предельная деформация устойчивости предварительно недеформированного материала, обработанного по режиму промежуточной термообработки, предшествующей  $i$ -му переходу [1].

Критические деформации недопустимого роста зерна и появления линий скольжения также определяют расчетом (9) с использованием диаграмм рекристаллизации, которые получают испытаниями на одноосное растяжение в несколько переходов с промежуточной термообработкой [1].

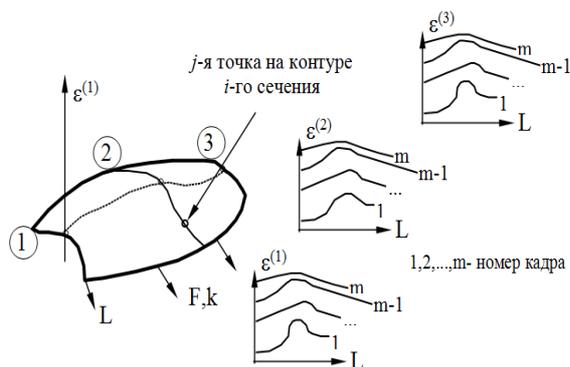
### Пример разработки технологии многопереходной штамповки оболочки двойной кривизны

В качестве практического применения описанных выше методик было проведено проектирование многопереходной операции обтяжки крупногабаритной обшивки двойной кривизны с промежуточной термообработкой на прессе с программным управлением.

Обшивка изготавливалась в три перехода из анизотропного алюминиевого сплава 2024 с двумя промежуточными термообработками. Разбиение на переходы производилось по результатам предварительного расчета напряженно-деформированного состояния заготовки в выбранных сечениях в процессе обтяжки.

Предварительно определялись предельные деформационные характеристики материала обшивки.

Как показано на рисунке, процесс разбиения на переходы состоял в сравнении предельных деформаций материала в каждой точке выбранных сечений (1), (2), (3) в конкретные моменты процесса с предельными деформациями всех видов, описанных выше. Если расчетные деформации в  $j$ -й точке  $i$ -го сечения оболочки в  $m$ -й момент (кадр) моделирования процесса превосходили предельные деформации материала, то процесс останавливался, и проводилась промежуточная термообработка.



Графическая иллюстрация маршрутной технологии многопереходной штамповки оболочки двойной кривизны

Количество переходов в процессе увеличивалось до тех пор, пока приращения деформаций на любом переходе, в любой точке сечений оболочки не стали меньше предельных.

### Результаты и их обсуждение

1. Для моделирования процессов формообразования деталей из листа с применением промежуточной термообработки был определен набор параметров материала, значения которых получены как в результате стандартных, так и оригинальных испытаний.

2. Многолетние исследования различных марок сталей, алюминиевых, алюминиево-литиевых и титановых сплавов, широко приме-

няемых в авиационной и автомобильной промышленности, позволили авторскому коллективу создать обширную базу данных материалов. Достоверность полученных результатов подтверждает успешное их применение различными машиностроительными предприятиями, КБ и НИИ для проектирования бездефектных технологических операций формообразования деталей из листа и профиля с помощью САПР.

3. Стандартные способы разработки маршрутной технологии многопереходных процессов листовой штамповки обычно заключается в использовании наибольшей пластичности материала на каждом переходе, что, во-первых, не позволяет предсказать появление браковочных признаков деформационного типа в заготовке, а во-вторых, снижает ресурс пластичности и, следовательно, эксплуатационные свойства формообразуемой детали.

Использование описанной в статье модели материала в САПР технологических операций позволяет разработать маршрутную технологию изготовления деталей из листа и, оценив на этапе проектирования вероятность появления технологических дефектов в процессе изготовления, создать бездефектную технологию конкретной операции листовой штамповки.

### Литература

1. Дель Г.Д. Модель материала при многопереходном деформировании с промежуточной термообработкой / Г.Д. Дель, В.В. Елисеев // Известия АН СССР. Металлы. - 1991. - №4. - С.171-174.
2. CAD system for the elastic-medium shaping of pipeline parts / G.D. Dell, V.V. Eliseev, E. Pesmenny, S.A. Voulman // Jour. Of Materials Processing Technology. - 1992. - Vol. 35. - pp.191-198.
3. Дель Г.Д. Экспериментальное исследование эффекта Баушингера анизотропных металлов / Г.Д. Дель, В.В. Елисеев, В.А. Шапиевская // Известия РАН. Механика твердого тела. - 2014. - №5. - С.99-106.
4. Елисеев В.В. Модель материала при многопереходном деформировании с промежуточной термообработкой и естественным старением / В.В. Елисеев, Е.П. Крупин // Известия РАН. Металлы. - 2006. - №4. - С.79-83.

Воронежский государственный технический университет

## DEVELOPMENT MATERIAL DATABASE FOR CAD SYSTEMS OF FAILUREFREE TECHNOLOGY OF SHEET STAMPING

V.V. Eliseev<sup>1</sup>, A.M. Gol'tsev<sup>2</sup>, L.V. Khlivnenko<sup>3</sup>, Yu.B. Rukin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: evv52@bk.ru

<sup>2</sup> PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,

e-mail: amg57@bk.ru

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

<sup>4</sup> PhD, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,  
e-mail: y.b.rukin@gmail.com

Material database structure of modern CAD systems of technological processes of sheet stamping is stated, which allows to predict different failures of deforming type: fracture, loss of stability in a form of neck generation, structural recrystallization and Luders lines appearance. The article describes a mathematical model of material that is used at creation of technological processes CAD systems' database and numerical program control for machines at cold and hot multitransition stamping of sheets and profiled elements with intermediate heat treatment.

The ultimate strain of work-piece material, that is used to develop technological processes of bending, stretch-wrap forming, draw-forming with rubber or with puncheon, is determined with original methods of cracks' geometry measurements in different strain states. At cold plastic formation and at intermediate heat treatment, both cumulative deformation and restoration of margin of plasticity are taken into account. The parameters of the model are obtained experimentally.

The article offers the routine for accounting natural aging of work-piece material with the help of the function of deforming hardening and ageing duration of thermo-hardened alloys. It allows to correct automatically the machine control program in case of stamping delay for technical reasons. Failures-free parts production is provided because of the subdivision of the technological process onto transitions where cold deformation follows interim heat treatment

Key words: material database, mechanical technological testing

### References

1. Del G.D., Eliseev V.V. "Material model at multitransition deformation with intermediate heat treatment", *Proceedings of the Academy of Sciences USSR. Metals. (Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metall.)*, 1991, no. 4, pp. 171-174.
2. Del G.D., Eliseev V.V., Pesmenny E., Voulman S.A. "CAD system for the elastic-medium shaping of pipe-line parts", *Jour. of Materials Processing Technology*, 1992, vol. 35, pp. 191-198.
3. Del G.D., Eliseev V.V., Shapievskaia V.A. "Experimental research Bauschinger's effect of anisotropic materials", *Proceedings of Russian Academy of Sciences. Mechanics of Solid Body. (Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Mekhanika Tverdogo Tela.)*, 2014, no. 5, pp.99-106.
4. Eliseev V.V., Krupin E.P. "Material model of multitransition deformation with intermediate heat treatment and natural aging", *Proceedings of the Academy of Sciences USSR. Metals. (Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metall.)*, 2006, no. 4, pp.79-83.

## ПРОЦЕСС ЭРОЗИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

**М.В. Кондратьев, Е.В. Смоленцев, В.П. Смоленцев**

В статье раскрыт механизм нанесения комбинированных эрозионно-лучевых плазменных покрытий, что дало возможность научно обоснованно представить физическую модель процесса, положенную в основу математического моделирования.

Для описания процедуры формирования покрытий предложен новый принцип разделения комбинированного процесса на логически развивающиеся последовательные этапы, с учетом которых удалось рассмотреть механизм как единый процесс.

Представлена математическая модель, учитывающая исходные и граничные особенности процессов при нанесении и упрочнении покрытий, что является базой для проектирования технологического процесса эрозионно-лучевого нанесения слоев с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Приведены экспериментальные исследования, подтвердившие правомерность модели комбинированного процесса, что служит основанием для разработки достоверных методик расчета режимов эрозионно-лучевого покрытия.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в статье, позволили выявить новые взаимодействия между параметрами комбинированного покрытия, что дало возможность создать новые способы на уровне изобретений

Ключевые слова: процесс, эрозионно-лучевая обработка, покрытия, этапы, плазменное упрочнение, эксперимент

### Введение

Процесс нанесения износостойких покрытий может быть описан путем математического моделирования механизма нанесения слоев. Такой механизм включает 4 этапа, рассмотренных в [1] на базе сведений из [2; 5] которые позволяют математически описать процессы, происходящие при комбинированном покрытии. На первом этапе плазменный луч используется для предварительного подогрева зоны нанесения покрытия. Второй этап охватывает электроэрозионное нанесение покрытия на поверхность участка детали при совмещении времени попадания капли на деталь с подводом тепла лучом плазмы. На третьем этапе под действием плазмы происходит дальнейший разогрев материала капли и увеличение ее текучести. Четвертый этап включает получение на покрытии (после электроэрозионного процесса) износостойкого твердого покрытия, получаемого лучом плазмы.

### Моделирование процесса нанесения износостойких покрытий

При построении модели, в качестве исходных данных можно принять:

- выполненные на текущий момент эксплуатационные требования (включая

износостойкость) к покрытиям рассматриваемого вида;

- характеристики заложенных в документации материалов и покрытий (включая жидкотекучесть, шероховатость поверхности покрытия);

- возможность технических средств технологического оснащения для электроэрозионного покрытия и плазменного упрочнения, а также возможность совмещения воздействий для управления комбинированным процессом;

- рабочая среда (газы) для выполнения операции;

- ввиду малой площади участка соприкосновения капли покрытия с деталью в расчетах можно принимать эту поверхность плоской независимо от геометрической формы детали.

В качестве граничных условий для использования разрабатываемой модели можно принять:

- предельные возможности по толщине электроэрозионного нанесения требуемых качественных покрытий на заданные материалы деталей с заложенными в документации требованиями к поверхностному слою покрытия;

- температуры плавления материалов детали и покрытия;

- показатели жидкотекучести материала покрытия.

При моделировании процесса следует рассматривать все этапы протекания механизма комбинированной обработки.

На первом этапе, где на деталь воздействует сканирующий луч плазмы,

---

Кондратьев Михаил Вячеславович - ВГТУ, старший преподаватель, e-mail: [540520@mail.ru](mailto:540520@mail.ru)  
 Смоленцев Евгений Владиславович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)  
 Смоленцев Владислав Павлович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [Vsmolen@inbox.ru](mailto:Vsmolen@inbox.ru)

температура детали зависит от времени ее нагрева ( $\tau$ ). Тогда по [2] критерий Фурье ( $F_0$ ) может быть представлен через средний коэффициент теплопроводности  $a_{cp}$ .

$$F_0 = \frac{1}{h_c^2} \int_0^\tau a \cdot d\tau = \frac{a_{cp} \cdot \tau}{h_c^2}, \quad (1)$$

где  $a_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau a \cdot d\tau$ ;  $h_c$  - глубина слоя

термического влияния.

Без учета комбинированного покрытия в качестве  $h_c$  можно принять нижний предел изменения допуска на толщину упрочняемого участка. В случае, когда плазменное упрочняющее покрытие наносится на электроэрозионное, можно в качестве  $h_c$  принять толщину этого слоя. Тогда удастся установить время ( $\tau$ ) воздействия луча, скорость его сканирования.

$$\tau = \frac{F_0 \cdot h_c^2}{a_{cp}}. \quad (2)$$

Отсюда можно найти среднюю скорость перемещения луча плазмы ( $W_{cp}$ ) от начала перемещения до его остановки в конце участка теплового воздействия луча ( $D_0$ )

$$W_{cp} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2}. \quad (3)$$

Для того, чтобы объединить в комбинированном процессе действие луча для подогрева с плазменным упрочнением нужно длительность ( $\tau$ ) поддерживать не более времени протекания импульса ( $\tau_u$ ) при электроэрозионном покрытии

$$\tau \leq \tau_u \quad (4)$$

Тогда частота ( $\nu_\Lambda$ ) сканирования луча будет

$$\nu_\Lambda = \frac{W_{cp}}{H_\Lambda} = \frac{D_0 \cdot a_{cp}}{F_0 \cdot h_c^2 \cdot H_\Lambda}, \quad (5)$$

где  $H_\Lambda$  - регулированный параметр, определяющий амплитуду перемещения луча, который зависит от расстояния между срезом сопла и поверхностью покрытия. Выбирается в диапазоне  $H_\Lambda = (4-6)D_0$ .

Для обеспечения наибольшего допустимого (без плавления материала) подогрева детали следует рассчитать количество теплоты ( $Q$ ), необходимое для нагрева

$$Q = c_{удд} \cdot m_H \cdot (t_{пл} + t_r), \quad (6)$$

где  $c_{удд}$  - удельная теплоемкость подогреваемой массы детали;  $m_H$  - масса нагреваемого участка,

$t_{пл}$  - температура плавления материала детали,

$t_r$  - температура, гарантирующая сохранность геометрии поверхности детали под действием тепловой энергии луча. Назначают  $t_r = 400-500$  К.

Масса нагреваемого участка ( $m_H$ ) может укрупненно оцениваться

$$m_H = \gamma_{удд} \cdot K_d \cdot H_\Lambda \cdot D_0, \quad (7)$$

где  $\gamma_{удд}$  - удельная плотность материала детали, г/см<sup>3</sup>;

$K_d$  - коэффициент, учитывающий рассеивание тепла на нагрев соседних участков детали.

На втором этапе определяющими являются параметры капли, наносимой в процессе электроэрозионного покрытия. Высоту капли на детали с учетом коэффициента перекрытия капель ( $\beta$ ) можно найти через глубину впадины, определяющую шероховатость покрытия ( $R_{ZO}$ ). Форма капли зависит от текучести расплавленного сплава с учетом температуры перегрева (500-600 К) и давления ( $P_{mk}$ )

$$P_k = P_{mk} + P_{атм}, \quad (8)$$

где  $P_k$  - давление на каплю, наносимую при электроэрозионном покрытии;  $P_{атм}$  - атмосферное давление (может быть принято как 0,1 Мпа). Поверхностное натяжение ( $\sigma_n$ ) расплавленной капли можно принять как постоянную справочную величину для материала покрытия [3]

$$P_k = \sigma_n \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (9)$$

где  $\sigma_n$  - коэффициент поверхностного натяжения на границе жидкий металл-воздух (табличные данные, например, по [3]);  $R_1$ ;  $R_2$  - главные радиусы кривизны жидкости (капли). В рассматриваемом случае  $R_1 = R_2 = r_0$ .

Тогда:

$$P_k = \frac{2\sigma_n}{r_0} \quad (10)$$

Из формулы (10) радиус капли ( $r_0$ )

$$r_0 = \frac{2\sigma_n}{P_{mk} + P_{атм}} \quad (11)$$

В формуле (11)  $P_{mn}$  является давлением фронта волны в момент разряда. По [4]

$$P_{mn} = \rho_k \cdot v_{y,\varepsilon}^2 + K_{mn}, \quad (12)$$

где  $\rho_k$  - плотность материала капли;  $v_{y,\varepsilon}^2$  - скорость фронта ударной волны. Зависит от длительности импульса, величины торцевого зазора ( $ST$ ). Для изучаемого диапазона длительности импульса и расстояния  $ST=10-30$  мкм по [4] скорость фронта ударной волны может быть оценена  $v_{y,\varepsilon} = 10^4$  м/с. Скорость фронта ударной волны ( $v_{y,\varepsilon}$ ) от точечного источника имеет сферическую форму, однако для малой площади сечения канала разряда с достаточной точностью может применяться зависимость, приведенная в [4]

$$v_{y,\varepsilon} = K_{y,\varepsilon} \sqrt[4]{\frac{K_p}{\rho_k}}, \quad (13)$$

где  $K_{y,\varepsilon}$  - коэффициент ударной волны, учитывает среду, в которой происходит разряд. Для воды  $K_{y,\varepsilon} = 0,7$  [4].  $K_p$  - коэффициент, учитывающий перераспределение давления за фронтом ударной волны, характеризуют связь между мощностью разряда и временем действия импульса.

$$\text{По [4]} \quad K_p = \frac{K_c \cdot U^2}{L_{\text{экв}} \cdot ST}, \quad (14)$$

где  $K_c$  - коэффициент, учитывает перераспределение удельной мощности разряда по времени его действия. По [4] для цилиндрической волны, действующей в течение  $\tau_v$   $K_c = 0,15$ ;  $U_{np}$  - напряжение на электродах, необходимое для пробоя промежутка  $ST$ . По [3]  $U_{np} = 0,7U$  (здесь  $U$  - напряжение при разомкнутых электродах).

Индуктивность разрядного контура

$$L_{\text{экв}} = \frac{T^2}{(2\pi)^2 C}, \quad (15)$$

где  $T$  - период действия разряда:  $T = q \cdot \tau_v$  ( $q$  - скважность разрядов ( $q = 2 - 3$ ));  $C$  - емкость контура разряда.

$\Delta P_{mn}$  - величина, учитывающая потери давления. Для условий разряда при электроэрозионной обработке в водной среде (это могут быть пары воды в атмосфере)  $\Delta P_{mn}$  может быть в импульсе до 30 МПа.

С учетом формул (12)-(14) радиус капли

$$r_o = \frac{2\sigma_n}{\rho_k K_{y,\varepsilon}^2 \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot K_c \cdot CU^2}{\rho_k \cdot q^2 \cdot S_T \cdot \tau_v^2} + \Delta P_{mn} + P_{амн}}} \quad (16)$$

Если принять объем ( $V_k$ ) капли покрытия, как объем сегмента с радиусом  $r_o$  и высотой  $h_o$ , то

$$V_k = \frac{2}{3} \pi \cdot r_o^2 \cdot h_o \quad (17)$$

Объем капли зависит от энергии импульса ( $A_u$ ).

По [2]

$$A_u = \eta_{им} \cdot J_{cp} \cdot v_{cp} \cdot \tau_v, \quad (18)$$

где  $\eta_{им}$  - коэффициент полезного действия импульса, (не превышает 0,41);

$J_{cp}$  - средний ток за импульс;  $U_{cp}$  - среднее напряжение в импульсе.

С учетом потерь энергии за импульс можно найти энергию, затрачиваемую для получения капли

$$A_u = C_{y\partial} \cdot m_k \cdot (t_{nl} + \Delta t), \quad (19)$$

где  $C_{y\partial}$  - удельная теплоемкость материала покрытия  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ ;

$m_k$  - масса капли;  $t_{nl}$  - температура плавления материала;  $\Delta t$  - запас температуры, гарантирующий жидкое состояние капли ( $\Delta t = 500-600$  К).

Отсюда объем ( $V_k$ ) капли

$$V_k = \frac{m_k}{\rho_k} \quad (20)$$

Тогда с учетом уравнений (18) и (19), приравнявая  $A_u$ , получаем  $m_k$  и по формуле (20) находим  $V_k$

$$V_k = \frac{\eta_{им} \cdot J_{cp} \cdot U_{cp} \cdot \tau_v}{C_{y\partial} \cdot \rho_k \cdot (t_{nl} + \Delta t)} \quad (21)$$

Если источником импульсов при электроэрозионном покрытии служит генератор RC-схемы, то формула (21) приобретает вид

$$V_k = \frac{\eta_{им} \cdot C \cdot U^2}{2C_{y\partial} \cdot \rho_k \cdot (t_{nl} + \Delta t)}, \quad (22)$$

где  $C$  - емкость конденсатора генератора. С учетом формулы (17) высота капли

$$h_o = \frac{3V_k}{2\pi \cdot r_o} \quad (23)$$

Тогда из (23) и (22)

$$h_o = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{\eta_{ум} \cdot C \cdot U^2}{C_{y\delta} \cdot \rho_k \cdot (t_{nl} + \Delta t) \cdot r_o} \quad (24)$$

В формуле (24)  $h_o$  характеризует толщину покрытия после электроэрозионного процесса без учета припуска на последующую обработку поверхности (если такая операция необходима). Высоту микронеровностей ( $R_{zo}$ ) можно принять в качестве величины одинаковой для всего покрытия

$$R_{zo} = h_o - h_n,$$

где  $h_o$  - толщина углубленного микроучастка слоя покрытия (ниже вершин расположения неровностей).

Величина  $h_n$  зависит от шага ( $H$ ) между соседними каплями и их перекрытия ( $\beta$ ), которое может быть принято равным его величине на аноде, показанный в [2]

$$\beta = \frac{H}{D_o} \quad (25)$$

Величина ( $\beta$ ) изменяется в широких пределах (от 0,3 до 0,7) и зависит от высоты неровностей  $R_{zo}$ .

Для RC-схем

$$R_{zo} = K_R \cdot C^{1/3} \cdot U^{2/3}, \quad (26)$$

где  $K_R$  - экспериментальный коэффициент, который составляет:

- для легированных сталей - 0,39 - 0,40;
- для жаропрочных сплавов - 0,41 - 0,42;
- для твердых вольфрамо-кобальтовых сплавов - 0,25 - 0,3.

Из уравнения (25) шаг перемещения электрода между соседними каплями

$$H = \beta \cdot D_o \quad (27)$$

С учетом (16), (24)

$$D_o = 2\sqrt{h_o^2 + 2h_o \cdot r_o} \quad (28)$$

Тогда шаг « $H$ »

$$H = \beta \cdot D_o = 2\sqrt{\frac{3K_R \cdot C^{1/3} \cdot U^{2/3} \cdot (r_o^2 + h_o^2)}{r_o \cdot h_o}} \cdot \sqrt{h_o(h_o + r_o)} \quad (29)$$

Ширина зоны перекрытия капель ( $h_n$ )

$$h_n = D_o - H \quad (30)$$

$$h_n = 2\sqrt{h_o(h_o + r_o)} \left[ 1 - \sqrt{\frac{3K_R \cdot C^{1/3} \cdot U^{2/3} \cdot (r_o^2 + h_o^2)}{r_o \cdot h_o}} \right] \quad (31)$$

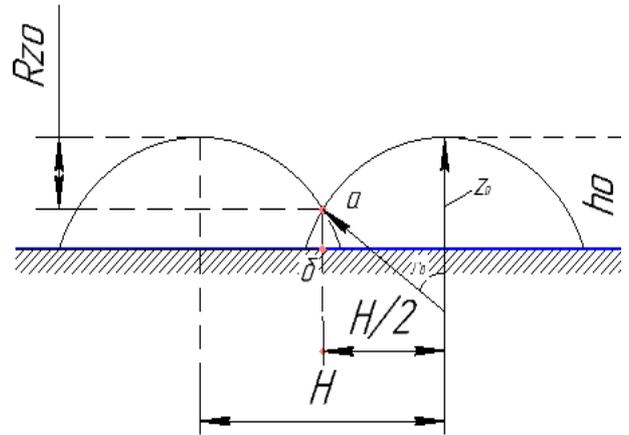


Рис. 1. Схема расчета  $R_{zo}$

Чем больше  $h_n$ , тем ниже шероховатость  $R_{zo}$  (рис. 1).

$$R_{zo} = h_o - \alpha \cdot \delta \quad (32)$$

Из рис. 1 величина  $R_{zo}$  может быть вычислена через  $r_o$ ,  $H$ ,  $\alpha$ .

$$\alpha = \sqrt{r_o^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} \quad (33)$$

Откуда

$$R_{zo} = r_o - \alpha = r_o - \sqrt{r_o^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} \quad (34)$$

На третьем этапе рассматривается динамика растекания капли и выравнивание микроповерхности под действием подвода тепла лучом плазмы. Здесь следует математически описать образование слоя, его толщину и микроповерхность.

По аналогии с (11) для второго этапа протекания механизма покрытия радиус капли  $r_1$  здесь составит

$$r_1 = \frac{2\sigma_{n1}}{P_{mn1} + P_{амм}}, \quad (35)$$

где  $\sigma_{n1}$  - поверхностное натяжение капли после дополнительного нагрева лучом плазмы. Учитывая, что за счет теплообмена часть тепла капли будет утрачена, а дополнительная энергия луча плазмы вызовет ее последующий нагрев, поверхностное натяжение  $\sigma_{n1}$  может отличаться от  $\sigma_n$  (формула (10)), но для технологических расчетов допустимо принять,

что этот показатель на этапах покрытия существенно не изменяется.

$$\sigma_{n1} = \sigma_n \quad (36)$$

В формуле (35)  $P_{mn1}$  - давление плазмы на поверхность капли после нанесения покрытия электроэрозионным методом.

По [4]

$$P_{mn1} = \frac{nRT}{A_r}, \quad (37)$$

где  $n$  - суммарная концентрация заряженных и нейтральных частиц в плазме. При температуре плазмы  $T_{пл} = 6000$  К и работе на воздухе  $P_{mn1} = 0,1$  МПа, величина  $n = 10^{18}$  [4];

$R$  - универсальная газовая постоянная,

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}};$$

$A_r$  - число Авогадро,  $A_r = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Для оценки давления  $P_{mn1}$  однокомпонентных газов (плазма) в [4] предлагается закон М. Саха

$$P_{mn1} = 2,4 \cdot 10^{-4} \frac{1 - \chi_u^2}{\chi^2} K_k^2 T^{\frac{5}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{e \cdot U_i}{K_\delta \cdot T}\right), \quad (38)$$

где  $\chi_u$  - степень ионизации газа, величина постоянная, которая зависит от положения материала в периодической системе;

$K_k$  - статистический квантовый коэффициент, изменяется в широких пределах (по [4]  $K_k^2 = 1 - 4$ );

$e \cdot U_i$  - энергия ионизации газа, эВ;

$K_\delta$  - постоянная Больцмана,

$$\left( K_\delta = 8,6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эВ}}{\text{К}} \right).$$

Обычно в реальных условиях плазма формируется в среде из нескольких газов. Тогда энергия ионизации газа в (38) определяется по [4] через эффективный потенциал ионизации  $U_o$ , который приведен в (39)

$$U_o = -\frac{T}{580} \cdot \ln \sum_1^n V_i^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{5800 U_i}{T}\right), \quad (39)$$

где  $V_i$  - объемная доля  $i$ -компонента в смеси газов;

$n$  - количество компонентов, принятое для смеси;

$U_i$  - потенциал ионизации  $i$ -го компонента в смеси;

$T$  - температура, К.

Плазма обладает высоким гидродинамическим напором, что может повысить величину  $P_{mn1}$  относительно расчетного значения.

По [4] радиус зоны действия луча может быть до 1-2 мм, что дает основания считать, что давление плазмы воздействует на всю открытую поверхность капли.

Расчет по формуле (37) может дать только достоверное качественное описание механизма действия плазмы и для количественной оценки в расчетах, как правило, не используется.

В [6] приведены исследования, позволяющие создать расчетные методики для определения численной величины импульсного (ударного) давления

$$\bar{P}_{mn1} = \frac{V_l \cdot \rho_k \cdot (T_k) \cdot C_{3k} \cdot (T_k)}{1 + \frac{\rho_k \cdot (T_k) \cdot C_{3k} \cdot (T_k)}{\rho_d \cdot (T_d) \cdot C_{3d} \cdot (T_d)}}, \quad (40)$$

где  $V_l$  - скорость частиц луча, м/с;

$\rho_k, \rho_d$  - плотность материалов капли и детали, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{3k}, C_{3d}$  - скорость звука в материале капли и детали, м/с.

Высота покрытия зависит не только от давления плазмы, но и от динамической составляющей от скорости струи  $W_k$ .

$$\text{По [6]} \quad W_k = \sqrt{\frac{\sigma_n \cdot \left(\frac{2r_1}{h_1} - 3\right)}{2\rho_k \cdot d \cdot r_1}} \quad (41)$$

В [6] предложена зависимость для расчета среднего давления струи плазмы  $P_{мп1}$  при используемых режимах протекания плазменного процесса

$$P_{mn1} = \frac{T_{cp} \cdot C_n \cdot G_{ncp} \cdot (\chi_r - 1) \rho_{ncp} \cdot C_{3cp}^2}{J_d \cdot U_{dcp} \cdot \eta_{тн} \cdot \left[1 + \frac{U_{ncp}}{U_{dcp}} + \frac{J_{ncp}}{J_{dcp}}\right]}, \quad (42)$$

где  $J_{ncp}, U_{ncp}$  - средние значение силы тока и напряжения в плазмотроне;

$T_{cp}, J_{dcp}, U_{dcp}$  - средняя температура, средний ток, напряжение дуги;

$C_n$  - теплопроводность плазмы;

$G_{ncp}$  - средняя величина массового расхода газа в плазматроне;

$\chi_T$  - отношение теплоемкостей составляющих плазмообразующего газа;

$\rho_{ncp}$  - средняя плотность плазмы на срезе сопла;

$C_{зcp}$  - средняя скорость звука в плазме;

$\eta_{тн}$  - тепловой коэффициент полезного действия плазматрона.

Расчет давлений  $P_{мп1}$ ,  $\overline{P_{мп1}}$  хотя возможен, но полученные результаты весьма приближенные, т.к. средние значения расчетных параметров могут значительно отличаться от крайних величин.

Для конкретных случаев использования плазменного упрочнения целесообразно использовать уравнения регрессии.

На четвертом этапе формируется упрочняющий слой плазменного покрытия. Толщина этого слоя составляет несколько микрон и при заданной толщине покрытия ( $h_1$ ), превышающий 100 мкм, нет необходимости рассчитывать толщину слоя плазменного упрочняющего покрытия, т.к. она находится в пределах погрешности расчетов. Плазменное покрытие может снижать передачу тепла от луча к слою после электроэрозионной обработки. Это учтено в расчетах в виде приращения тепла ( $\Delta t$ ), но, учитывая многократное превышение температуры плазмы (до  $(8-10) \cdot 10^3$  К) над температурой плавления наносимого покрытия ( $(1-1,5) \cdot 10^3$  К), можно считать обоснованным для комбинированного процесса предложенное деление цикла на рассматриваемые этапы, которые фактически протекают совместно.

Использование зависимостей, приведенных в модели, позволяет при расчете технологических режимов предусмотреть припуск на обработку покрытия (если это требуется).

Полученные в процессе моделирования параметры позволяют проектировать технологические процессы комбинированной обработки с получением износостойких покрытий.

### Параметры комбинированного эрозионно-лучевого плазменного износостойкого покрытия

Главными факторами, определяющими износостойкость деталей с покрытием, являются:

- твердость слоев покрытия;
- толщина покрытия и упрочненного слоя;
- шероховатость поверхностного слоя (в парах трения);
- условия работы деталей (контактные напряжения, скоростные режимы, ударные нагрузки, контактное трение, температурные факторы и др.).

Для подтверждения правомерности разработанных моделей были проведены экспериментальные исследования и обобщен опыт внедрения деталей с комбинированным покрытием.

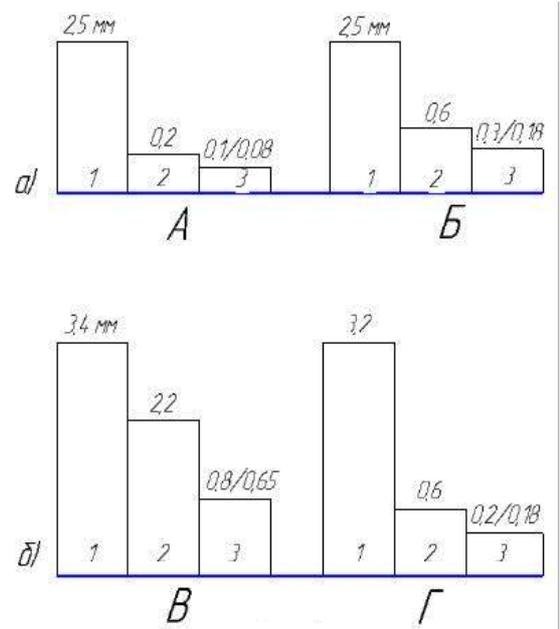


Рис. 2. Износ сплавов ВЖЛ (а) и ЭИ437Б с покрытием: А - Cr; Б- WC; В - MoS<sub>2</sub>; Г - ZrB<sub>2</sub>

На рис. 2 показаны результаты экспериментальных исследований по сравнительным испытаниям износа образцов и деталей после электроэрозионного и комбинированного покрытия на жаропрочных сплавах (рис. 2).

Обозначения на а) и б) (рис. 2): 1 - материал без покрытия; 2 - электроэрозионное покрытие; 3 - комбинированное покрытие.

На диаграмме в индексе «3» в числителе приведены экспериментальные, а в знаменателе - расчетные значения износа (мм).

Испытания проводили при следующих режимах:

- контактное давление образцов – 0,25 МПа
- скорость относительного перемещения контактных пар – 2-2,5 м/с
- толщина покрытия 0,25 мм
- температура испытаний – 1200 К
- длительность испытаний 350 часов.

Из рис. 2 видно, что здесь хорошо подтверждается качественная сторона механизма и модели, т.к. износ жаропрочных сплавов в условиях трения после электроэрозионного нанесения покрытия снизился до 10-12 раз, а после комбинированного нанесения покрытий в десятки раз. Приведенные сравнительные (эксперимент – расчет по модели) результаты показывают, что расчетные значения близки к экспериментальным, а имеющиеся отклонения объясняются изменениями условий протекания процесса ввиду нестабильности свойств материалов, шероховатости поверхности покрытия, контактного давления, влияние износа упрочняющего и электроэрозионного покрытия на результаты испытаний.

На машине трения МТУ 01 были проведены испытания образцов для установления коэффициента трения (рис. 3), что является подтверждением полезности покрытия из чугуна.

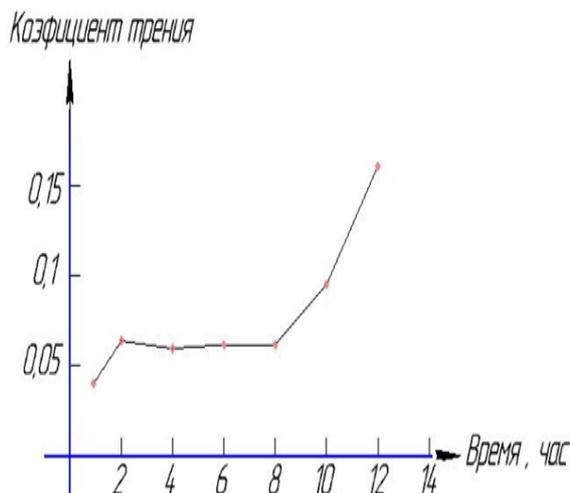


Рис. 3. Изменение коэффициента трения по мере износа покрытия

На рис. 3 материал деталей – сталь 45, покрытие на контактных парах – чугун СЧ24, контактное давление 1,6 МПа, площадь контакта – 12 см<sup>2</sup>, температура испытаний 460-500 К, скорость перемещения контактных тел – 1 м/с. Работа со смазкой в абразивной среде.

Анализ рис. 3 показывает, что коэффициент трения в течение 8 часов (смена

изменяется незначительно ( $\pm 0,015$ ), затем, очевидно под действием абразива, плазменное напыление стирается и начинается интенсивное возрастание коэффициента трения, что подтверждает предлагаемый в работе механизм повышения износостойкости комбинированным методом нанесения и упрочнения покрытий.

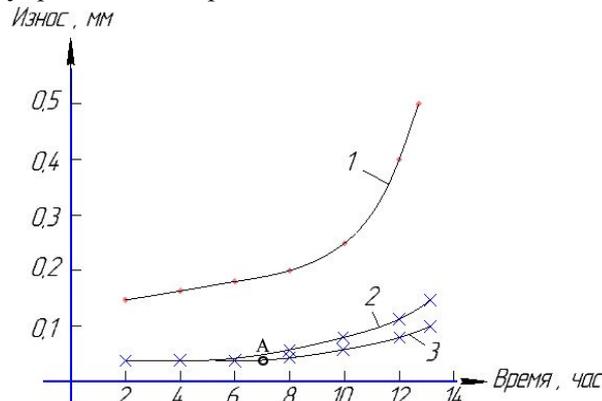


Рис. 4. Износостойкость титановых покрытий: 1 – деталь без покрытия; 2 – покрытие толщиной 0,3 мм из ОТ4-1; 3 – покрытие с плазменным упрочнением

Для повышения износостойкости и защиты от коррозии деталей из различных металлов на поверхность могут наноситься титановые покрытия. На рис. 4 приведена динамика износа стальной детали с покрытием из ОТ4-1 (2) и с плазменным упрочнением (3).

Условия испытаний: контактное давление 0,3 МПа, скорость перемещения между сопряженными образцами 0,3 м/с. Пары трения работали в масле с абразивом.

При использовании титана для восстановления изношенных деталей удается создать (рис. 5) покрытия, обладающие высокой износостойкостью, сохраняя при этом защитные свойства материала, аналогичные тем, которые имеются у дорогостоящих труднообрабатываемых нержавеющей сплавов. Возрастание износа в точке «а» (кривая 3 на рис. 4) объясняется тем, что в этом месте плазменное упрочнение было уже при работе пар трения и износ происходил по покрытию. Такой результат не противоречит представленной модели.

На рис. 5 показано влияние толщины покрытия на изменение его шероховатости.

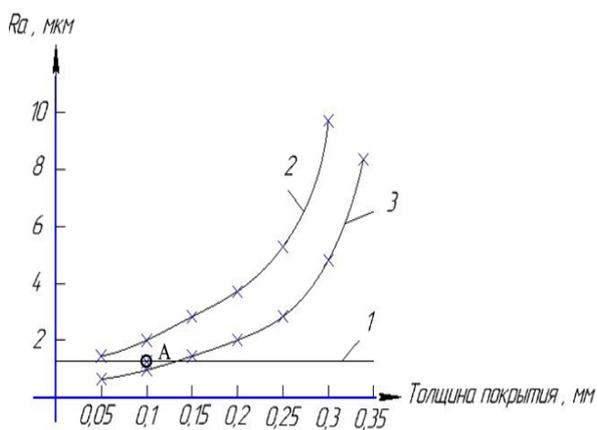


Рис. 5. Изменение высоты микронеровностей от толщины покрытия

Деталь из сплава ВЖЛ 2 с исходной шероховатостью  $R_a = 1,25$  мкм. Покрытие  $TiB_2$ .

1 – исходная поверхность детали, 2 – электроэрозионное покрытие, 3 – покрытие с плазменным упрочнением.

На кривой 3 (рис. 5) показана точка, где приведена расчетная величина микронеровностей. Расчеты проведены для толщины покрытия 100 мкм. Незначительные (0,04 мкм) расхождения полученных результатов объясняются заполнением углублений между каплями упрочняющим покрытием, что пояснялось при построении модели.

### Заключение

Приведенное описание процессов комбинированного нанесения износостойких покрытий и экспериментальное подтверждение результатов исследования механизма позволили расширить область их использования на восстановление геометрии

Воронежский государственный технический университет

## PROCESSES OF EROSION RADIAL PLASMATIC WEARPROOF COATING

M.V. Kondrat'ev<sup>1</sup>, E.V. Smolentsev<sup>2</sup>, V.P. Smolentsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [540520@mail.ru](mailto:540520@mail.ru)

<sup>2</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [smolentsev.rabota@gmail.com](mailto:smolentsev.rabota@gmail.com)

<sup>3</sup>Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation  
e-mail: [Vsmolen@inbox.ru](mailto:Vsmolen@inbox.ru)

The mechanism for applying combined erosion-radial plasmatic coatings is disclosed in the article, which made it possible to scientifically justify the physical model of the process, which is the basis of mathematical modeling.

изношенных деталей [8], улучшить эксплуатационные показатели изделий [9; 10].

### Литература

1. Кондратьев М.В. Механизм и процессы комбинированного нанесения покрытий / М.В. Кондратьев, Е.В. Смоленцев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. (в печати)
2. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева. – М. : Высш. шк., 1983. – Т.1. – 247 с.
3. Кэй Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби. - М.: Изд. физ.-мат. лит., 1962. – 248 с.
4. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева. – М. : Высш. шк., 1983. - Т.2 – 208 с.
5. Brooks A. Mechanical Plating / A. Brooks // Metal Finishing. – 1985. - V.81. - № 8 - P.53-57.
6. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров: монография / А.М. Кадырметов. - Воронеж : Научная книга, 2013. -260 с.
7. Бутовский М.Э. Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Ч. 1: Электроэрозионное упрочнение. Техника и технология: учеб. пособие / М.Э. Бутовский. - М.: ИКФ «Каталог», 1998. - 340 с.
8. Пат. 2318637 Российская Федерация, В23Н 5/00. Способ электроэрозионного восстановления чугунных деталей / В. П. Смоленцев и др., ГОУВПО "ВГТУ". – 2006113860; заявл. 24.04.2006 ; опубл. 10.03.2008, Бюл. №7.
9. Бржозовский Б.М. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зенина. - Саратов: СГТУ, 2009. - 176 с.
10. Сафонов С.В. Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения и удаления покрытий / С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т.11.- №3. - С. 15-23.

To describe the procedure of coatings formation, a new principle is proposed for dividing the combined process into logically developing successive stages, accounting which it is possible to consider the mechanism as a single process. A mathematical model is presented, which takes into account the initial and boundary features of the processes during application and hardening of coatings, which is the basis for designing the technological process of erosion-radial deposition of layers with the required exploitation characteristics. Experimental studies confirming the legitimacy of the combined process model are presented, which is the basis for the development of reliable methods for calculating erosion-radial coating regimes. The theoretical and experimental studies presented in the article made it possible to identify new interactions between the parameters of a combined coating, which made it possible to create new methods at the level of inventions

Key words: processing, erosion-radial treatment, coating, stages, plasmatic hardening, experiment

### References

1. Kondrat'ev. M.V., Smolencev E.V, Smolencev V.P. "Mechanism and processes of the combined coating", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, Voronezh, in print.
2. Smolentsev V. P. "Electrophysical and electrochemical methods of processing materials" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.
3. Kaye G.W., Laby T.H "Tables of physical and chemical constants", Longmans, 1970, 73 p., (Russ. ed.: Key D., Lebi T., *Tablitsy fizicheskikh i khimicheskikh postoyannykh*, Moscow, Fiz.-mat. lit. Publ, 1962, 248 p.)
4. Smolentseva V. P. "Electrophysical and electrochemical methods of processing materials" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, vol. 2, 208 p.
5. Brooks A. "Mechanical Plating", *Metal Finishing*, vol.81, no. 8, pp.53-57.
6. Kadyrmetov A.M. "Control of technological support of plasma coating processes in the mode of electric parameters modulation" ("Upravlenie tekhnologicheskim obespecheniem protsessov plazmennogo naneseniya pokrytiy v rezhime modulyatsii elektricheskikh parametrov"), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2013, 260 p.
7. Butovskiy M.E. "Tutorial: Coating and hardening of materials with concentrated energy flows. Part 1: Electroerosion hardening. Technic and Technology" ("Nanesenie pokrytiy i uprochnenie materialov kontsentrirovannymi potokami energii. Chast' 1: Elektroerozionnoe uprochnenie. Tekhnika i tekhnologiya"), Moscow, IKF «Katalog», 1998, 340 p.
8. Smolentsev V. P. "Method for electroerosion recovery of cast iron parts" ("Sposob elektroerozionnogo vosstanovleniya chugunnykh detaley"), Patent RF no 2318637, 2008.
9. Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Zenina E.P. "Hardening of the cutting tool by the influence of low-temperature plasma of combined discharge" ("Uprochnenie rezhushchego instrumenta vozdeystviem nizkotemperaturnoy plazmy kombinirovannogo razryada"), Saratov, SSTU, 2009, 176 p.
10. Safonov S.V., Grigor'ev S.N., Smolentsev V.P. "Increase of operational properties of products by application and removal of coatings", *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, Voronezh, vol. 11, no. 3, 2015, pp. 15-23.

## ПОГРЕШНОСТИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

**А.И. Болдырев, А.А. Болдырев**

В настоящее время разработаны достаточно подробные структурные модели процесса электрохимической размерной обработки, но до сих пор нет полных и четких классификаций погрешностей. В работе предпринята попытка обобщения и систематизации применяемого в технологии машиностроения группирования действующих факторов и погрешностей по этапам достижения точности применительно к электрохимической размерной обработке. Показано, что на достижение заданной точности процесса обработки оказывают влияние погрешности, определяемые характеристиками заготовки, инструмента, станка, способа измерения. Рассмотрены действующие факторы и соответствующие погрешности по этапам достижения точности: при установке и закреплении заготовки; статической и динамической настройкам технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь.

Определение причин, вызывающих погрешности при обработке заготовок на электрохимических станках, позволило установить связь между этими причинами и величинами погрешностей. Знание причин и величин элементарных погрешностей, различающихся по характеру их воздействия на технологическую систему, дает возможность определить суммарную погрешность при обработке и спрогнозировать достижимую точность процесса, оценить точность комбинированных процессов, включающих традиционную электрохимическую размерную обработку.

Проведенный анализ действующих факторов и составляющих погрешностей позволяет наметить пути повышения точности электрохимической размерной обработки деталей машин

Ключевые слова: погрешности, точность, электрохимическое формообразование

### Введение

Как известно, при электрохимической размерной обработке размеры обработанной поверхности отличаются от соответствующих размеров электродов-инструментов на величины межэлектродных зазоров (МЭЗ), устанавливаемых в процессе анодного растворения. Поэтому точность электрохимического формообразования во многом определяется и существенно зависит от факторов, влияющих на значения МЭЗ.

Влияние отдельных факторов и совокупности различных факторов на точность электрохимической размерной обработки исследовалось в работах Ю.Н. Петрова, Ф.В. Седыкина, Л.Б. Дмитриева, В.П. Смоленцева, А.Х. Каримова и др. [1, 2, 3, 4, 5 и др.]. Предлагались различные классификации действующих факторов и соответствующих погрешностей обработки, в которых, как правило, факторы разделялись на электрохимические, геометрические, кинематические, гидравлические и тепловые. По отношению к самому процессу ЭХРО известно группирование действующих факторов на внешние и внутренние, что более целесообразно для разработки систем регулирования процесса анодного растворения. В настоящее время разработаны достаточно

подробные структурные модели процесса ЭХРО, но до сих пор нет полных и четких классификаций погрешностей.

В данной работе предпринята попытка обобщения и систематизации применяемого в технологии машиностроения группирования действующих факторов и погрешностей по этапам достижения точности.

При заданных исходных характеристиках обрабатываемой детали, станка и инструмента достижение точности, согласно [6], разделяется на три этапа:

- установка и закрепление заготовки;
- статическая настройка технологической системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД);
- динамическая настройка технологической системы СПИД в процессе обработки.

Рассмотрим действующие факторы и соответствующие погрешности по этапам достижения точности при ЭХРО.

### 1. Исходные характеристики заготовки, инструмента, станка, способа измерения

На достижимую точность процесса ЭХРО оказывают погрешности, определяемые характеристиками заготовки, инструмента, станка, способа измерения (табл. 1).

*Характеристики заготовки.* Марка материала заготовки, его структурное состояние в значительной степени определяют величину межэлектродных зазоров, установившихся в процессе анодного

---

Болдырев Александр Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: aiboldyrev@mail.ru

Болдырев Александр Александрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

растворения. Поэтому при обработке различных материалов на одних и тех же режимных параметрах получаются разные достижимые результаты по точности. Влияние материала и его структуры оценивается погрешностями  $\Delta_m$  и  $\Delta_c$ , соответственно.

Таблица 1

Действующие факторы	Погрешности
Характеристики заготовок: - материал; - структура; - погрешности заготовки; - величина и неравномерность припуска.	$\Delta_m$ $\Delta_c$ $\Delta_z$ $\Delta_z$
Характеристики инструмента (неточность размера и формы, материал, жесткость, шероховатость исходной поверхности)	$\Delta_n$
Неточности станка в нерабочем состоянии	$\Delta_{ст}$
Неточности измерения	$\Delta_{изм}$

Значительная доля погрешности возникает из-за неточности самой заготовки  $\Delta_z$ . Это наиболее характерно для лопаток турбин и компрессоров. Погрешность ЭХРО  $\Delta_z$ , обусловленная неравномерностью припуска по перу лопатки, может составлять, как известно, до 15-20 % суммарной погрешности, а в ряде случаев и более.

Для идеального процесса анодного растворения в электрохимической ячейке величину  $\Delta_z$ , определяют по зависимостям, приведенным в работе [7]. Однако с целью учета изменения параметров процесса и характеристик обрабатываемого материала в реальных условиях обработки следует расчет по рекомендованным формулам производить с использованием эмпирических зависимостей характеристики режима и материала  $A$  от величины межэлектродного зазора  $a$ , т.е. как  $A = f(a)$ . Для партии лопаток вследствие изменения  $\Delta_z$  и минимального припуска данная погрешность является случайной.

При ЭХРО гравюр ковочных штампов, прессформ, полостей и колодцев трудностей с выравниванием припусков практически не возникает. Погрешности заготовок, например, ковочных штампов, проявляются в виде непараллельности и неперпендикулярности базовых и обрабатываемых поверхностей и имеют случайный характер. Техническими условиями на изготовление указанные

отклонения оговорены в пределах 0,02 мм на 100 мм длины.

*Характеристики инструмента.* Одной из основных характеристик электрода-инструмента, влияющих на точность формообразования при ЭХРО, является погрешность его изготовления. Эта погрешность в большинстве случаев является систематической и составляет для ЭХРО объемно-фасонных поверхностей 0,1-0,3 мм [3]. Погрешность расчетного инструмента, в свою очередь, складывается из неточности расчета, изготовления и измерения шаблонов (0,03-0,1 мм) и неточности изготовления, доводки, измерения профиля электрода-инструмента (0,02-0,05 мм) [8]. Следовательно, минимальная  $\Delta_n \approx 0,08-0,15$  мм.

Для обработки пера лопаток, гравюр штампов, прессформ, полостей и колодцев обычно применяются достаточно массивные электроды-инструменты с повышенной жесткостью. Нежесткость инструмента оказывает наиболее существенное влияние на выходные показатели процесса ЭХРО по точности в основном при прошивке глубоких отверстий консольными электродами-инструментами.

*Погрешности станка в нерабочем состоянии.* Для электрохимических прошивочных станков такими неточностями являются неперпендикулярность оси штока и направляющих перемещения рабочих головок к плоскости контейнера или заданной плоскости расположения детали. Техническими требованиями указанные погрешности допускаются в пределах до 0,01-0,02 мм на 100 мм длины. Поэтому на практике при снятии слоя металла в 5-50 мм погрешность обработки  $\Delta_{ст}$ , обусловленная неточностями станка, как правило, не превышает 0,01 мм. Однако при ЭХРО крупных деталей, например, турбинных лопаток длиной 1250 мм на станке модели МЭ-75,  $\Delta_{ст}$  уже составляет 0,05 мм [9].

*Погрешности измерения.* Истинная величина размера определяется результатами измерений. В связи с этим погрешность  $\Delta_{изм}$  измерений считается одним из факторов, влияющим на погрешность обработки в целом [6].

Измерения фасонной поверхности гравюры ковочного штампа, прессформы колодцев и полостей производятся в основном посредством шаблонов и универсальных измерительных средств. Точность изготовления шаблонов составляет 0,03-0,05 мм, а следовательно, примерно такими же

показателями характеризуется и погрешность измерения  $\Delta_{изм}$ .

При применении для контроля профиля пера лопаток индикаторных приборов и оптико-механических устройств погрешность измерения  $\Delta_{изм}$  снижается до 0,02 мм.

## 2. Установка и закрепление

Погрешности, обусловленные несовпадением исходных и установочных баз заготовки для обработки, и погрешности установки и закрепления заготовки относительно электрода-инструмента также оказывают влияние на точность формообразования при ЭХРО (табл. 2).

Таблица 2

Действующие факторы	Погрешности
Несовпадение исходных и установочных баз заготовки	$\Delta_б$
Неточности установки и закрепления заготовки относительно электрода-инструмента (погрешности базовых поверхностей приспособления, заготовки, жесткость элементов приспособления, схема и сила закрепления)	$\Delta_{у.з}$

Погрешности, обусловленные несовпадением исходных и установочных баз заготовки. Несовпадение исходной и установочной базы заготовки приводит к появлению погрешности базирования  $\Delta_б$ , определяемой величиной поля допуска на размер, связывающего эти базы [6]. Эта погрешность имеет место, например, при ЭХРО вставок ковочных штампов и составляет  $\Delta_б \approx 0,05-0,1$  мм. При ЭХРО лопаток в большинстве случаев обеспечивается совмещение исходных и установочных баз и  $\Delta_б = 0$ . Погрешность  $\Delta_б$  является систематической и на практике легко устраняется, например, при изготовлении ковочных штампов доработкой установочных поверхностей после выполнения операции ЭХРО гравюры.

Погрешность установки и закрепления заготовки относительно электрода-инструмента. Неточность установки и закрепления заготовки относительно электрода-инструмента приводит к появлению соответствующей погрешности формы и координирующих размеров  $\Delta_{у.з}$ . Данная погрешность является случайной и

определяется точностью изготовления базовых поверхностей детали, приспособления, их жесткостью, схемой и силой закрепления заготовки. Величина погрешности зачастую весьма существенна: так для лопаток длиной до 200-250 мм  $\Delta_{у.з}$  составляет 0,08-0,2 мм, а для ЭХРО крупногабаритных лопаток с  $l \approx 500-600$  мм даже превышает заданный допуск на изготовление профиля лопаток [10].

У прямоугольных заготовок вставок ковочных штампов со шлифованными установочными поверхностями неплоскостность и неперпендикулярность граней составляет до 0,02 мм на 100 мм длины. При закреплении штампа к столу контейнера прихватами сверху погрешность  $\Delta_{у.з}$  определяется указанными величинами. Если применять схему с боковым токоподводом и креплением по клину, то не исключена установка заготовки с перекосом в пределах 0,03-0,05 мм относительно горизонтальной плоскости стола.

## 3. Статическая настройка технологической системы СПИД

Этап статической настройки технологической системы СПИД применительно к процессу ЭХРО характеризуется рядом специфических погрешностей (табл. 3).

Таблица 3

Действующие факторы	Погрешности
Неточности выставления исходного положения электрода-инструмента	$\Delta_a^\circ$
Настройка начальных параметров режима (состав и параметры электролита, величина и форма рабочего напряжения, скорость подачи электрода-инструмента, температура электродов)	$\Delta_p^\circ$

Погрешность выставления исходного положения электрода-инструмента. Эта погрешность  $\Delta_a^\circ$  характеризуется ошибкой в установке начального МЭЗ относительно поверхности заготовки. При настройке  $a^\circ$  по индикаторным часам без деформации звеньев технологической системы СПИД погрешность  $\Delta_a^\circ$  определяется ценой деления часов и субъективными факторами. В процессе ЭХРО с периодическим «ощупыванием» погрешность

выставления  $a^\circ$  проявляется в каждом цикле. Для серийных станков погрешность  $\Delta_a^\circ$  составляет до 0,1 мм, а для станков повышенной точности, предназначенных для выполнения калибровочных операций, – 0,02 мм. Погрешность  $\Delta_a^\circ$  является случайной и в основном оказывает влияние на точность выполнения координирующего размера детали в направлении подачи электрода-инструмента.

*Погрешность от настройки начальных параметров режима.* В технологии механической обработки начальные режимы обычно не выделяются в группу факторов, влияющих на точность. Однако косвенная связь все-таки имеется. Например, от режима обработки зависит параметр «уточнение» или погрешности, обусловленные упругими деформациями технологической системы СПИД. При ЭХРО начальные параметры определяют величины МЭЗ, установившиеся в процессе анодного растворения. При определении рассматриваемой погрешности рассуждаем следующим образом. Предположим, что после ЭХРО электродом-инструментом заданной формы на определенных режимах профиль электрода-детали точно совпал с профилем по требованиям чертежа. Изменение режима обработки при повторении опыта приведет к отклонениям формы, равным  $\Delta_p^\circ$  [7].

#### 4. Динамическая настройка технологической системы СПИД в процессе обработки

Ряд погрешностей возникает при динамической настройке технологической системы СПИД, т.е. в процессе ЭХРО (табл. 4).

*Погрешность кинематической схемы ЭХРО.* Формообразование фасонных поверхностей, как правило, происходит при поступательном движении электрода-инструмента. При этом из-за наличия угла между направлением подачи и вектором местной скорости анодного растворения в каждой точке обрабатываемой поверхности возникает кинематическая погрешность  $\Delta_{кин}$ , которая определяется как  $\Delta_{кин} = a_i - a_T$ , где  $a_i$  – МЭЗ в произвольной точности поверхности, а  $a_T$  – в нижней точке электрода-инструмента [Хакимов]. Однако разность  $a_i - a_T$  не всегда можно считать погрешностью обработки, т.к. разность существует и в случае, когда профиль поверхности после ЭХРО точно совпадает с заданным чертежом. Кроме того, разность  $a_i - a_T$  определяется не только кинематикой движения инструмента, но также

характеристиками материала и режимами обработки. Например, при ЭХРО с введением в рабочий электролит сжатого газа можно обеспечить  $a_i - a_T = 0$ . Из этого следует, что в общем случае появление величины  $a_i - a_T$  определяется не только спецификой кинематической схемы электрохимического формообразования [8, 9].

Таблица 4

Действующие факторы	Погрешности
Специфика кинематической схемы	$\Delta_{кин}$
Нестабильность параметров режима на входе в межэлектродный канал ( $T, c, p, U, v, pH$ )	$\Delta_{н.р}$
Деформации технологической системы СПИД (тепловые, под действием гидродинамических и электромагнитных сил и остаточных напряжений)	$\Delta_{деф}$
Изменение параметров режима обработки по длине межэлектродного канала и детали ( $T, p, W, U, U_n, \chi, \rho, v, a, pH$ )	$\Delta_p^I$
Неточность фиксации конца обработки	$\Delta_k$

Погрешность  $\Delta_{кин}$  относится к систематическим и компенсируется коррекцией профиля электрода-инструмента.

*Погрешность от нестабильности параметров режима на входе в межэлектродный канал.* В процессе обработки изменяются значения параметров режимов на входе в межэлектродный канал: в определенных пределах колеблется напряжение электрической сети  $U$  и скорость подачи электрода-инструмента  $v$ , нагревается и охлаждается рабочий электролит  $T$ , увеличивается его концентрация  $c$ , изменяется давление потока электролита  $p$  и кислотность  $pH$ . Все это приводит к непостоянству МЭЗ рассеянию характеристик точности ЭХРО. Погрешность  $\Delta_{н.р}$  может быть как случайной (колебания напряжения, скорости подачи электрода-инструмента), так и систематической закономерно изменяющейся (увеличение температуры электролита на входе, например, при недостаточной работе холодильников и др.). По экспериментальным данным ряда исследователей погрешности, обусловленные изменением параметров режима на входе,

составляют до 30-40 % суммарной погрешности обработки [2, 11, 12].

*Погрешность от деформации технологической системы СПИД.* Некая доля погрешности ЭХРО определяется деформациями звеньев технологической системы СПИД под действием нагрева детали, гидродинамических и электромагнитных сил и остаточных внутренних напряжений. Деформация детали в процессе ЭХРО приводит к неравномерному перераспределению МЭЗ по обрабатываемой поверхности, снижению точности формообразования, а в некоторых случаях и к короткому замыканию. Такие погрешности особенно существенно проявляются при обработке тонкостенных деталей с фасонными поверхностями, например, крупногабаритных лопаток турбин и компрессоров.

При ЭХРО деталь нагревается проходящим через нее током и за счет тепла, выделяемого в местах контакта с токоподводами. Нагрев выше критических температур уже приводит к потере устойчивости и деформации детали. Ранее в трудах В.А. Головачева и В.А. Шманева [13] было экспериментально показано, что при ЭХРО титановых лопаток компрессора длиной до 400 мм температура пера в отдельных сечениях достигала 150° С, и наблюдались остаточные деформации оси пера лопаток до 0,8-2 мм. При обработке более жестких лопаток турбины с меньшей длиной, а также массивных заготовок деталей машин температурные деформации не существенны.

Температурные деформации остальных звеньев технологической системы СПИД (элементы станков, приспособлений) вследствие, как правило, их значительных масс и жесткости в большинстве случаев не учитываются.

Упругие деформации до 0,15 мм под действием гидродинамических сил потока электролита в межэлектродном промежутке отмечались в процессе ЭХРО пера лопаток турбины длиной до 200 мм. Еще более значительные деформации имеют место при ЭХРО пера крупногабаритных лопаток.

Известно, что при прохождении электрического тока в процессе анодного растворения в межэлектродном промежутке возникают электромагнитные силы, действующие на обрабатываемую деталь и оснастку. Так прогиб пера лопаток под действием таких сил может достигать 0,2 мм и более. Однако при оптимальном расположении токоподводов и двухсторонней обработке пера

влияние электромагнитных сил на точность ЭХРО можно свести до пренебрежительно малых величин.

В технологии машиностроения известно [6], что при снятии припуска с поверхности, имеющей остаточные внутренние напряжения, обрабатываемые детали деформируются. Наиболее заметно это проявляется при обработке тонкостенных фасонных деталей, например, крупногабаритных лопаток турбин и компрессоров. Так, при односторонней ЭХРО лопаток турбин длиной 1200 мм в целом ряде случаев отмечались деформации пера под действием перераспределения остаточных напряжений до 1,25 мм [13]. И только подбором оптимальной последовательности переходов и значений межоперационных припусков, а также осуществлением ЭХРО лопаток по двухсторонней схеме можно существенно уменьшить величину деформаций от остаточных внутренних напряжений.

Данные погрешности относятся к систематическим, т.к. они подчиняются определенным закономерностям. Но для жестких и массивных деталей, например, ковочных штампов, погрешности ЭХРО, обусловленные деформацией технологической системы СПИД, можно практически не учитывать.

*Погрешности, обусловленные изменением параметров режима обработки по длине межэлектродного канала и детали.* При ЭХРО вдоль направления течения потока вследствие нагрева и газошламонаполнения электролита изменяются его физико-химические параметры. С увеличением длины детали возрастает падение напряжений в ней. Это приводит к перераспределению локальных скоростей анодного растворения и к соответствующим погрешностям обработки, значение которых достигает 0,2-0,3 мм при ЭХРО с длиной межэлектродного канала до 150-200 мм [1]. Для крупногабаритных деталей падение напряжения по длине уже приводит к погрешности ЭХРО в 0,5-0,6 мм [13]. Погрешности обработки  $\Delta_p^i$ , обусловленные изменением параметров режима и электролита вдоль межэлектродного канала и по длине детали, относятся к систематически закономерным изменяющимся погрешностям.

*Погрешность из-за неточности фиксации конца обработки.* При непрерывной ЭХРО погрешность  $\Delta_k$ , связанная с неточностью фиксации конца обработки, определяется соответствующими характеристиками микровыключателей (0,02-0,05 мм), электроконтактных датчиков (0,01 мм), ценой

деления индикаторов (0,01 мм) и рядом субъективных факторов. Применение дискретной системы восстановления начального МЭЗ может увеличить указанную погрешность еще на величину съема за цикл, т.е. на 0,03-0,05 мм.

Погрешность  $\Delta_k$  является случайной и влияет на точность выполнения координирующего размера.

Превалирование той или иной погрешности характерно для каждого типа обрабатываемых деталей и выполняемой операции. Так, например, при ЭХРО профиля пера крупногабаритных лопаток компрессора из титановых сплавов доля суммарной погрешности приходится на  $\Delta_{у.з}$  – до 90-120 % от допуска на изготовление, а далее уже следуют  $\Delta_{деф}$ ,  $\Delta_{р^\circ}$  и т.д. Для операции электрохимического формообразования гравюрковочных штампов, согласно исследованиям А.Х. Каримова [14], установлено, что составляющие погрешности по величине располагаются в следующем порядке:  $\Delta_{н.р}$ ,  $\Delta_{и}$ ,  $\Delta_{у.з}$  и т.д.

### Заключение

Изучение причин (факторов), вызывающих погрешности при обработке заготовок на электрохимических станках, позволяет установить связь между этими причинами и величинами погрешностей. Знание причин и величин элементарных погрешностей, различающихся по характеру их воздействия на технологическую систему, дает возможность определить суммарную погрешность при ЭХРО и спрогнозировать достижимую точность процесса, оценить точность комбинированных процессов, включающих традиционную ЭХРО [15, 16].

Проведенный анализ связей между причинами и величинами погрешностей создает предпосылки для управления погрешностями путем снижения их при необходимости до очень малых величин, и наметить пути повышения точности ЭХРО деталей.

### Литература

1. Основы повышения точности электрохимического формообразования / Ю.Н. Петров,

Г.Н. Корчагин, Г.Н. Зайдман и др. Кишинев: Штиинца, 1977. 152 с.

2. Зайдман Г.Н. Формообразование при электрохимической размерной обработке металлов / Г.Н. Зайдман, Ю.Н. Петров. Кишинев: Штиинца, 1990. 203 с.

3. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин / Ф.В. Седыкин. М.: Машиностроение, 1976. 301 с.

4. Технология электрических методов обработки / В.П. Смоленцев, А.В. Кузовкин, А.И. Болдырев и др. Воронеж: ВГУ, 2001. 310 с.

5. Каримов А.Х. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие / А. Х. Каримов. Казань: КГТУ, 2014. - 171 с.

6. Основы технологии машиностроения / А.И. Болдырев, В.П. Смоленцев, А.С. Белякин и др. Воронеж: ВГТУ, 2011. 199 с.

7. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Обработка материалов с применением инструмента / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др.; под ред. В.П. Смоленцева. Воронеж: ВГТУ, 2008. Ч. 1. 248 с.

8. Средства технологического оснащения и оборудование для электрических методов обработки / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев и др. Воронеж: ВГТУ, 2017. 215 с.

9. Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин / под ред. Ф.В. Седыкина. М.: Машиностроение, 1980. 277 с.

10. Анализ точности установки крупногабаритных лопаток при ЭХО / Н.И. Потапов, В.И. Симонов, Б.И. Петров и др. // ЭХО поверхностей деталей авиадвигателей. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 17-24.

11. Экспериментальные исследования технологических возможностей электрохимического формообразования / А.И. Болдырев, С.В. Усов, А.А. Болдырев, А.В. Мандрыкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014. -Т. 10. -№ 3.1.- С. 120-122.

12. Демьянцева Н.Г. Оценка точности формообразования при электрохимической обработке металлов / Н.Г. Демьянцева, С.М. Кузьмин, А.В. Балмасов // Электронная обработка материалов. 2012. № 48 (3). С. 46-49.

13. Головачев В.А. Некоторые особенности электрохимической обработки крупногабаритных лопаток компрессора / В.А. Головачев, В.А. Шманев, Ю.С. Шипов // ЭХО поверхностей деталей авиадвигателей. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 31-36.

14. Технология электрохимической обработки деталей в авиадвигателестроении / В.А. Шманев, В.Г. Филимошин, А.Х. Каримов и др. М.: Машиностроение, 1986. 168 с.

15. Болдырев А.И. Моделирование процесса комбинированной электрохимикомеханической обработки / А.И. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010. -Т.6. -№2. -С. 141-145.

16. Болдырев А.И. Обеспечение точности внутренних поверхностей электрохимикомеханической обработкой / А.И. Болдырев // Известия ОрелГТУ. 2008. № 4-4/272. С. 26-30.

# ERRORS AND THEIR INFLUENCE ON FORMATION OF ELECTROCHEMICAL SHAPING ACCURACY

A.I. Boldyrev<sup>1</sup>, A.A. Boldyrev<sup>2</sup>

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

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

Nowadays quite detailed structural models of electrochemical dimensional processing have been developed, but there are still no complete and precise classifications of errors. The article is about generalization and systematization of the grouping of operating factors and errors applied in technology of machine building according to the stages of achieving accuracy with respect to electrochemical dimensional processing. It is shown that achieving of the given formation process accuracy is affected by errors determined by characteristics of the workpieces, tools, machines, and methods of measurement. The following acting factors and the corresponding errors according to the stages of achieving accuracy are considered: when installing and fixing a workpiece; during static and dynamic adjustments of the technological system “machine-device-tool-workpiece”.

Determination of the errors causes in the processing of workpieces by electrochemical machines made it possible to establish a relationship between these causes and the magnitude of the errors. Knowing the causes and magnitudes of elementary errors, differing in the mode of their effect on the technological system, it is possible to determine the resultant error in processing and to predict the achievable process accuracy, to evaluate the efficiency of combined processes involving traditional electrochemical dimensional processing.

The analysis of operating factors and elementary errors allows us to outline the ways to improve the accuracy of electrochemical dimensional processing of machine parts

Key words: errors, accuracy, electrochemical shaping

## References

1. Petrov Yu.N., Korchagin G.N., Zaydman G.N. “Basics of increasing the accuracy of electrochemical formation”, Kishinyev, Shtiintsa, 1977, 152 p.
2. Zaydman G.N., Petrov Yu.N. “Formation in electrochemical dimensional processing of metals”, Kishinyev, Shtiintsa, 1990, 203 p.
3. Sedykin F.V. “Dimensional electrochemical treatment of machine parts”, Moscow, Mashinostroenie, 1976, 301 p.
4. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Boldyrev A.I. “Electrical processing technology” (“Tekhnologiya elektricheskikh metodov obrabotki”), Voronezh, VSU, 2001, 310 p.
5. Karimov A.Kh. “Tutorial: Electrophysical and electrochemical methods of material processing” (“Uchebnoe posobie: Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov”), Kazan’, KSTU, 2014, 171 p.
6. Boldyrev A.I., Smolentsev V.P., Belyakin A.S. “Bases of mechanical engineering technology” (“Osnovy tekhnologii mashinostroeniya”), Voronezh, VSTU, 2011, 199 p.
7. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. “The theory of electrical, chemical and physical processing methods. Processing materials using tools” (“Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta”), Voronezh, VSTU, 2008, part 1, 248 p.
8. Smolentsev V.P., Boldyrev A.I., Smolentsev E.V. “Backup facilities and equipment for electrical processing methods” (“Sredstva tekhnologicheskogo osnashcheniya i oborudovanie dlya elektricheskikh metodov obrabotki”), Voronezh, VSTU, 2017, 215 p.
9. Sedykin F.V. “Equipment for dimensional electrochemical processing of machine parts”, Moscow, Mashinostroenie, 1980, p. 277
10. Potapov N.I., Simonov V.I., Petrov B.I. “Accuracy analysis of the installation of large-sized blades during electrochemical processing”, *Electrochemical treatment of surfaces of aircraft engine parts (EKHO poverkhnostey detaley aviadvigately)*, Kuybyshev, 1974, vol. 1, pp. 17-24.
11. Boldyrev A.I., Usov S.V., Boldyrev A.A. “Experimental studies of technological possibilities of electrochemical formation”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2014, vol.10, no. 3.1, pp. 120-122.
12. Dem’yantseva N.G., Kuz’min S.M., Balmasov A.V. “Evaluation of the accuracy of shaping during electrochemical processing of metals”, *Electronic material processing (Elektronnaya obrabotka materialov)*, 2012, no. 48 (3), pp. 46-49.
13. Golovachev V.A., Shmanev V.A., Shipov Yu.S. “Some features of the electrochemical treatment of large-sized compressor blades” *Electrochemical treatment of surfaces of aircraft engine parts (EKHO poverkhnostey detaley aviadvigately)*, Kuybyshev, SSAU, 1974, vol. 1, pp. 31-36.
14. Shmanev V.A., Filimoshin V.G., Karimov A.H. “Technology of electrochemical machining of parts in aircraft engine building”, Moscow, Mashinostroenie, 1986, 168 p.
15. Boldyrev A.I. “Simulation of combined electrochemical mechanical processing”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2010, vol.6, no. 2, pp. 141-145.
16. Boldyrev A.I. “Ensuring the accuracy of internal surfaces by electrochemical-mechanical treatment”, *Izvestiya Orlovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2008, no. 4-4/272, pp. 26-30.

## ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ТРАВЛЕНИЯ НИОБАТА И ТАНТАЛАТА ЛИТИЯ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, Е.А. Сизаск

В статье проведен сравнительный анализ кинетических особенностей процесса плазмохимического травления полированных монокристаллических образцов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  фторсодержащими радикалами. Эксперименты проводились на установке Corial D250 с реакционно-разрядной камерой диодного типа.

Данные о скорости травления позволяют дать количественную оценку процессу плазмохимического травления исследуемых материалов. Методом рентгеновской дифрактометрии установлено, что в процессе травления как ниобата, так и танталата лития образуется твердый продукт реакции – фторид лития ( $\text{LiF}$ ). Таким образом, следует говорить о типичных топохимических реакциях. При этом образование твердого продукта оказывает влияние на кинетику травления, что было выявлено с помощью анализа экспериментальных данных. Исследование временных зависимостей скорости травления показало рост в начальный период времени, наличие максимума и медленный спад при дальнейшем увеличении времени травления, что связано с тормозящим влиянием фторида лития на диффузию фторсодержащих радикалов к границе раздела  $\text{LiTaO}_3 - \text{LiF}$  ( $\text{LiNbO}_3 - \text{LiF}$ ). Величина подводимой мощности оказывает качественно подобное влияние для обоих материалов. Отличия носят лишь количественный, но зачастую значительный характер. При этом наблюдается нелинейный рост скорости травления при увеличении подводимой мощности

Ключевые слова: плазмохимия, ниобат лития, танталат лития

### Введение

В настоящее время технология плазменной обработки материала является ключевой для формировании рельефа при производстве приборов современной микроэлектроники, микросистемной техники и функциональной электроники. На данный момент выделяют несколько различных методов плазменной обработки (плазмохимическое травление, реактивное ионное травление, радикальное травление, ионно-лучевое травление и др.), каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Ниобат и танталат лития наиболее широко используемые соединения из ряда ниобатов и танталатов щелочных и щелочноземельных металлов. Набор уникальных свойств быстро вывели эти материалы из ряда перспективных в продукт промышленного производства. Однако отсутствие систематических данных по кинетике травления танталата лития не позволяет сформировать полную картину понимания физики процессов плазменной обработки. Целью данной статьи является сравнительный анализ кинетических особенностей травления монокристаллических образцов  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  во фторсодержащей плазме.

### Методика эксперимента и оборудование

Исследовалась кинетика травления ниобата и танталата лития во фторсодержащей плазме. В качестве объектов травления использовались полированные образцы Y-срезы, размером  $1 \times 1 \text{ см}^2$ .

Перед травлением образцы подвергались циклу отмывки в смеси КАРО ( $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4=3:7$ ) в течение 7 минут при  $T=130^\circ\text{C}$  для удаления органических загрязнений, затем промывались в деионизованной воде. После чего отмывались в RCA1 ( $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}=1:1:5$ ) в течение 5 минут при  $T=75^\circ\text{C}$ , далее проводилась отмывка в деионизованной воде.

Эксперименты по плазменной обработке проводились на установке Corial D 250 (Corial Company, Франция), оборудованной изотермическим плазменным реактором диодного типа с контролем температуры  $\pm 1^\circ\text{C}$ , которая обеспечивает возможность создания высокоплотной плазмы газового разряда при пониженном давлении. Схематическое устройство разрядной камеры представлено на рис. 1. Плазменный разряд зажигался при подаче ВЧ-мощности с генератора (максимальная мощность 300 Вт, частота 13,56 МГц). В качестве плазмообразующего газа использовался гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ). Эксперименты проводились при поддержании температуры подложки  $T=280^\circ\text{C}$ .

Методика определения скорости травления основана на изменении веса образцов до и после травления, при этом фторид лития ( $\text{LiF}$ ) - твердый продукт реакции предварительно удалялся выдерживанием в смеси RCA1 в течение 5 мин при  $T=75^\circ\text{C}$  и последующей отмывке в деионизованной воде.

Для расчета скорости реакции использовалась формула:

---

Коняев Иван Васильевич – ВГУ, аспирант,  
e-mail: [www.450\\_asd@mail.ru](mailto:www.450_asd@mail.ru)

Владимирова Людмила Николаевна – ВГУ, канд. хим. наук, доцент, e-mail: [lnvld@mail.ru](mailto:lnvld@mail.ru)

Бормонтов Евгений Николаевич – ВГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: [me144@phys.vsu.ru](mailto:me144@phys.vsu.ru)

Буслов Вадим Александрович – АО «НИИЭТ», отдел 36, лаб. 362, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: [vadbus@mail.ru](mailto:vadbus@mail.ru)

Сизаск Елена Александровна – ВГАУ им. Петра I, аспирант, e-mail: [hilda04091996@mail.ru](mailto:hilda04091996@mail.ru)

$$V_{\text{тр}} = \frac{m_0 - m}{\rho S t},$$

где  $S$  - площадь подвергаемая травлению,  $m_0$  - начальная масса образца,  $m$  - конечная масса

образца,  $\rho$  - плотность (ниобат лития - 4.65 г/см<sup>3</sup>, танталат лития - 7.46 г/см<sup>3</sup>),  $t$  - время травления.

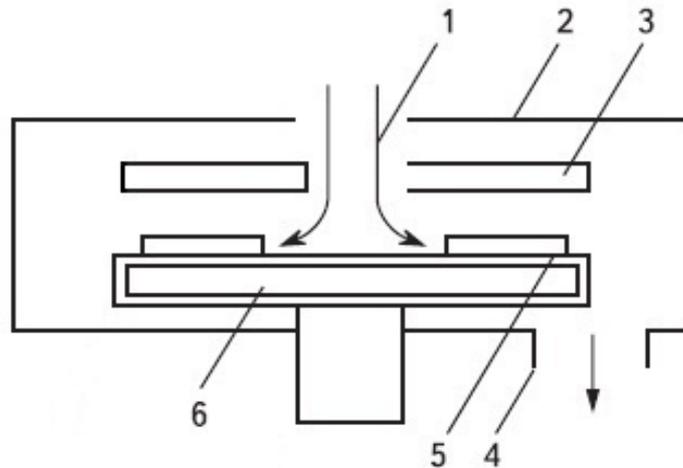


Рис. 1. Схематическое представление камеры установки плазменного травления: 1 - подача рабочего газа, 2 - вакуумная камера, 3 - электрод, 4 - откачной патрубков, 5 - образец, 6 - подложкодержатель

#### Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены временные зависимости кинетики травления ниобата и танталата лития. Такие зависимости характерны для реакций газа с твердым телом, при которых образуется хотя бы один твердый продукт. Ранее в работах [1-3] по изучению кинетики плазмохимического травления (ПХТ) ниобата лития установлено, что на поверхности исследуемого материала образуется слой твердого продукта реакции (LiF). Характер зависимости для танталата лития аналогичен ввиду близкого химического родства данных материалов. На рисунке 4 представлена дифрактограмма, отражающая фазовый состав танталата лития с твердым продуктом реакции после процесса травления. Исследования образцов проводились в сотрудничестве с Ивковым Сергеем (аспирантом кафедры ФТТ ВГУ) на установке ДРОН-04 в монохроматизированном  $\text{CoK}_\alpha$ -излучении. Съемка образцов осуществлялась при ускоряющем напряжении на рентгеновской трубке 29 кВ и анодном токе 25 мА. Запись интенсивности рассеянного рентгеновского излучения проводилась в режиме сканирования (по точкам). Шаг сканирования составлял 0,05°. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека порошковой дифракции Powder Diffraction File (PDF). Данные показали наличие пика фторида лития и незначительные пики иных фаз, состав которых на данном этапе не удалось определить. Таким образом, процессы плазменного травления ниобата и танталата лития являются типичными

топохимическими процессами. При этом сообщается, что температуры кипения основных летучих продуктов реакции для данных материалов близки, так  $T_{\text{кип}}(\text{NbF}_5)=225^\circ\text{C}$ , а  $T_{\text{кип}}(\text{TaF}_5)=230^\circ\text{C}$  [4]. Однако, как видно, разница в скоростях травления для танталата лития значительно (в 8-15 раз) ниже, чем для ниобата лития при схожих технологических режимах.

Возможным объяснением данных результатов может служить как существенное отличие в энергии связей внутри исследуемых материалов, так и различный состав и газовая динамика продуктов процесса травления.

На рис. 5 и 6 представлены кривые, описывающие влияние подводимой мощности на скорости травления. Этот параметр является основным энергетическим фактором, определяющим внутренние характеристики газоразрядной плазмы – энергию, концентрацию, функцию распределения частиц по энергиям и др. С изменением мощности могут изменяться не только физические характеристики, но и химический состав газоразрядной плазмы, что сказывается как на абсолютных, так и на относительных скоростях травления. Наблюдаемый на рисунке рост скорости с увеличением подводимой мощности обычно объясняют увеличением скорости генерации химически активных частиц (ХАЧ) в разрядной камере в результате электронного удара. Сравнивая графики для ниобата и танталата лития, стоит отметить сохранение общей динамики изменения скорости во всем исследуемом диапазоне мощностей.

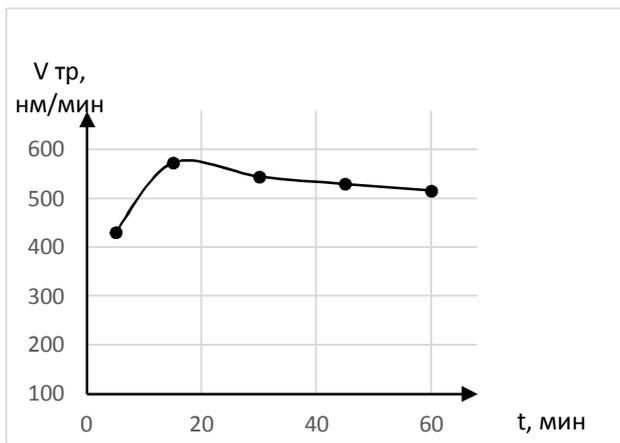


Рис. 2. Временная зависимость скорости травления  $\text{LiNbO}_3$  в плазме  $\text{SF}_6$   
 $T=280^\circ\text{C}$ ,  $P=190$  Па,  $W=250$  Вт

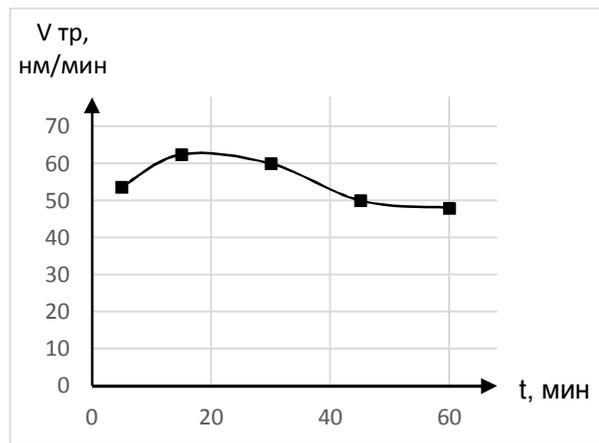


Рис. 3. Временная зависимость скорости травления  $\text{LiTaO}_3$  в плазме  $\text{SF}_6$   
 $T=280^\circ\text{C}$ ,  $P=190$  Па,  $W=250$  Вт

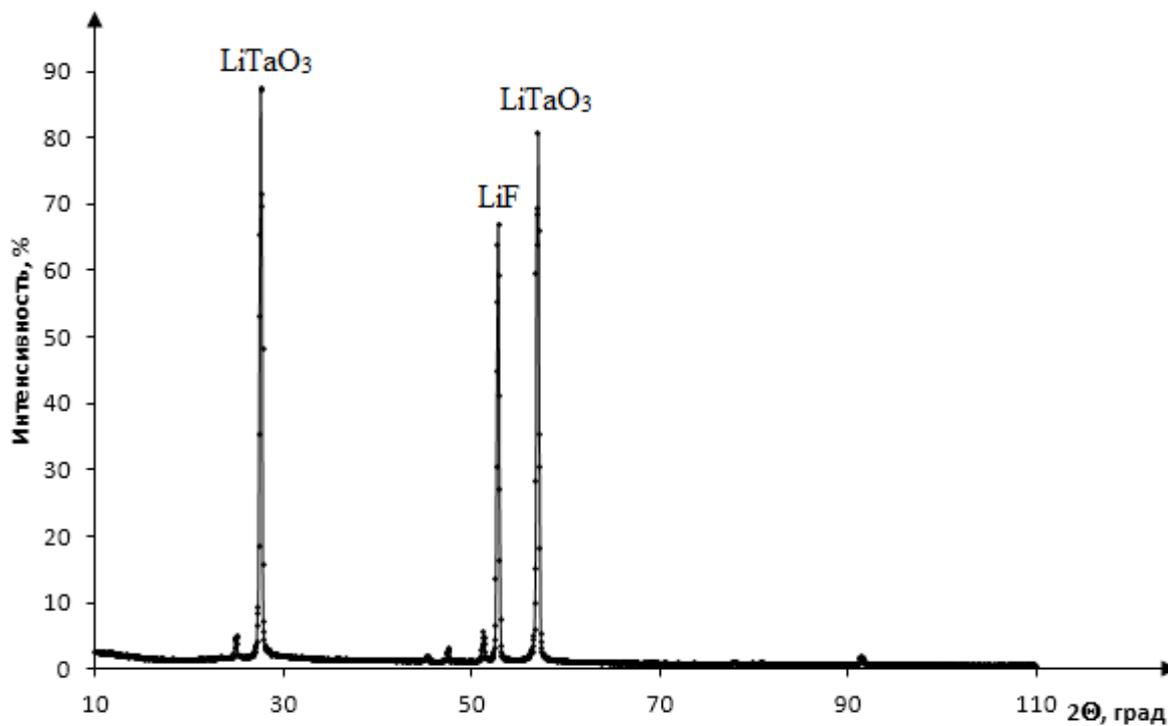


Рис. 4. Дифрактограмма продуктов травления, полученных на поверхности  $\text{LiTaO}_3$

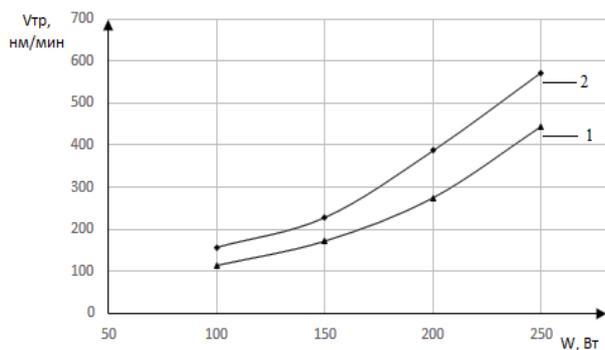


Рис. 5. Влияние подводимой мощности на скорость травления LiNbO<sub>3</sub>

1- T=280°C, P=210 Па, t=15 мин

2- T=280°C, P=190 Па, t=15 мин

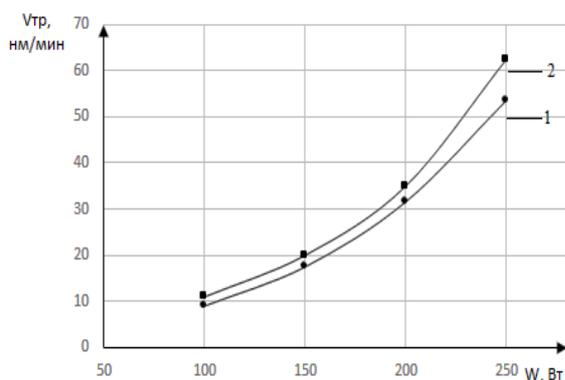


Рис. 6. Влияние подводимой мощности на скорость травления LiTaO<sub>3</sub>

1- T=280°C, P=210 Па, t=15 мин

2- T=280°C, P=190 Па, t=15 мин

## Заключение

Анализ фазового состава твердого продукта травления подтвердил гипотезу образования фторида лития в качестве основного твердого продукта при плазменной обработке танталата лития. Близкое родство химического состава исследуемых материалов подтверждается сходством в кинетике плазменного травления, что подтверждается временной зависимостью и характерным влиянием подводимой мощности. При этом следует отметить, что несмотря на все вышеописанное, существует и значительное количественное отличие в значениях скоростей травления, вероятным объяснением которого может быть отличие в энергии связей внутри исследуемых материалов, так и различный состав и газовая динамика продуктов процесса травления.

## Литература

1. Гуляев, В.В. Травление LiNbO<sub>3</sub> фторсодержащими радикалами и получение нанопористого LiF на его поверхности / В.В. Гуляев, Ю.И. Дикарев, Е.Н. Бормонтов // Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (индустрия наносистем и материалы): материалы VII Всерос. конф.-шк. – Воронеж, 2009. – С. 103-106.

2. Гуляев, В.В. Формирование гетероструктур “нанопористый LiF-LiNbO<sub>3</sub>” / В.В. Гуляев, Ю.И. Дикарев, Е.Н. Бормонтов // Нелинейные процессы и проблемы самоорганизации в современном материаловедении (индустрия наносистем и материалы): материалы VII Всерос. конф.-шк. – Воронеж, 2009. – С. 106-109.

3. Высокоскоростное плазмохимическое травление ниобата лития / В.В. Гуляев, Ю.И. Дикарев, В.М. Рубинштейн, С.М. Цветков, Е.Н. Бормонтов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2010. – Т. 12, № 4. – С. 360-368.

4. Зеликман, А.Н. Ниобаты и танталаты / А.Н. Зеликман, Б.Г. Коршунов, А.М. Захаров // Производственное издание. - М.: Металлургия, 1990. – 296 с.

Воронежский государственный университет

АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж

Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I

## PECULIARITIES OF THE ETCHING KINETICS OF LITHIUM NIOBATE AND TANTALATE IN A FLUORINE-CONTAINING PLASMA

I.V. Konyaev<sup>1</sup>, L.N. Vladimirova<sup>2</sup>, E.N. Bormontov<sup>3</sup>, V.A. Buslov<sup>4</sup>, E.A. Sizask<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Graduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: www.450\_asd@mail.ru

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

<sup>3</sup>Full DoctorProfessor Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: me144@phys.vsu.ru

<sup>4</sup>PhD, Researcher, JSC "NIIET" Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vadbus@mail.ru

<sup>5</sup>Graduate student, Voronezh State Agrarian University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: hilda04091996@mail.ru

A comparative analysis of the kinetic features of the plasma-chemical etching process of single-crystal polished samples of  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  by fluorine-containing radicals is carried out in the article. Experiments were performed on a Corial D250 with a diode-type reaction chamber.

Data on the etching rate make it possible to quantify the process of plasma-chemical etching of the studied materials. X-ray diffractometry showed that during the etching of both niobate and lithium tantalate, a solid reaction product, lithium fluoride (LiF), is formed. Thus, one should speak of typical topochemical reactions. The formation of a solid product affects the kinetics of etching, which was revealed by analyzing the experimental data. Investigation of the time dependences of the etching rate showed an increase in the initial period of time, the presence of a maximum and a slow decline with a further increase in the etching time, which is due to the inhibitory effect of lithium fluoride on the diffusion of fluorine-containing radicals to the  $\text{LiTaO}_3\text{-LiF}$  ( $\text{LiNbO}_3\text{-LiF}$ ) interface. The magnitude of the input power has a qualitatively similar effect for both materials. Differences are only quantitative, but often significant. In this case, nonlinear growth of the etching rate is observed with increasing input power

Key words: plasma chemistry, lithium niobate, lithium tantalate

### References

1. Gulyaev V.V., Dikarev Yu.I., Bormontov E.N. «The etching of  $\text{LiNbO}_3$  by fluorine-containing radicals and the production of nanoporous LiF on its surface», *Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii-shkoly «Nelineinye protsessy i problemy samoorganizatsii v sovremennom materialovedenii (industriya nanosistem i materialy)*, Voronezh, 2009, pp. 103-106.
2. Gulyaev V.V., Dikarev Yu.I., Bormontov E.N. Making of heterostructures "nanoporous  $\text{LiF-LiNbO}_3$ ", *Materialy VII Vserossiiskoi konferentsii-shkoly «Nelineinye protsessy i problemy samoorganizatsii v sovremennom materialovedenii (industriya nanosistem i materialy)*, Voronezh, 2009, pp. 106-109.
3. Gulyaev V.V., Dikarev Yu.I., Rubinshtein V. M., Tsvetkov S. M., Bormontov E.N. «High-speed plasmachemical etching of lithium niobate», *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*. – 2010. – T. 12, № 4. – pp. 360-368.
4. Zelikman A.N., Korshunov B.G., Zaharov A.M. «Niobates and tantalates» (Proizvodstvennoe izdanie). M.: Metallurgiya, 1990, 296 p.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ

**М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин, А.А. Лялин**

В данной статье рассмотрены технологические процессы получения препрегов на основе растворных и расплавных связующих. С учётом требований, предъявляемых к свойствам материала, адаптированного для автоматизированной выкладки с использованием комплекса выкладки MAG Viper 1200, выбраны исходные армирующие наполнители и полимерные связующие растворного и расплавного типа. Отработаны оптимальные режимы получения препрега на основе однонаправленных углеродных лент с использованием нитей Formosa TC-35 12K, а также углеродных лент марок ЛУ/П и УОЛ-300Р с применением растворного связующего марки ЭНФБ и расплавных клеевых связующих марок Т-6815 и Т-107. В процессе отработки режимов изготовления адаптированного технологического материала получены партии препрега по каждому режиму и проведены исследовательские испытания их физико-механических свойств на соответствие заданным эксплуатационным характеристикам выбранного класса материалов авиационного назначения.

Исследовательские испытания позволили собрать массив теоретических данных, позволяющих установить связь между прочностными свойствами партий технологического материала и входными управляемыми параметрами процесса пропитки. Полученные данные послужили основой для создания математической модели технологического процесса получения технологического материала с заданными эксплуатационными свойствами.

В результате проведенной работы разработан оптимальный технологический процесс изготовления материала (препрега) для процесса автоматизированной выкладки и определены материалы, обладающие наилучшей технологичностью для последующей переработки с целью их адаптации согласно требованиям, предъявляемым для комплексов выкладки на примере установки MAG Viper 1200

Ключевые слова: препрег, автоматизированная выкладка, технология изготовления, растворное и расплавное связующее, полимерные композиционные материалы, технологичность

### Введение

Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают уникальными характеристиками, такими как прочность, легкость и стойкость к условиям окружающей среды, что обусловило их применение при производстве легких и сверхлегких высоконагруженных изделий и конструкций в различных областях промышленности.

Широкое применение композиционных материалов наблюдается в авиационной и ракетно-космической отрасли промышленности. Кроме того, ПКМ на основе наполнителей из стекло- и углеволокна являются перспективными материалами для применения в области альтернативной энергетики при проектировании и производстве лопастей ветрогенераторов и подложек солнечных батарей. Такое обширное применение обусловлено стремлением увеличить долю полезного переносимого веса, путем снижения

массы несущей конструкции, без снижения прочностных характеристик.

В авиастроении изготовление изделий из ПКМ на основе препреговой технологии является одним из перспективных направлений производства. Применение препрегов позволяет изготавливать агрегаты сложной конфигурации за одну технологическую операцию, что обеспечивает сокращение технологического цикла производства, трудоёмкости и энергоёмкости. В конструкциях современных самолётов доля ПКМ может достигать пятидесяти процентов, и производители стремятся ее увеличить.

Долгое время изготовление изделий по препреговой технологии осуществлялось с применением ручной выкладки, но в условиях растущей конкуренции и необходимости массового производства крупногабаритных ответственных изделий из ПКМ возникает потребность в применении оборудования автоматизированной выкладки. Переход от ручной к автоматизированной выкладке позволит повысить качество получаемых деталей, существенно сократить трудоёмкость их изготовления, увеличить точность и повторяемость технологического процесса выкладки (снизить брак), повысить коэффициент используемого технологического материала (препрега) и, как следствие, сократить себестоимость готового изделия.

Несмотря на все преимущества использования оборудования для автоматизированной выкладки, единичность их применения в авиационной отрасли связана не столько с высокой стоимостью комплексов, как с отсутствием отечественных материалов, адаптированных для

Воскобойник Максим Юрьевич – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, инженер, тел. 8(950) 7617667

Караева Оля Анатольевна – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, тел. 8(909)2111260

Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел. 8(951) 5569251

Полухин Денис Вадимович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, инженер, тел. 8(951) 5651235

Лялин Александр Анатольевич – ПАО «ВАСО», заведующий лабораторией, тел. 8(904) 2125026

автоматизированных процессов, обладающих достаточной технологичностью для эффективной их переработки комплексами типа MAG Viper. К тому же уровень приобретенных российскими инженерами и технологами компетенций в последнее время достаточен для осуществления процесса перевода сложных композиционных структур на автоматизированную выкладку. Этому способствует в частности наличие широкого спектра программного обеспечения, позволяющего производить эффективное программирование сложных форм композита.

В настоящее время рынок композиционных материалов представляет достаточно широкую номенклатуру препрегов с возможностью применения при производстве конструкций с различными условиями эксплуатации, однако каждый вид материала требует отработки технологического процесса выкладки и зачастую не всегда удовлетворяет критериям технологического оборудования. Вопрос в адаптации существующего технологического материала и в разработке технологии его изготовления для автоматизированной выкладки является самым главным в технологическом цикле производства готового изделия.

При разработке технологии изготовления технологического материала для процесса автоматизированной выкладки необходимо подобрать исходные материалы – армирующий наполнитель, полимерную матрицу (связующее) и технологическую подложку. Подбор материалов происходит с учётом особых требований, предъявляемых к качеству препрегов по прочности, размерной точности и стабильности свойств.

Большинство требований удастся выполнить путем использования углеродных волокон, имеющих близкий к нулевому значения коэффициент термического расширения и высокие прочностные характеристики.

Для метода автоматизированной выкладки, как правило, используют препреги на основе однонаправленных лент (без поперечной уточной нити) для обеспечения точности последующей порезки материала на тонкие жгуты требуемой ширины. Порезка препрега осуществляется вдоль направления нитей основы, без перерезания углеродных волокон [1].

Связующее подбирается таким образом, чтобы получаемый препрег обладал достаточной липкостью и драпируемостью. Уровень липкости определяет возможность удержания препрега на оснастке при выкладке и последующем формовании, а драпируемость определяет эластичность и гибкость препрега и характеризует возможность его выкладки на оснастку любой сложности. Во избежание пористости получаемого изделия с последующим ухудшением механических характеристик необходимо уменьшить содержание растворенной влаги в препреге [2].

Технологическую подложку подбирают с учётом того, чтобы она легко отделялась от

препрега при любой температуре и скорости выкладки, но при этом не отделялась самостоятельно при порезке и перематке препрега.

Подводя итог вышеизложенному – переход к методу автоматизированной выкладки связан с необходимостью создания и отработки технологического процесса получения препрега обладающего всеми необходимыми свойствами и соответствующего требованиям, предъявляемым к технологическому материалу, используемому на конкретном оборудовании.

С учётом конструкционных и технологических требований с целью разработки технологии изготовления технологического материала для процесса автоматизированной выкладки на примере применения на комплексе MAG Viper 1200 были выбраны ряд исходных материалов для исследовательских испытаний разрабатываемой технологии. В качестве армирующего наполнителя были выбраны углеродная однонаправленная лента на основе нитей Formosa TC-35 12K с утком ВМПС и безутковая лента на основе нитей Formosa TC-35 12K, а также углеродные ленты марок ЛУ/П и УОЛ-300Р широко применяемые в промышленности. В качестве полимерной матрицы использовали связующее расплавно-го типа марок Т-6815 и Т-107, а также связующее на растворной основе марки ЭНФБ.

#### **Методика эксперимента**

Все исходные материалы подвергались входному контролю для проверки соответствия контрольных параметров значениям, указанным в сопроводительной нормативно технической документации (НТД). Перечень испытаний для проведения входного контроля специфичен и определялся для каждого вида выбранных материалов отдельно в соответствии с НТД.

Отработка технологических режимов изготовления препрегов на растворной и расплавно-й полимерной основе проводилась на опытном технологическом комплексе пропитки СОС.Т.А. Комплекс пропитки (пропиточная линия) позволяет осуществлять пропитку армирующего материала полимерным связующим различными методами, что позволяет получать технологический материал с применением различных технологий без перестройки рабочих модулей и управляющих систем.

В процессе отработки технологических режимов получения препрегов на растворной основе применялась пропитка путем пропускания наполнителя через ванну с полимерным составом. Схема получения материала представлена на рис. 1.

При заправке линии углеродный материал 1 помещался на размотчик Р1, пропускать через систему валков и каландров, проходил через ванну с растворным связующим 2. Затем пропитанная углеродная лента отжималась на каландрах К2 проходила через ИК-печь 4, где при определенном температурном режиме производилось регулирование количества растворителя путём

удаления его паров (процесс сушки) и затем подсушенный липкий технологический материал (препрег) накладывался на технологическую подложку 3. Далее, на узле контроля качества 7, в реальном времени производился контроль наноса связующего в препреге системой QMS-12 MAHLO, после чего материал запаковывался, наматывался в рулон 9, маркировался и поступал на хранение [3].

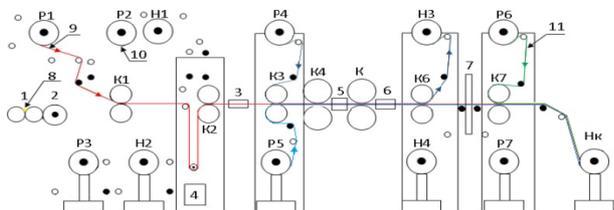


Рис. 1. Технологическая схема получения препрегов на основе растворных связующих на комплексе пропитки COS.T.A:

1 – углеродная лента, 2 – ванна с растворным связующим, 3 – отжимные валы (K2), 4 – ИК-печь, 5 – технологическая подложка, 6 – вспомогательный материал, 7 – система контроля качества препрега QMS-12 MAHLO, 8 – упаковочный материал, 9 – рулон препрега, P1-P7 – размотчики, H1-H4 – намотчики, K1-K7 – каландры

При отработке технологических режимов получения препрегов на основе расплавных связующих происходил перенос расплавленного клеевого состава на бумажную подложку, затем состав совмещался с армирующим материалом, после чего, при прохождении через систему горячих валов, происходила пропитка. Схема получения материала представлена на рис. 2.

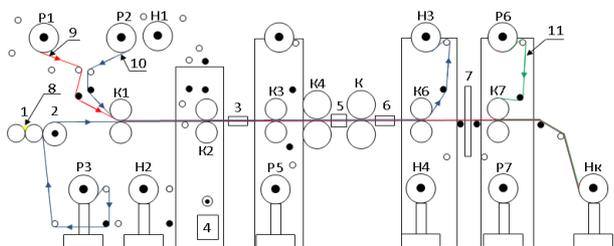


Рис. 2. Схематическое изображение заправки ленты и вспомогательных материалов:

1 – дозирующие валы, 2 – ламинирующий вал, 3 – ИК-печь, 4 – нагревательная панель, 5 – охлаждающий стол, 6 – система контроля качества препрега QMS-12 MAHLO, 7 – связующее, 8 – углеродная лента, 9 – бумага, 10 – пленка, P1-P7 – размотчики, H1-H4 – намотчики, K1-K7 – каландры

При заправке линии на размотчиках P3 и P2 помещались рулоны антиадгезионной бумаги, нижний из которых выступал в роли подложки для расплавленного клеевого состава, наносимого путём переноса при прохождении через ламинирующий вал. Рулон углеродного материала 8 помещался на размотчик P1, пропускался через систему валков и накладывался на подложку с расплавленным клеевым составом, а также закрывался верхней бумагой при прохождении через каландры K1.

Далее углеродная лента, составленная с клеевым составом между слоями антиадгезионной бумаги, проходила через горячие каландры K4, K5 и нагревательную панель 4, где происходило подплавление клеевого состава и пропитывание им углеродного наполнителя. Затем пропитанный материал охлаждался путём обдува на столе 5, после чего происходил съём и смотка верхней бумаги и контроль наноса связующего на системе контроля качества препрега QMS-12 MAHLO. После прохождения препрега контроля материал закрывался плёнкой 10 и наматывался на конечном намотчике H<sub>к</sub>. По завершении процесса пропитки рулон полученного материала маркировался и передавался на хранение.

В процессе получения препрега производился экспресс-анализ среднего значения поверхностной плотности и содержания связующего технологического материала. Для материала на основе растворного связующего кроме приведенных характеристик проводится контроль летучих компонентов. Образцы препрега для экспресс-анализа брались путем вырубki в начале, в середине и в конце ленты получаемой по одному режиму.

Отработка технологического процесса получения оптимального технологического материала происходила путем изменения технологических параметров, которые оказывали влияние на характеристики конечного материала. Совокупность значений установленных технологических параметров принималась за отдельный обрабатываемый технологический режим, а препрег, полученный по этому режиму, принимался за отдельную партию.

В процессе отработки оптимального режима получения материала варьировались такие управляющие параметры, как зазоры каландров, скорость линии и калибровка скорости вращения ламинирующего вала относительно скорости линии. Изменения технологических параметров при отработке оптимального режима на примере получения препрега на основе безутковой углеродной ленты Formosa TC-35 12K и связующего T-107 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Выборка режимов получения препрега на основе безутковой ленты Formosa TC-35 12K и связующего T-107

№	Скорость линии м/мин	Зазор в ламинирующих валах, мкм	Калибровка ламинирующего вала, %	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Определенное содержание связующего в препреге, %
1	0,55	67,5	-33	273	27,5
2	0,65	116,5	-27	304,9	35
3	0,85	151,5	-35	339,4	41,7
4	1,05	137,5	-47	319,1	37,9
5	1,35	95,5	-37	275,3	28,1
6	1,65	60,5	-29	262,9	24,7

От каждой партии полученного препрега отбирались пробы, которые передавались на участок формования, где изготавливались пластины методом прямого прессования и вырезались элементарные образцы для проведения сравнительных физико-механических испытаний. Направление выкладки технологического материала и количество слоев выбиралось согласно методикам, разработанным на основе стандартов ASTM, и требованиям к технологическому материалу указанными в НТД.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к технологическому материалу, разрабатываемому для получения изделия методом автоматизированной выкладки, проводились физико-механические испытания на определение предела прочности при растяжении, сжатии, сдвиге в плоскости листа и межслоевом сдвиге. Испытания на растяжение и сжатие проводилось на образцах с ориентацией выкладки слоев вдоль направления волокон. Все испытания проводились при нормальных условиях.

Собранный массив данных при отработке оптимального режима получения технологического материала для каждой комбинации исходных материалов, послужил основой для создания математической модели технологического процесса изготовления материала (препрега) с заданными эксплуатационными параметрами [4].

### Результаты и обсуждения

Разработка оптимального технологического режима изготовления технологического материала сопровождалась проведением исследовательских испытаний экспериментальных образцов. Комплекс физико-механических испытаний был проведен для каждого отработанного режима изготовления препрега (для каждой партии материала). Результаты испытаний по каждой из партий, показавшие наилучшие значения выходных показателей, представлены в табл. 2.

Из полученных данных физико-механических испытаний следует, что экспериментальные образцы ПКМ, полученные на основе препрегов с применением растворных связующих (в частности ЭНФБ) обладают достаточно высокими прочностными характеристиками по всем видам испытаний, но существенно уступают образцам ПКМ, полученным на основе расплавных клеевых связующих, особенно в технологичности материалов для дальнейшей переработки и адаптации для комплекса автоматизированной выкладки.

Материал, полученный с использованием углеродной однонаправленной безутковой ленты на основе нитей Formosa TC-35 12K пропитанной расплавным связующим T-6815 обладает достаточно высокими прочностными свойствами, однако анализ органолептических параметров показал, что данный препрег очень липкий и достаточно сложно отделяется от технологической подложки, что не соответствует требованиям, предъявляемым к

материалу, разрабатываемому для процесса автоматизированной выкладки.

Наиболее высокие прочностные характеристики были получены при сочетании углеродной ленты на основе нитей Formosa 12K со стекляннм утком ВМПС и расплавного связующего на эпоксидной основе T-107. Однако наличие уточной нити при порезке материала приводит к смещению и перерезанию нитей основы, короблению, сминанию и другим дефектам, что говорит о низкой технологичности материала для метода автоматизированной выкладки

Таблица 2  
Результаты исследовательских испытаний

Наименование углепластика ПКМ	$\sigma_p$ и $E_p$ , МПа/ ГПа (ASTMD 3039)	$\sigma_{сж}$ , МПа, (ASTMD 695)	$\tau_{12}$ и $G_{12}$ , МПа/ ГПа, (ASTMD 3518)	$\tau_{13}$ , МПа, (AST M D 2344)
ЛУ/П + ЭНФБ	1060,64/ 180,92	819,2	66,22/ 16,91	43,9
УОЛ-300Р + ЭНФБ	1719,09/ 146,39	510,8	144,80/ 22,30	52,3
Безутковая лента на основе нитей Formosa TC-35 12K + T-6815	1871,66/ 112,66	1133,5	112,66/ 4,10	93,3
Безутковая лента на основе нитей Formosa TC-35 12K + T-107	1887,21/ 135,56	1004,7	154,27/ 15,69	60,4 1
Лента на основе Formosa TC-35 12K/ ВМПС + T-107	1914,24/ 158,95	1201,8	171,56/ 22,28	90,7

$\sigma$ , МПа - предел прочности при растяжении и сжатии;  $E$ , ГПа - модуль упругости при растяжении;  
 $\tau_{12}$ , МПа – предел прочности при сдвиге в плоскости листа;  $G_{12}$ , ГПа – модуль сдвига;  
 $\tau_{13}$ , МПа - предел прочности при межслоевом сдвиге.

Исходя из особых требований, предъявляемых материалу для автоматизированной выкладки использование в качестве препрега углеродной однонаправленной безутковой ленты на основе нитей Formosa TC-35 12K пропитанной расплавным связующим T-107 значительно упростило процесс порезки и выкладки материала, благодаря отсутствию уточной нити. Анализ органолептических параметров показал, что препрег обладает умеренной липкостью, что позволяет легко отделять технологическую подложку во время процесса выкладки материала, не происходит налипания и наволакивания. Таким образом, это сочетание может быть наиболее предпочтительным при изготовлении изделия методом автоматизированной выкладки.

### Заключение

При разработке технологии изготовления технологического материала для процесса

автоматизированной выкладки проведена отработка оптимального режима получения препрега, удовлетворяющего требованиям осуществления автоматизированной выкладки с применением комплекса MAG Viper 1200.

На основе полученных партий технологического материала проведены исследовательские испытания физико-механических характеристик элементарных образцов ПКМ. Анализ полученных данных показал, что применение препрегов на растворной основе в качестве основных материалов для получения изделий из ПКМ с заданными эксплуатационными характеристиками не эффективно, ввиду низких прочностных характеристик, по сравнению с образцами на основе расплавленного связующего Т-107. Кроме того, наличие летучих компонентов в препрегах на основе растворного связующего может приводить к пористости выкладываемого изделия. Сравнение органолептических свойств препрегов позволило сделать вывод о лучшей технологичности материала на основе расплавленных связующих, такого как Т-107.

Разработана оптимальная технология изготовления технологического материала для процесса автоматизированной выкладки и получен материал, наиболее удовлетворяющий требованиям

осуществления процесса выкладки с применением комплекса MAG Viper 1200.

#### Литература

1. Технологические особенности получения материала для средств автоматизированной выкладки на примере MAG VIPER 1200 / М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - №1. - С. 8-10
2. Гусев Ю.А. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP / Ю.А. Гусев, А.В. Борщев, А.В. Хрульков // Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ». - 2012. - №3. - Ст. 06 (viam-works.ru).
3. Технология получения и физико-химические свойства препрегов ЛУ-П-0,1 + ЭНФБ и углепластиков на их основе / О.А. Караева, А.М. Кудрин, А.В. Калгин, О.В. Овдак // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 6. - С. 60-62.
4. Prediction of polymer composite material products using neural networks / A.V. Gaganov, O.A. Karaeva, A.M. Kudrin, A.V. Kretinin, A.A. Gurtovoy // International Conference on Innovative Material Science and Technology. 2016. P. 398-405.

НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «Инновационные технологии в авиастроении»  
Воронежского государственного технического университета  
ПАО «Воронежское акционерное самолётостроительное общество»

## DEVELOPING TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF THE MATERIAL FOR THE AUTOMATED LAYOUT

**M.Yu. Voskoboynik<sup>1</sup>, O.A. Karaeva<sup>2</sup>, A.M. Kudrin<sup>3</sup>, D.V. Polukhin<sup>4</sup>, A.A. Lyalin<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Engineer, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: mukluyd@gmail.com

<sup>2</sup>PhD, Researcher, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru.

<sup>3</sup>PhD, Head of the NVL "Composite Materials", Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kudrin.ru@gmail.com.

<sup>4</sup>Engineer, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: karapusha.89@mail.ru.

<sup>5</sup>Head of the Laboratory, Voronezh Joint-Stock Aircraft Building Company, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lyalin.aa@yandex.ru

In this article, technological processes of obtaining prepregs with the use of solution and melt binders are considered. Taking into account the requirements for the properties of the material used for automated computation using the MAG Viper 1200 complex as an example, initial reinforcing fillers and polymer binders of solution and melt type have been chosen. Optimum regimes for the preparation of a prepreg based on unidirectional carbon tapes using Formosa TC-35 12K yarns as well as LU/P and UOL-300R carbon tapes using the ENFB solvent binder and hot-meltempoxy T-6815 and T-107 have been worked out. In the process of working out the modes of obtaining the material, batches of prepreg have been obtained for each mode and research tests of physical and mechanical properties were carried out.

An array of data has been collected for changing the properties of the obtained batches of prepreg for each mode when the control parameters are changed. The obtained data served as the basis for creating a mathematical model for obtaining a technological material with specified properties.

As a result of the research tests, the technology of manufacturing of the technological material was developed and materials were identified that best meet the requirements for the automated calculation process using the example of the MAG Viper 1200 complex

Key words: prepreg, automated calculation, manufacturing technology, solution and melt binder, polymer composite materials, processability

#### References

1. Voskoboinik M.Yu., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Polukhin D.V. «Technological features of obtaining a material for automated calculation tools on the example of MAG VIPER 1200», *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2015, Vol. 11, №1, pp. 8-10.
2. Gusev Yu.A., Borshchev A.V., Khrulkov A.V. «Peculiarities of prepreps for automated calculations using ATL and AFP methods» *Electronic scientific journal "WORKS OF VIAM"*, 2012, No. 3. - Art. 06 (viam-works.ru).
3. Karaeva O.A., Kudrin A.M., Kalgin A.V., Ovdak O.V. «Technology of production and physicochemical properties of prepreps LU-P-0.1 + ENPB and carbon-based plastics on their basis», *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2012, Vol. 8, No. 6, pp. 60-62.
4. Gaganov A.V., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Kretinin A.V., Gurtovoy A.A. «Prediction of polymer composite materials using neural networks», *International Conference on Innovative Material Science and Technology*, 2016, pp. 398-405.

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ НА ТВЕРДОСТЬ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Л.С. Печенкина

Объектом исследования являются комплексно-легированные белые чугуны для износостойких тонкостенных отливок, которые обладают необходимыми прочностью, твердостью и ударной вязкостью уже в литом состоянии, то есть без упрочняющей термической обработки. Задачей исследования является оценка условий структурообразования, которые формируют композиционную структуру сплавов, влияющую на механические свойства литых деталей, в частности, на твердость. Для исследования были выплавлены сплавы, состав которых находился в следующих пределах, %: 1,8-2,2 С; 2,5-4 Мn; 6-7 Cr; 6,5-8 V; до 1 Si. В связи с тем, что очень сильное влияние на свойства сплавов оказывает степень аустенизации их структуры, зачастую перекрывая влияние других факторов, все исследуемые сплавы были разбиты на несколько групп по количеству аустенита в их структуре (или по содержанию марганца как основного элемента-аустенизатора). Распределение сплавов по группам проведено на основе анализа зависимостей твердости от содержания марганца и степени аустенизации.

Определено, что различие в количественном влиянии карбидов MC и  $M_7C_3$  на твердость сплавов с 12 % аустенита в структуре небольшое, и поэтому повышение твердости зависит в основном от увеличения общего количества карбидов. Карбидообразование и в сплавах с 12-35 % марганца влияет на твердость слабо, а образование карбидов  $M_7C_3$  даже приводит к небольшому снижению твердости. Значительно повышают твердость в сплавах, содержащих более 30 % аустенита, карбиды MC (примерно в 3 раза сильнее, чем карбиды  $M_7C_3$ ).

Установлено, что комплексное легирование и модифицирование исследуемых малоуглеродистых белых чугунов позволяет существенно уменьшить общую степень легирования (особенно по ванадию) с сохранением достаточно высокой твердости (не менее HRC 57) даже при преобладании аустенитной структуры матрицы, что должно обеспечить у этих сплавов высокую конструктивную прочность и хорошие эксплуатационные свойства

Ключевые слова: белый чугун, хром, ванадий, легирование, твердость

### Введение

Объектом исследования являются комплексно-легированные белые чугуны для износостойких тонкостенных отливок, которые обладают необходимыми прочностью, твердостью и ударной вязкостью уже в литом состоянии, то есть без упрочняющей термической обработки. Задачей исследования является оценка условий структурообразования, которые формируют композиционную структуру сплавов, влияющую на механические свойства литых деталей, в частности на твердость. Для исследования были выплавлены сплавы, состав которых находился в следующих пределах, %: 1,8-2,2 С; 2,5-4 Мn; 6-7 Cr; 6,5-8 V; до 1 Si. При таком составе можно обеспечить сбалансированное содержание элементов с целью исключения из структуры эвтектики других карбидных фаз, кроме карбида MC. Известный композиционный характер такой структуры должен обеспечить сочетание высоких механических и эксплуатационных свойств [1, 2]. Отдельную группу составили сплавы, содержащие до 1,8 % меди, до 1,7 % молибдена.

### Методика эксперимента

Плавку сплавов проводили в индукционной тигельной печи с основной футеровкой.

Количество аустенита в структуре сплавов определялось с помощью рентгеноструктурного анализа на образцах, отлитых в песчаные формы. Важную информацию дал химический состав

карбидов при его использовании для определения количества в структуре сплавов каждого вида карбидов и для оценки морфологических особенностей структуры. В структуре исследуемых сплавов содержатся карбиды двух видов: MC (типа VC) и  $M_7C_3$  (типа  $Cr_7C_3$ ). Химический состав карбидов определен с использованием методов карбидного и рентгеноспектрального анализов.

Определены значения твердости для всех исследуемых сплавов в литом состоянии. Поскольку на каждом сплаве определялись 3-4 значения твердости, дальнейший анализ проведен по средним значениям твердости.

### Проведение исследования

Результаты определения твердости для всех исследуемых сплавов в литом состоянии приведены в табл. 1.

На рис. 1 приведены зависимости твердости от количества аустенита в структуре сплавов без меди (сплавы 1-25, зависимость 1) и сплавов с медью и другими дополнительными легирующими элементами (сплавы M1-M7, зависимость 2). После статистической обработки данных получены следующие уравнения для обеих зависимостей:

Твердость сплавов

Номер сплава	Твердость HRC		Номер сплава	Твердость HRC	
	интервал	средняя		интервал	средняя
1	51-53	52	17	57-59	58
2	58-61	59,5	18	61-63	62
3	51-53	52	19	61-63	62
4	60-62	61	20	43-46	44,5
5	59-61	60	21	62-64	63
6	60-62	61	22	50-52	51
7	47-50	48,5	23	47-50	48,5
8	60-62	61	24	55-58	56,5
9	45-48	46,5	25	50-52	51
10	60-62	61	M1	59-61	60
11	52-56	54	M2	56-58	57
12	53-54	53,5	M3	58-60	59
13	60-63	61,5	M4	58-60	59
14	61-63	62	M5	55-57	56
15	55-58	56,5	M6	56-60	58
16	56-57	56,5	M7	50-56	53

$$1) \quad HRC = 44,1 + 1,61 \cdot A - 0,047 \cdot A^2 + 0,00034 \cdot A^3; \quad (1)$$

$$HRC_{\max} \approx 60 \text{ при } A = 22,7 \%;$$

$$2) \quad HRC = 56,6 + 0,15 \cdot A - 0,0026 \cdot A^2 + 0,00034 \cdot A^3; \quad (2)$$

$$HRC_{\max} \approx 59 \text{ при } A = 28,5 \%.$$

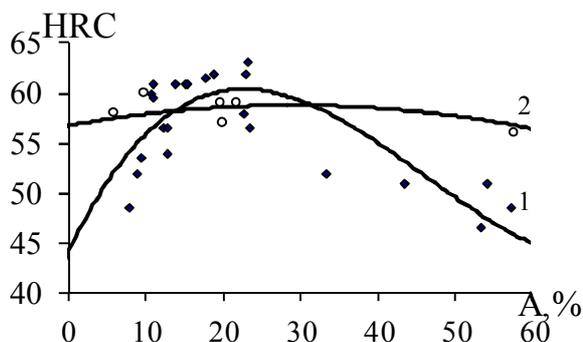


Рис. 1. Зависимость твердости от количества аустенита в структуре сплавов 1-25 (кривая 1) и M1-M7 (кривая 2)

Видно, что обе зависимости имеют максимум твердости при содержании аустенита (A) в структуре 20 - 30 %. Особенно четко экстремальный характер зависимости проявляется у сплавов без дополнительного легирования (т.е. для сплавов 1-25). По распределению твердости эти сплавы можно разбить на 3 группы:

1 группа сплавов, у которых с увеличением количества аустенита повышается твердость; это характерно для сплавов, имеющих в структуре до 12-13 % аустенита;

2 группа сплавов, у которых твердость мало зависит от степени аустенизации; к этой группе сплавов можно отнести сплавы, содержащие 13-25 % аустенита;

3 группа сплавов, у которых с увеличением количества аустенита твердость уменьшается, эти сплавы содержат более 30 % аустенита.

Поскольку количество аустенита в структуре сплавов хорошо коррелирует с содержанием марганца (см. рис.2), то удобнее разбивку сплавов на группы провести по содержанию марганца. Статистическая обработка проведена отдельно для сплавов 1-25 и для сплавов M1-M7. Получены следующие зависимости:

для сплавов 1-25

$$HRC = 35,9 + 25,89 \cdot Mn - 7,997 \cdot Mn^2 + 0,6631 \cdot Mn^3; \quad (3)$$

$$HRC_{\max} = 61,2 \text{ при } 2,25 \% \text{ Mn};$$

для сплавов M1-M7

$$HRC = 55,0 + 3,50 \cdot Mn - 0,774 \cdot Mn^2; \quad (4)$$

$$HRC_{\max} = 58,9 \text{ при } 2,26 \% \text{ Mn}.$$

Графически эти зависимости представлены на рис. 2. Зависимость 1 соответствует уравнению (1) для сплавов 1-25, зависимость 2 – уравнению (2) для сплавов M1-M7.

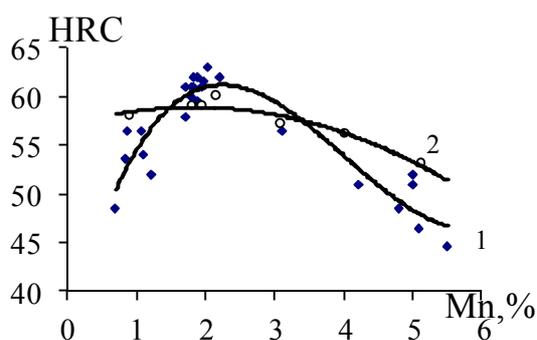


Рис. 2. Влияние марганца на твердость сплавов 1-25 (кривая 1) и M1-M7 (кривая 2)

По зависимости 1 высокие значения твердости  $HRC \geq 60$  обеспечиваются при содержании марганца 1,7-2,8 %. Поэтому сплавы с таким содержанием марганца можно отнести ко второй группе, сплавы с содержанием менее 1,7 % Mn – к 1 группе, сплавы с содержанием марганца более 2,8 % – к 3 группе.

Характер зависимости для первой группы сплавов (повышение твердости с увеличением количества марганца и содержания аустенита в структуре) объясняется тем, что марганец сильно увеличивает прокаливаемость сплавов. Поэтому легирование марганцем (в пределах 1 группы сплавов) приводит к увеличению в структуре сплавов количества троостита и мартенсита, но одновременно увеличивает и количество непревращенного аустенита. Повышение твердости связано с увеличением количества мартенсита в структуре матрицы сплавов.

У второй группы сплавов с увеличением содержания марганца происходит замена троостита мартенситом с увеличением количества аустенита вплоть до получения мартенситно-аустенитной структуры матрицы, причем влияние обоих структурных факторов на общую твердость сплавов практически уравнивается.

Для третьей группы сплавов характерна аустенизация структуры за счет уменьшения количества мартенсита, что естественно приводит к снижению твердости.

В количественном отношении несколько иначе влияет степень аустенизации на твердость сплавов с медью и дополнительным легированием (сплавы M1-M7). В этом случае экстремальный характер зависимости проявляется значительно слабее и достаточно стабильные и высокие значения твердости  $HRC \geq 57$  могут быть обеспечены у сплавов этой группы в широком интервале степени аустенизации (от 10 до 40 %). Объясняется это тем, что за счет комплексного легирования и модифицирования структура этих сплавов значительно измельчена, а аустенит подвержен дисперсионному упрочнению (упрочняющими фазами являются медистая фаза и карбиды). Поэтому сплавы этой группы не дифференцировались по степени аустенизации структуры. Исключение составляет сплав M7 с полностью аустенитной структурой матрицы и с резким отклонением химического состава сплава от оптимального.

Для сплавов 1-25 дальнейший анализ проведен по трем выделенным группам. Необходимые данные для анализа первой группы сплавов приведены в табл. 2

Таблица 2

Особенности химического состава, структуры и твердость сплавов 1 группы, содержащих до 1,7 % Mn

Номер сплава	Содержание, % мас.			Содержание в структуре, %			Средняя твердость HRC
	C	Mn	Cr	A	MC	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	
1	1,46	1,21	5,4	8,9	7,4	0	52
7	1,70	0,70	5,2	7,9	7,1	1,4	48,5
11	1,84	1,10	7,1	12,9	8,9	0	54
12	1,90	0,85	5,5	9,5	7,8	2,2	53,5
15	2,11	1,07	5,9	12,2	9,4	1,1	56,5
24	2,36	0,88	6,1	12,9	11,0	0,7	56,5

Регрессионный анализ проведен для оценки многофакторных зависимостей твердости от структуры (A, MC, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>). В линейном приближении эта зависимость имеет следующий вид:

$$HRC = 37,8 + 0,89 \cdot A + 0,65 \cdot MC + 0,64 \cdot M_7C_3; \quad (5)$$

Высокие значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о возможности использования полученных линейных зависимостей.

Видно, что различие в количественном влиянии карбидов MC и M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> на твердость сплавов небольшое и поэтому повышение твердости зависит в основном от увеличения общего количества карбидов.

Эта же зависимость подтверждает также сильное влияние частичной аустенизации структуры на повышение твердости сплавов.

Выборка сплавов второй группы приведена в табл. 3.

Таблица 3

Твердость и влияние на нее факторы для сплавов 2 группы, содержащих 1,7-2,8 % Mn

Номер сплава	Содержание, % мас.			Содержание в структуре, %			Средняя твердость HRC
	C	Mn	Cr	A	MC	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	
2	1,46	1,90	5,6	11,0	6,8	0	59,5
4	1,56	1,70	5,7	11,1	6,8	0,3	61
5	1,58	1,80	5,1	10,8	7,3	0	60
6	1,65	1,80	7,0	15,4	8,6	0	61
8	1,72	1,94	6,4	15,3	8,1	0	61
10	1,79	1,84	5,8	13,8	8,6	0	61
13	1,93	1,96	6,6	17,8	9,1	0	61,5
14	2,06	1,88	6,8	18,7	9,7	0,5	62
17	2,18	1,70	8,5	22,6	9,0	3,2	58
18	2,20	2,20	7,0	23,1	9,6	2,0	62
21	2,29	2,04	7,2	23,3	10,9	0	63

Статистическая обработка этих данных дает следующую зависимость:

$$HRC = 56,9 + 0,21 \cdot A + 0,13 \cdot MC - 1,26 \cdot M_7C_3. \quad (6)$$

Однако карбидообразование и в сплавах 2 группы влияет на твердость слабо, а образование карбидов M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> даже приводит к небольшому снижению твердости. По-видимому, это обусловлено тем, в высокотвердой мартенситно-аустенитной

матрице сплавов этой группы только очень твердые карбиды MC повышают среднюю твердость; замена же карбидов MC на карбиды M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> с меньшей твердостью при дефиците ванадия приводит к снижению твердости (в отличие от сплавов 1 группы). Снижение твердости может быть связано и с тем, что карбиды M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> частично выводят углерод и хром из аустенита, ухудшая тем самым закаляемость и прокаливаемость сплавов.

Выборка сплавов третьей группы приведена в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика сплавов 3 группы, содержащих более 2,8 % Mn

Номер сплава	Содержание, % мас.				Содержание в структуре, %			Средняя твердость HRC
	C	Mn	Cr	ΔV	A	MC	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	
3	1,51	5,0	5,4	+ 0,1	33,3	7,0	0	52
9	1,75	5,1	7,6	0	53,5	8,2	0	46,5
16	2,12	3,1	6,0	+ 1,8	23,5	8,1	4,0	56,5
20	2,28	5,5	7,3	+ 1,5	78,3	9,0	3,9	44,5
22	2,30	4,2	6,5	+ 1,7	43,4	9,1	4,0	51
25	2,35	5,0	5,4	+ 0,8	54,1	10,7	1,1	51

Регрессионный анализ этих данных дал следующие зависимости:

$$HRC = 52,2 - 0,24 \cdot A + 1,0 \cdot MC + 0,33 \cdot M_7C_3; \quad (7)$$

Видно, что значительно повышают твердость карбиды MC (примерно в 3 раза сильнее, чем карбиды M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>). Поэтому дефицит ванадия, приводящий к частичной замене карбидов MC карбидами

$M_7C_3$ , отрицательно сказывается на твердости сплавов

### Заклучение

В работе определены зависимости твердости малоуглеродистых белых чугунов от содержания структурообразующих компонентов. Установлено, что комплексное легирование и модифицирование исследуемых сплавов позволяет существенно уменьшить общую степень легирования с сохранением достаточно высокой твердости (не менее HRC 57) даже при преобладании аустенитной структуры матрицы, что должно обеспечить у этих сплавов высокую конструктивную прочность и хорошие эксплуатационные свойства.

Воронежский государственный технический университет

## THE IMPACT OF THE CONTENT OF STRUCTURE-GENERATING COMPONENTS ON THE LOW-CARBON WHITE CAST IRON FIRMNESS

L. S. Pechenkina

<sup>2</sup>PhD, Assistant, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: a.m.pechenkin@mail.ru

The object of the study are complex-alloyed white cast irons for wear-resistant thin-walled castings that have the necessary strength, hardness and toughness already in the cast state, that is, without hardening heat treatment. The objective of the study is to evaluate the conditions for the formation of structures that form the composite structure of alloys that affect the mechanical properties of cast parts, in particular hardness. For the investigation, alloys were made whose composition was within the following limits, %: 1.8-2.2 C; 2.5-4 Mn; 6-7 Cr; 6.5-8 V; Up to 1 Si. Due to the fact that the degree of austenization of their structure has a very strong influence on the properties of the alloys, often overlapping the influence of other factors, all the investigated alloys were divided into several groups by the amount of austenite in their structure (or by the content of manganese as the main element of the austenitizer). The distribution of alloys by groups was carried out on the basis of an analysis of the dependences of hardness on the manganese content and the degree of austenization.

It is determined that the difference in the quantitative effect of carbides MS and  $M_7C_3$  on the hardness of alloys with 12% austenite in the structure is small and therefore the increase in hardness depends mainly on an increase in the total amount of carbides. Carbide formation in alloys with 12-35% manganese affects the hardness weakly, and the formation of carbides  $M_7C_3$  even leads to a slight decrease in hardness. Significantly increase the hardness in alloys containing more than 30% austenite carbides MS (about 3 times stronger than carbides  $M_7C_3$ ).

It has been established that the complex alloying and modification of the investigated low-carbon white cast iron allows to significantly reduce the overall doping level (especially in vanadium) while maintaining a sufficiently high hardness (at least HRC 57) even with the predominance of the austenite matrix structure, which should provide high structural strength for these alloys and Good operational properties

Key words: white cast iron, chromium, vanadium, alloying, hardness

### References

1. Pechenkina L.S. «Development of wear-resistant self-hardening alloys for thin-walled precision parts»: Dis. Cand. Tech. Sciences: 05.16.01: it is protected 20.06.2000: it is approved. 12.12.2000, Kursk, 2000., 193 p.
2. Pechenkina, L.S. Silman G.I., Rukavitsyna A.A. «Effect of chromium and vanadium on the composite structure in low-carbon white cast irons», *Bulletin of Voronezh State Technical University* (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2015, Vol.11, No. 6, pp.13-17.

### Литература

1. Печенкина, Л.С. Разработка износостойких самозакалывающихся сплавов для тонкостенных точнолитых деталей: Дис. канд. техн. наук: 05.16.01 : защищена 20.06.2000 : утв. 12.12.2000 / Л.С. Печенкина–Курск, 2000. - 193 с.
2. Печенкина, Л.С. Влияние хрома и ванадия на композиционную структуру в малоуглеродистых белых чугунах / Л.С. Печенкина, Г.И. Сильман, А.А. Рукавицына // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т.11. - № 6. – С.13-17.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

К.С. Габриельс, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин

В статье представлены результаты исследовательских испытаний по разработке технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала на основе безуткового армирующего наполнителя из нитей Formosa TC-35 12K и полимерного эпоксидного связующего T-107 для высокотехнологичного комплекса автоматизированной выкладки MAG Viper 1200. Решены задачи по переработке препрегового материала под технические требования использованного комплекса выкладки (порезка и перемотка лент), разработаны и отработаны технологические режимы автоматизированной выкладки экспериментальных плоскопараллельных образцов и проведен комплекс их физико-механических испытаний. На основании полученных значений прочностных характеристик материала выбран оптимальный технологический режим автоматизированной выкладки с соответствующими величинами управляющих параметров выкладки (давление ролика, температура нагрева оснастки, натяжение препрега) и режимов формования образцов (температура формования, давление формования, время формования). Построена математическая модель технологического процесса автоматизированной выкладки, которая позволяет проводить прогнозирование и оценку влияния управляющих параметров выкладки на прочностные характеристики материала

Ключевые слова: углеродная однонаправленная лента, препрег, полимерные композиционные материалы, технологичность, автоматизированная выкладка, технология

### Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Сочетание высоких физико-механических характеристик и малый вес обеспечивает значительную конкурентоспособность ПКМ традиционным конструкционным материалам – металлам и их сплавам. Наиболее востребованы ПКМ оказались в авиакосмической сфере. Тенденции развития современной авиационной отрасли задают новые, высокие требования, предъявляемые к качеству, точности и повторяемости изготовления деталей, повышению технологичности производственных процессов, сокращению трудоемкости и повышению производительности. В связи с этим, автоматизация процессов при работе с композиционными материалами является одной из самых актуальных задач при создании современного высокотехнологичного производства изделий из ПКМ. Высокотехнологичные комплексы систем автоматизированной выкладки лент Automated Tape Laying (ATL) и автоматизированная выкладка волокон Automated Fiber Placement (AFP) [1]

позволяют изготавливать элементы и детали различной сложности с высокой точностью и плотностью укладки волокна, обеспечивая при этом хорошую повторяемость и скорость выкладки. Однако комплексной проблемой автоматизации технологического процесса выкладки композиционных материалов являются отсутствие адаптированного технологического сырья и технические сложности его изготовления. Низкая технологичность существующих отечественных материалов не позволяет применять их напрямую для комплексов автоматической выкладки без предварительной адаптации и отработки оптимальных технологических режимов изготовления и подготовки материалов. К тому же технологические особенности предварительных операций подготовки материала к процессу выкладки накладывают определенные ограничения к материалу сырья (препрегу) [2].

Основная задача настоящей работы заключалась в исследовании и разработке технологического процесса автоматизированной выкладки на примере технологического материала (препрега) на основе армирующего материала Formosa TC-35 12K и полимерного связующего T-107 на эпоксидной основе, а также его адаптации под специфику установки автоматизированной выкладки MAG Viper 1200 путем проведения комплекса исследовательских испытаний:

- разработка основных технологических принципов (технических ограничений);
- разработка и отработка управляющей программы и технологических режимов выкладки материала на комплексе MAG Viper 1200;
- адаптация технологического материала к использованию на комплексе автоматизированной выкладки MAG Viper 1200;

Габриельс Константин Сергеевич – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, инженер-исследователь, тел. 8(951) 5444559

Караева Оля Анатольевна – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, тел. 8(909)2111260

Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел. 8(951) 5569251

Полухин Денис Вадимович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, инженер, тел. 8(951) 5651235

- проведение физико-механических испытаний материала с целью последующей корректировки технологического процесса выкладки и сравнения с прочностными характеристиками материала полученного ручной выкладкой;

- разработка математической модели технологического процесса выкладки материала.

Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

### Методика эксперимента

Основные исследовательские испытания были направлены на разработку и отработку технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала на примере материала Formosa TC-35 12K + полимерное связующее T-107. Выбранный для исследовательских работ композиционный материал изготавливался по препреговой технологии, с применением комплекса пропитки COS.T.A., и представлял собой беззуктовую ленту шириной 300 мм на основе нитей Formosa TC-35 12K, пропитанную эпоксидным связующим T-107. Такая ширина препрега обусловлена рядом технологических особенностей пропиточного комплекса (ширина рабочей зоны до 450 мм), однако, является наиболее оптимальной для современного потребителя – она соответствует ширине большинства армирующих материалов аналогов зарубежного производства. Применяемые в качестве исходного сырья тонкие углеродные ленты в системе автоматизированной выкладки MAG Viper 1200, имеют номинальную ширину 6,35 мм, что обусловлено технологическими ограничениями данного комплекса, поэтому одной из задач по адаптации выбранного материала к техническим требованиям комплекса выкладки, являлась порезка препрега и перемотка полученных жгутов на катушки [3]. Весь комплекс проведенных исследовательских работ по адаптации материала, разработке технологических режимов автоматизированной выкладки материала и проверки его на технологичность можно разделить на несколько ключевых этапов.

1) Разработка и отработка технологических процессов порезки и перемотки препрега на ленты.

На первой стадии подготовки выбранного полимерного композиционного материала к использованию на комплексе автоматизированной выкладки проводились работы по разработке и отработке технологического процесса порезки препрега шириной 300 мм на отдельные жгуты шириной 6,35 мм и перемотка полученных лент на индивидуальные бобины (диафильмы), с применением станка размотки и нарезки «CDI Slitter» CD-8265GX. На рис. 1 представлена схема размотки полотна препрега, нарезка его на ленты и движения лент при намотке их на бобины (диафильмы).

Второй стадией переработки материала являлся процесс перемотки полученных при порезке

препреговых лент с диафильмов на шпули, с использованием станка SAHM 460XE. Схематически устройство станка представлено на рис. 2.

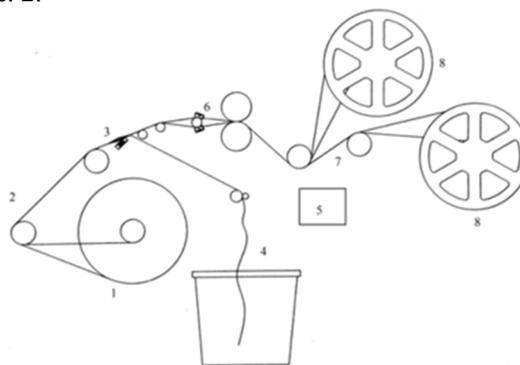


Рис. 1. Схема нарезки полотна препрега на ленты: 1 – рулон препрега, 2 – направляющий вал, 3 – вал удаления кромок полотна, 4 – сброс материала, 5 – панель управления, 6 – блок разделения подложки и материала для порезки, 7 – вал распускания лент препрега, 8 – бобина размотки

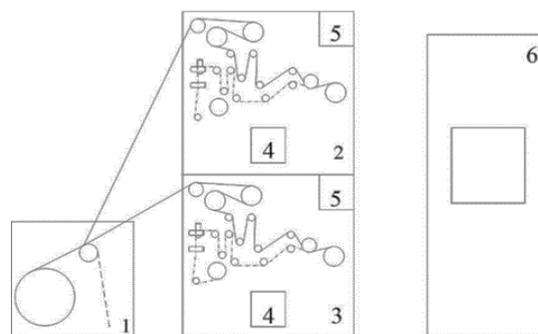


Рис. 2. Схема станка SAHM 460XE:

1 – блок размотки и отделения подложки материала, 2, 3 – блок намотки, 4 – панель настройки процесса смотки, 5 – блок управления процессом смотки, 6 – стойка ЧПУ

Полученные катушки с углеродными лентами шириной 6,35 мм (жгуты) представляли собой исходный материал для комплекса автоматизированной выкладки MAG Viper 1200.

2) Разработка управляющих программ выкладки плоскопараллельных экспериментальных образцов на комплексе MAG Viper 1200.

В ходе исследовательских работ, для комплекса выкладки MAG Viper 1200 в программной среде Fibersim, были разработаны управляющие программы выкладки экспериментальных монолитных и многослойных плоскопараллельных образцов. При создании управляющих программ укладки лент для каждой партии пластин образцов (в партии четыре пластины для пяти видов механических испытаний), учитывались изменения параметров станка, с целью их оптимизации для исследуемого материала. К параметрам оптимизации относились: давление

ролика, температура воздушного потока подогрета оснастки.

3) Заправка комплекса MAG Viper 1200 основными и вспомогательными материалами, проведение подготовительных работ.

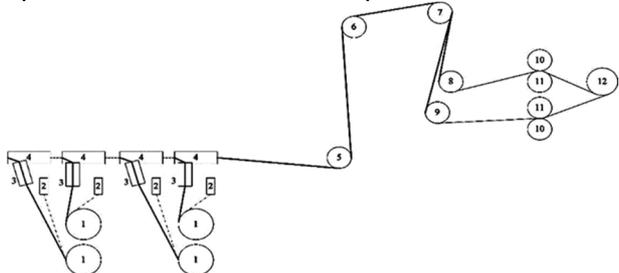


Рис. 3. Схема заправки станка VIPER 1200 технологическим материалом (углеродными жгутами шириной 6,35 мм):

1 – шпулярник, 2 – трубка отвода подложки 3, 4 – разворотный ролик, 5 – направляющий барабан, 6, 7 – ролики компенсации движения головы, 8 – ролики четных лент, 9 – ролики нечетных лент, 10 – ведомые ролики протягивающего механизма, 11 – ведущий вал протягивающего механизма, 12 – ролики укладки препрега

Процесс подготовки комплекса MAG Viper 1200 к выкладке включал в себя заправку станка полученными упаковками лент (жгутов), монтаж специального универсального приспособления (оснастки) и загрузку разработанных управляющих программ в блок управления. Схематически заправка комплекса технологическим материалом представлена на рис. 3.

4) Разработка и отработка технологического процесса выкладки плоскопараллельных образцов полимерного материала.

Непосредственно процесс выкладки представлял собой автоматическую укладку углеродных лент (жгутов) на поверхности специального приспособления, в соответствии с технологическими режимами и параметрами выкладки, заданными в управляющих программах (рис. 4).



Рис. 4. Процесс автоматизированной выкладки однослойной пластины ПКМAB

В ходе отработки технологического процесса выкладки образцов, были получены экспериментальные однослойные и многослойные плоскопараллельные пластины, для проведения исследовательских испытаний физико-механических свойств полученного материала и конструкций. Изготовленные образцы после выкладки упаковывались в вакуумный пакет и помещались в камеру автоклава фирмы Scholz, для проведения процесса температурного формования. Режимы температуры, давления и времени формования задавались с учетом физико-химических свойств связующего и геометрических размеров пластин.

5) Физико-механические испытания полученных образцов однослойной и многослойной структуры.

Из сформованных пластин и панелей были изготовлены элементарные образцы и проведены их физико-механические испытания по определению предела прочности материала при сжатии (в том числе и после удара), растяжении, сдвиге в плоскости листа и отрыве обшивки от сотового наполнителя. Комплекс испытательных мероприятий осуществлялся с применением современного высокоточного оборудования марки Instron и специальных приспособлений (испытательных оснасток), в соответствии со стандартами ASTM.

### Результаты и обсуждения

Разработка и отработка технологического режима изготовления адаптированного материала, с применением опытно-технологического комплекса пропитки С.О.С.Т.А, позволила получить препрег высокого качества, необходимую величину наноса и равномерность пропитки связующим наполнителя. Применение безуткового армирующего наполнителя в изготовлении препрега позволило исключить комплекс проблем, связанный с порезкой и перемоткой, с формированием некачественной кромки среза ленты в местах расположения утка, а также полным или частичным его перерезанием; хорошие реологические и температурные свойства выбранного полимерного связующего обеспечили оптимальную липкость материала. В ходе отработки технологического процесса порезки изготовленного препрега на ленты заданной шириной кромка реза ленты не имела дефектов, отсутствовало коробление пленочной подложки и слипание соседних лент при перемотке на шпули.

Применение набора управляющих программ для комплекса выкладки MAG Viper 1200 позволило отработать технологические режимы получения экспериментальных образцов полимерных композиционных материалов, и выбрать оптимальные параметры процесса автоматизированной выкладки, среди широкого диапазона их значений. В ходе исследовательских работ по разработке и отработке технологических режимов выкладки образцов на примере

исследуемого материала, было установлено, что наиболее оптимальная температура выкладочной головки автоматизированного комплекса должна составлять 60–80 °С, а давление прижимного ролика должно варьироваться в интервале от 5 до 15 кгс/см<sup>2</sup>. Разработка и отработка технологических режимов с такими оптимальными параметрами позволила избежать возникновения дефектов (отслаивание укладываемых слоев, налипание лент на укладываемый ролик, образование складок материала) в процессе автоматизированной выкладки.

В ходе отработки технологического процесса выкладки образцов, были получены экспериментальные однослойные и многослойные плоскопараллельные пластины, для проведения исследовательских испытаний физико-механических свойств полученного материала и конструкций.

Из сформованных пластин были изготовлены элементарные образцы для проведения соответствующих видов физико-механических испытаний. В ходе исследований были определены пределы прочности и модули сдвигов материала при испытании на растяжении в направлении 0°, сдвиге в плоскости листа, сжатии, сжатии после удара, межслоевом сдвиге и отрыве клеевого соединения сотового заполнителя от обшивки. Результаты физико-механических испытаний образцов, полученных в соответствии с различными вариациями входных параметров выкладки, были проанализированы и сделаны выводы о наиболее оптимальном технологическом режиме выкладки и формовании. Наилучшие прочностные характеристики имели образцы, полученные в соответствии с технологическим режимом, управляющие параметры выкладки которого имели следующие значения:

- давление ролика, кгс/см<sup>2</sup>: 13,65;
- температура формования, °С: 170;
- давление формования, кгс/см<sup>2</sup>: 3;
- время формования, мин.: 210;
- температура окружающей среды, °С: 24,5;
- влажность воздуха, %: 22;
- температура нагрева оснастки, °С: 60;
- натяжение препрега, Н: 1,11.

Результаты физико-механических испытаний образцов, полученных с использованием указанных управляющих параметров, представлены в таблице.

Результаты физико-механических испытаний образцов

Предел прочности (при T <sub>ком</sub> ), МПа	Модуль упругости (при T <sub>ком</sub> ), ГПа	Предел прочности при сжатии (при T <sub>ком</sub> ), МПа	Предел прочности (сдвиг в плоскости листа), МПа
2097,58	146,92	986,3	176,32
Модуль упругости (сдвиг в плоскости листа), ГПа	Предел прочности (межслоевой сдвиг), МПа	Предел прочности при отрыве от сот, МПа	-
15,97	87,93	7,35	-

Значения пределов прочности и модулей упругости, полученные в результате физико-механических исследований образцов, позволили определить наиболее оптимальные значения входных управляющих параметров выкладки, для выбранного в рамках работ материала, а также провести сравнительный анализ прочностных характеристик образцов, полученных в автоматическом и ручном режиме. Результаты подобного анализа позволили сделать вывод, что у образцов, полученных с использованием комплекса автоматизированной выкладки, значения прочностных характеристик не хуже, чем у образцов, изготовленных с помощью выкладки вручную, а для некоторых видов испытаний (в частности растяжение в направлении 0°) величины предела прочности и модуля упругости превосходят аналогичные на 10 %.

Одновременно с решением практических задач – исследовательские испытания технологического процесса подготовки материала, автоматизированной выкладки и физико-механических испытаний полученных образцов ПКМAB, была решена и теоретическая задача – создана математическая модель технологического процесса автоматизированной выкладки. Данная модель позволяет проводить оценку влияния управляющих параметров (температура формования, время формования давление формования, давление прижимного ролика) на прочностные характеристики образцов, что обеспечивает получение образцов ПКМAB с заданными эксплуатационными характеристиками и позволяет снизить финансовые и временные затраты при изготовлении изделий [4]. Математическая модель была разработана на основе результатов исследовательских работ по разработке и отработке технологических процессов автоматизированной выкладки композиционного материала Formosa TC-35 12K + полимерное связующее T-107 и значениях прочностных характеристик экспериментальных образцов материала.

### Заключение

В ходе выполнения исследовательских работ по разработке и отработке технологии автоматизированной выкладки полимерного композиционного материала, на примере выбранного армирующего наполнителя Formosa TC-35 12K и полимерного связующего T-107, были решены задачи: по подготовке исходного материала к использованию на комплексе MAGViper 1200; разработаны и отработаны технологические режимы выкладки экспериментальных плоскопараллельных образцов однослойных и многослойных структур; проведен комплекс физико-механических испытаний полученных образцов, результаты которого позволили определить оптимальные значения входных параметров выкладки и построить математическую модель технологического процесса автоматизированной выкладки.

База теоретических и практических наработок, полученных в результате проведения исследовательских испытаний, позволяет в дальнейшем проводить аналогичные работы по адаптации других новых материалов под процесс автоматизированной выкладки, решать комплексные задачи по переработке материала и разрабатывать оптимальные технологические режимы подбора и выкладки материала.

#### Литература

1. Sloan J. ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures / J. Sloan // *High performance composites*: Garden Business Media, Inc.; 2008. P. 20–25.

2. Гусев Ю.А. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP /

Ю.А. Гусев, А.В. Борщев, А.В. Хрульков // *Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ»* – 2012. - №3. - С. 2-13.

3. Технологические особенности получения материала для средств автоматизированной выкладки на примере MAG VIPER 1200 / М.Ю. Воскобойник, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Д.В. Полухин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*.- 2015. – Т. 11. - №1. – С. 8-10

4. Математическое моделирование технологического процесса автоматизированной выкладки экспериментальных образцов полимерных композиционных материалов / А.В. Гаганов, О.А. Караева, А.М. Кудрин, Я.В. Дарнева // *Вестник Воронежского государственного технического университета*.- 2016. – Т. 12. - №3. – С. 86-90.

НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «Инновационные технологии в авиастроении»  
Воронежского государственного технического университета

## DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED LAYOUT TECHNOLOGY FOR THE POLYMER COMPOSITE MATERIAL

**K.S. Gabriels<sup>1</sup>, O.A. Karaeva<sup>2</sup>, A.M. Kudrin<sup>3</sup>, D.V. Polukhin<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Engineer, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: gabriels\_k@mail.ru

<sup>2</sup>PhD, Researcher, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: olgakaraeva9@mail.ru

<sup>3</sup>PhD, Head of the NVL "Composite Materials", Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kudrin.ru@gmail.com

<sup>4</sup>Engineer, NVL "Composite Materials" of the Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The article presents the results of tests related to the development of the technology of automated laying of polymeric composite material based on the reinforcing filler of Formosa TC-35 12K yarns and the polymer epoxy binder T-107 for the high-tech complex of automated MAG Viper 1200. Have been solved some problems of prepreg material processing – the technical requirements of the used complex calculations (cutting and rewinding tapes), developed and perfected technology of plane experimental samples layouts and set the complex of physical-mechanical tests. Optimal process conditions has been selected by automated computations based on the obtained values of the strength characteristics of the material with the corresponding values of control parameter calculations (the pressure roller, the heating temperature display, the tension of the prepreg) and samples modes molding (molding temperature, molding pressure of the molding). A mathematical model of technological process of automated calculations has been made, which allows prediction and assessment of the impact of control parameters calculations on the strength characteristics of the material

Key words: carbon unidirectional tape prepreg polymer composites, manufacturability, an automated layout technology

#### References

1. Sloan J. «ATL and AFP: defining the megatrends in composite aerostructures», *High performance composites*: Garden Business Media, Inc.; 2008. pp. 20–25.

2. Gusev Yu.A., Borshchev A.V., Khrul'kov A.V. «Features of prepregs for automated calculations using ATL and AFP methods», *Electronic scientific journal "WORKS OF VIAM"*, 2012, №3, pp. 2-13.

3. Voskoboynik M.Yu., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Polukhin D.V. «Technological features of obtaining a material for automated calculation tools on the example of MAG VIPER 1200» *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2015, Vol. 11, №1. pp. 8-10.

4. Gaganov A.V., Karaeva O.A., Kudrin A.M., Darneva Ya.V. «Mathematical modeling of the technological process of automated calculation of experimental samples of polymeric composite materials», *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2016, Vol. 12, № 3, pp. 86-90.