

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, ИННОВАЦИОННЫХ  
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
И НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ  
И ОБРАЗОВАНИИ»  
СТНО-2016**

Сборник трудов

Том 2

Рязань 2016

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5  
С568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016; Рязань. – 296 с.

Сборник включает труды участников конференции «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2016. Освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиоэлектронике, телекоммуникации, измерительной технике и системах, биомедицинских технологиях, вычислительных сетях, САПР, машиностроительном и нефтехимическом производстве, в образовании, экономике, гуманитарной сфере и космических технологиях.

**Организационный комитет:**

Таганов А.И. – председатель, проректор по научной работе РГРТУ, д.т.н., проф.;

Миловзоров О.В. – зам. председателя, зам. директора ин-та магистратуры РГРТУ по научной работе, к.т.н., доц; Устинова Л.С. – отв. за информационную поддержку, нач. отдела информационного обеспечения; Трубицына С.Г. – секретарь оргкомитета

**Члены оргкомитета:** Алпатов Б.А. – зав. каф. АИТУ, д.т.н., проф.; Бухенский К.В. – зав. каф. ВМ, к.ф.-м.н., доц.; Витязев В.В. – зав. каф. ТОР, д.т.н., проф.; Демидов С.В. – директор Гуманитарного института, д.и.н., проф.; Еремеев В.В. – директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.; Жулев В.И. – зав. каф. ИИБМТ, д.т.н., проф.; Кириллов С.Н. – зав. каф. РУС, д.т.н., проф.; Корячко В.П. – зав. каф. САПР, д.т.н., проф.; Кошелев В.И. – зав. каф. РТС, д.т.н., проф.; Мусолин А.К. – зав. каф. АИТП, д.т.н., проф.; Паршин Ю.Н. – зав. каф. РТУ, д.т.н., проф.; Перфильев С.В. – зав. каф. ГМиКУ, д.э.н., проф.; Пылькин А.Н. – декан ФВТ, зав. каф. ВПМ, д.т.н., проф.; Степнов И.М. – зав. каф. ЭиФМ, д.э.н., проф.; Холомина Т.А. – зав. каф. МНЭЛ, д.ф.-м.н., проф.; Чиркин М.В. – зав. каф. ЭП, д.ф.-м.н., проф.

# СЕКЦИЯ «АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ»

УДК 519.816; ГРНТИ 27.47.19

## БЕНТОВЫЕ ФУНКЦИИ ВЫБОРА

И.А. Цветков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, 19197113@rambler.ru*

*Аннотация.* Предлагается понятие бентовой функции выбора, имеющей логическую форму, в которой только булевы бент-функции. Для всех бентовых функций выбора на 3-элементном множестве вариантов исследованы условия Чернова.

*Ключевые слова.* функция выбора, бент-функция, условие Чернова.

## BENT CHOICE FUNCTIONS

I.A. Tsvetkov

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Ryazan, Russia, 19197113@rambler.ru*

*Abstract.* The concept of the bent choice function having the logical form with only Boolean bent functions is proposed. Chernoff's conditions for all bent choice functions on a 3-element variant set are investigated.

*Keywords.* Choice function, bent function, Chernoff's condition.

**Введение.** Функция выбора  $C$  на конечном множестве вариантов с двумя или более элементами каждому значению аргумента  $X$  — непустому подмножеству множества вариантов — ставит в соответствие значение  $C(X)$  — подмножество (возможно, пустое)  $X$  [1].

Функцию выбора можно задать ее логической формой [2] — кортежем булевых функций. Сейчас изучаются булевы бент-функции [3], свойство которых — максимально возможное расстояние Хэмминга до подмножества всех линейных булевых функций того же числа переменных — определяет возможности использования бент-функций, в частности, для получения корректирующих кодов и в задачах криптографии [3].

Автором предлагается понятие бентовой функции выбора, в логической форме которой все булевы функции — бент-функции. Для всех бентовых функций выбора на 3-элементном множестве вариантов исследованы условия Чернова, определяющие рациональность выбора.

**Обозначения и термины.** Обозначим  $N = \{1, 2, \dots\}$ ;  $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$  для  $n \in N$ ;  $N^{(k)} = N \setminus N_{k-1}$  для  $k \in N \setminus \{1\}$ ;  $\subseteq$  и  $\subset$  — нестрогое и строгое включения соответственно.

Функция выбора  $C$  на конечном  $n$ -элементном (где  $n \in N^{(2)}$ ) множестве вариантов  $A$  задается указанием для каждого непустого  $X \subseteq A$  значения функции  $C(X) \subseteq X$  [1].

Функция выбора  $C$  на множестве вариантов  $A$ ,  $|A| \in N^{(2)}$ , называется функцией непустого выбора [1], если и только если  $|C(X)| > 0$  для любого непустого  $X \subseteq A$ .

Функция выбора  $C$  на множестве вариантов  $A$ ,  $|A| \in N^{(2)}$ , называется функцией одиночного выбора [1], если и только если  $|C(X)| = 1$  для любого непустого  $X \subseteq A$ .

Функцию выбора  $C$  на множестве вариантов  $A$ ,  $|A| \in N^{(2)}$ , называем, следуя [4], функцией одиночно-пустого выбора, если и только если  $|C(X)| \in \{0, 1\}$  для любого непустого  $X \subseteq A$  и существуют такие непустые  $Y \subseteq A$  и  $Z \subseteq A$ , что  $|C(Y)| = 0$  и  $|C(Z)| = 1$ .

Пусть  $P_k$ ,  $k \in N$ , — множество всех  $k$ -местных булевых функций;  $L_k$ ,  $k \in N$ , — подмножество ( $L_k \subseteq P_k$ ) всех  $k$ -местных линейных (равносильных полиномам Жегалкина

нулевого или первого порядка) булевых функций;  $R_n, n \in N^{(2)}$ , — множество всех функций выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов;  $I(d, D) = \begin{cases} 1, & \text{если } d \in D; \\ 0, & \text{если } d \notin D; \end{cases} h(r, D_k), k \in N$ , — расстояние Хэмминга от булевой функции  $r \in P_k$  до подмножества  $D_k \subseteq P_k$ ;  $h(r, D_k) = \min_{q \in D_k} \sum_{\langle x_1, x_2, \dots, x_k \rangle \in \{0, 1\}^k} r(x_1, x_2, \dots, x_k) \oplus q(x_1, x_2, \dots, x_k)$ .

Любую функцию выбора  $C \in R_n, n \in N^{(2)}$ , на множестве вариантов  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  можно задать логической формой [2] — кортежем  $F = \langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$ , где  $f_i \in P_{n-1}, i \in N_n$ . Связь  $C$  и  $F$ :

$f_1(I(a_2, X), I(a_3, X), \dots, I(a_n, X)) = I(a_1, C(X))$  для каждого такого  $X \subseteq A$ , что  $a_1 \in X$ ;

$f_n(I(a_1, X), I(a_2, X), \dots, I(a_{n-1}, X)) = I(a_n, C(X))$  для каждого такого  $X \subseteq A$ , что  $a_n \in X$ ;

$f_i(I(a_1, X), I(a_2, X), \dots, I(a_{i-1}, X), I(a_{i+1}, X), \dots, I(a_n, X)) = I(a_i, C(X))$  для каждого такого  $X \subseteq A$ , что  $a_i \in X$ , где  $i \in N_n \setminus \{1, n\}$  и  $n > 2$ .

Бент-функцией называем согласно [3] такую булеву функцию  $f \in P_k$  (где  $k \in N^{(2)}$  — четное число), для которой  $h(f, L_k) = \max_{g \in P_k} h(g, L_k)$ . Для четного  $k \in N^{(2)}$  обозначим  $B_k$  множество всех  $k$ -местных бент-функций.

Для нечетного  $n \in N^{(3)}$  называем **бентовой функцией выбора** на  $n$ -элементном множестве вариантов такую функцию  $C \in R_n$ , которая задается логической формой  $\langle f_1, f_2, \dots, f_n \rangle$ , где  $f_i \in B_{n-1}$  для каждого  $i \in N_n$ . Для четного  $n \in N^{(2)}$  бентовые функции выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов *не определяем*.

Для нечетного  $n \in N^{(3)}$  обозначим:  $Q_n$  — подмножество ( $Q_n \subset R_n$ ) всех бентовых функций выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов;  $Q_n^{(NE)}$  — подмножество всех бентовых функций *непустого* выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов;  $Q_n^{(1)}$  — подмножество всех бентовых функций *одиночного* выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов;  $Q_n^{(1E)}$  — подмножество всех бентовых функций *одиночно-пустого* выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов.

Для нечетного  $n \in N^{(3)}$  обозначим  $p_n = |Q_n| / |R_n|$  долю всех бентовых функций выбора среди всех функций выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов.

Для функции выбора  $C$  на множестве вариантов  $A, |A| \in N^{(2)}$ , выполняются условия Чернова: 1) условие *наследования*, если и только если для любых непустых  $X \subseteq A$  и  $Y \subset A$  при  $Y \subset X$  имеет место  $Y \cap C(X) \subseteq C(Y)$ ; 2) условие *константности*, если и только если для любых непустых  $X \subseteq A$  и  $Y \subset A$  при  $Y \subset X$  из  $C(X) = \emptyset$  следует  $C(Y) = \emptyset$ , а из  $Y \cap C(X) \neq \emptyset$  следует  $Y \cap C(X) = C(Y)$ ; 3) условие *согласия*, если и только если для любых непустых  $X \subset A$  и  $Y \subset A$  имеет место  $C(X) \cap C(Y) \subseteq C(X \cup Y)$ ; 4) условие *независимости* от отбрасывания отвергнутых вариантов (кратко — условие независимости), если и только если для любых непустых  $X \subseteq A$  и  $Y \subset A$  при  $C(X) \subseteq Y \subset X$  имеет место  $C(X) = C(Y)$  [1].

Называем *конфигурацией условий Чернова* строку из четырех символов, каждый из которых равен 0 или 1 и соответствует невыполнению (символ 0) и выполнению (символ 1) условий Чернова в порядке слева направо: наследования, константности, согласия, независимости. Например, конфигурация условий Чернова 0010 означает, что условие согласия выполняется, условия наследования, константности и независимости не выполняются.

Чем больше единиц в конфигурации условий Чернова функции выбора, тем рациональнее производимый ею выбор.

**Полученные результаты.** Число  $|Q_n|$  всех бентовых функций выбора на  $n$ -элементном множестве вариантов для нечетного  $n \in N^{(3)}$  определяется так:  $|Q_n| = |B_{n-1}|^n$ .

Сейчас значения  $|B_k|$  известны точно для  $k \in \{2, 4, 6, 8\}$ :  $|B_2| = 8$ ,  $|B_4| = 896$ ,  $|B_6| = 5\,425\,430\,528 \approx 5,4 \cdot 10^9$ ,  $|B_8| = 99\,270\,589\,265\,934\,370\,305\,785\,861\,242\,880 \approx 9,9 \cdot 10^{31}$ ; см. [3, 5]. Имеем:  $|Q_3| = 512$ ,  $|Q_5| \approx 5,8 \cdot 10^{14}$ ,  $|Q_7| \approx 1,4 \cdot 10^{68}$ ,  $|Q_9| \approx 9,4 \cdot 10^{287}$ .

Известно, что  $|R_n| = 2^{n \cdot 2^{n-1}}$  (см., например, [2]). Имеем:  $|R_3| = 4096$ ,  $|R_5| \approx 1,2 \cdot 10^{24}$ ,  $|R_7| \approx 7,3 \cdot 10^{134}$ ,  $|R_9| \approx 3,7 \cdot 10^{693}$ .

Тогда получим:  $p_3 = 0,125$ ,  $p_5 \approx 4,8 \cdot 10^{-10}$ ,  $p_7 \approx 1,9 \cdot 10^{-67}$ ,  $p_9 \approx 2,5 \cdot 10^{-406}$ .

Для подмножеств  $Q_3$ ,  $Q_3^{(NE)}$ ,  $Q_3^{(1)}$ ,  $Q_3^{(1E)}$  автором полным перебором на ЭВМ определено число бентовых функций выбора, имеющих заданную конфигурацию условий Чернова. Для подмножеств  $Q_3$  и  $Q_3^{(NE)}$  результаты представлены в табл. 1, для подмножества  $Q_3^{(1E)}$  — в табл. 2. Учитываем, что для *произвольных* функций выбора и функций *непустого* выбора всего возможны *девять* конфигураций условий Чернова (см. табл. 1) [1], для функций *одиночно-пустого* выбора — *пять* конфигураций условий Чернова (см. табл. 2) [4]. Имеем  $|Q_3^{(1)}| = 6$ . У всех шести бентовых функций выбора из  $Q_3^{(1)}$  конфигурация условий Чернова 0000 (для функций *одиночного* выбора всего возможны *три* конфигурации условий Чернова: 0000, 0010, 1111; см. [1]).

Таблица 1

Конфигурация условий Чернова	0000	0001	0010	0011	1000	1001	1010	1011	1111
Число функций из $Q_3$ с этой конфигурацией	150	12	338	4	7	0	1	0	0
Число функций из $Q_3^{(NE)}$ с этой конфигурацией	18	3	0	2	0	0	0	0	0

Таблица 2

Конфигурация условий Чернова	0000	0010	1000	1010	1111
Число функций из $Q_3^{(1E)}$ с этой конфигурацией	18	80	3	1	0

**Пример.** Используем 2-местные бент-функции:  $f_1$  — конъюнкция;  $f_2$  — дизъюнкция;  $f_3$  — импликация. Зададим на множестве вариантов  $\{a_1, a_2, a_3\}$  бентовую функцию выбора  $C \in Q_3$  логической формой  $\langle f_1, f_2, f_3 \rangle$  (см. табл. 3 – 5).

Таблица 3

$X$	$I(a_2, X)$	$I(a_3, X)$	$f_1(I(a_2, X), I(a_3, X))$	$\{a_1\} \cap C(X)$
$\{a_1\}$	0	0	0	$\emptyset$
$\{a_1, a_3\}$	0	1	0	$\emptyset$
$\{a_1, a_2\}$	1	0	0	$\emptyset$
$\{a_1, a_2, a_3\}$	1	1	1	$\{a_1\}$

Таблица 4

$X$	$I(a_1, X)$	$I(a_3, X)$	$f_2(I(a_1, X), I(a_3, X))$	$\{a_2\} \cap C(X)$
$\{a_2\}$	0	0	0	$\emptyset$
$\{a_2, a_3\}$	0	1	1	$\{a_2\}$
$\{a_1, a_2\}$	1	0	1	$\{a_2\}$
$\{a_1, a_2, a_3\}$	1	1	1	$\{a_2\}$

Таблица 5

$X$	$I(a_1, X)$	$I(a_2, X)$	$f_3(I(a_1, X), I(a_2, X))$	$\{a_3\} \cap C(X)$
$\{a_3\}$	0	0	1	$\{a_3\}$
$\{a_2, a_3\}$	0	1	1	$\{a_3\}$
$\{a_1, a_3\}$	1	0	0	$\emptyset$
$\{a_1, a_2, a_3\}$	1	1	1	$\{a_3\}$

По табл. 3 – 5 получим таблицу значений функции выбора  $C$  (табл. 6).

Таблица 6

$X$	$C(X)$
$\{a_1\}$	$\emptyset$
$\{a_2\}$	$\emptyset$
$\{a_3\}$	$\{a_3\}$
$\{a_1, a_2\}$	$\{a_2\}$
$\{a_1, a_3\}$	$\emptyset$
$\{a_2, a_3\}$	$\{a_2, a_3\}$
$\{a_1, a_2, a_3\}$	$\{a_1, a_2, a_3\}$

На основании табл. 6 имеем  $C \in Q_3 \setminus \{Q_3^{(NE)} \cup Q_3^{(1)} \cup Q_3^{(1E)}\}$ . Функция выбора  $C$  не удовлетворяет условию наследования, так как при  $\{a_2\} \subset \{a_1, a_2\}$  не имеет места  $\{a_2\} \cap C(\{a_1, a_2\}) \subseteq C(\{a_2\})$ . Функция выбора  $C$  не удовлетворяет условию константности, так как она не удовлетворяет условию наследования. Функция выбора  $C$  удовлетворяет условию согласия, так как имеет место

$$C(\{a_1, a_2\}) \cap C(\{a_1, a_3\}) \subseteq C(\{a_1, a_2, a_3\}),$$

$$C(\{a_1, a_2\}) \cap C(\{a_2, a_3\}) \subseteq C(\{a_1, a_2, a_3\}),$$

$$C(\{a_1, a_3\}) \cap C(\{a_2, a_3\}) \subseteq C(\{a_1, a_2, a_3\}).$$

Функция выбора  $C$  не удовлетворяет условию независимости, так как при  $C(\{a_1, a_2\}) \subseteq \{a_2\} \subset \{a_1, a_2\}$  не имеет места  $C(\{a_1, a_2\}) = C(\{a_2\})$ . Таким образом, функция выбора  $C$  имеет конфигурацию условий Чернова 0010.

**Заключение.** Предложено понятие *бентовой функции выбора*, в логической форме которой *все* булевы функции — *бент-функции*. Для 3-элементного множества вариантов исследованы определяющие рациональность выбора условия Чернова: для всех бентовых функций выбора, бентовых функций непустого, одиночного, одиночно-пустого выбора.

Полученные результаты могут быть использованы при исследовании функций выбора в задачах криптографии.

### Библиографический список

1. Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Выбор вариантов: основы теории. — М.: Наука, 1990. — 240 с.
2. Теория выбора и принятия решений / И.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский, В.Б. Соколов. — М.: Наука, 1982. — 328 с.
3. Токарева Н.Н. Нелинейные булевы функции: бент-функции и их обобщения. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 170 с.
4. Цветков И.А. Условия Чернова для функций одиночно-пустого выбора // Вестник РГРТУ. — 2012. — № 1 (39). — Ч. 2. — С. 57–64.
5. *The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences* [Электронный ресурс]. URL: <http://oeis.org> (дата обращения 19.02.2016).

УДК 004.021; ГРНТИ 50.41.25

## МЕТОД К БЛИЖАЙШИХ СОСЕДЕЙ И ЕГО ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ

Н.А. Тярт\*, Н.Н. Степанов\*\*

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, \*rznnike@yandex.ru, \*\*darknikis85@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы классификации объектов с применением метода к ближайших соседей и его модификаций. Выполнен анализ особенностей и приемов реализации программы, демонстрирующей работу метода к ближайших соседей в двумерном евклидовом пространстве.

*Ключевые слова.* Сортировка, классификация, метод ближайших соседей, оптимизация метода.

## METHOD OF K NEAREST NEIGHBORS AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR AUTOMATED CLASSIFICATION OF OBJECTS

N.A. Tyart\*, N.N. Stepanov\*\*

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, \*rznnike@yandex.ru, \*\*darknikis85@gmail.com*

*Abstract.* Problems of objects classification using the method of k nearest neighbors and its modifications are discussed. The analysis of features and methods of program implementation, demonstrating the method of k nearest neighbors in the two-dimensional Euclidean space, is performed.

*Keywords.* sorting, classification, the method of nearest neighbor, optimization of the method.

В настоящий момент становится все более актуальной задача автоматической классификации, иными словами – сортировки объектов.

Для случая пространственной классификации объектов с возможностью четкого определения расстояния между любыми двумя из них применяется так называемый метод к ближайших соседей.

Суть основного варианта этого метода такова: для объекта, который необходимо классифицировать, находится k ближайших соседних элементов (например, 5 соседей). Для каждого существующего класса подсчитывается число объектов, входящих в него, из этих k соседей. Классифицируемый объект относится к тому же классу, к которому относится наибольшее число его соседей.

Далее будут рассмотрены модификации основного метода, необходимые ввиду существования значительных недостатков базового метода к ближайших соседей.

Первое, что нужно рассмотреть. – это само число  $k$ . Тут играет важную роль общее количество классов (групп). При наличии двух групп (или другого *четного* их количества) число соседей  $k$  должно быть нечетным, чтобы избежать возможных неоднозначных ситуаций, когда сразу для нескольких групп получается наибольшее число соседей. Но при нечетном (и неизвестном заранее) числе групп невозможно просто выбрать такое число  $k$ , чтобы исключить возможные ситуации неопределенности. Бороться с этой проблемой помогает введение весовых коэффициентов, что будет рассмотрено далее.

Есть еще один момент относительно количества соседей  $k$ , который нужно рассмотреть. Если для классификации будет взято малое число соседей (в крайнем случае –  $k=1$ ), то при рассмотрении классифицируемого пространства в целом будут заметны сильные «шумы». Иными словами, не будет относительно четкого разбиения пространства с находящимися в нем объектами на кластеры. Для уменьшения шумов необходимо выбрать достаточно большое число  $k$ . Наглядная иллюстрация этого явления приведена на рис. 1.

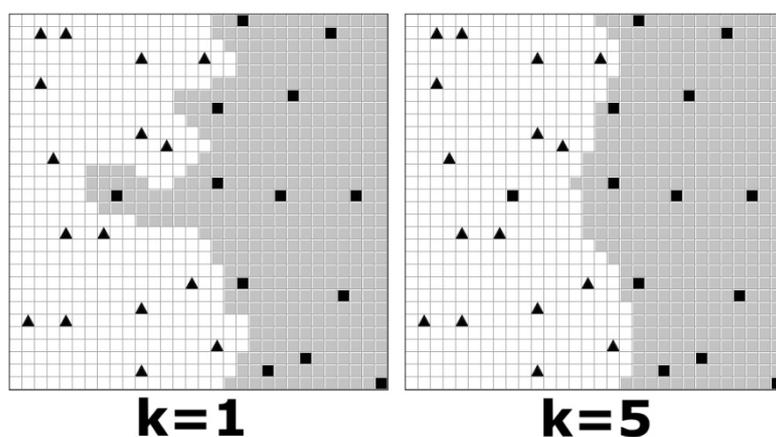


Рис. 1. Устранение шумов при увеличении параметра  $k$  до оптимального значения

Следует заметить, что слишком большое значение  $k$  даже хуже, чем слишком малое. Вызвано это тем, что при увеличении  $k$  возрастает количество необходимых расчетов. При решении задачи кластеризации трудоемкость процесса возрастает очень ощутимо. Работа метода из-за этого становится достаточно медленной и неэффективной.

Также нужно учитывать, что увеличение числа ближайших соседей  $k$  (в случае, если оно фиксировано) приводит к более усредненной кластеризации, иными словами – границы кластеров будут более прямыми. Но, в крайнем случае, со слишком большим числом  $k$  кластеризация окажется слишком грубой и непоказательной. Поэтому оптимальное число  $k$  индивидуально для каждого случая, оно зависит от размеров анализируемого пространства (поля), расположения и количества объектов, их принадлежности к классам, количества самих классов и др.

Значительно повысить эффективность рассматриваемого метода позволяет введение удельного веса для каждого объекта-соседа (в таком случае сам метод называют *весовым*). Тогда вычисления для каждого класса  $j$  происходят по формуле:

$$Q_j = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{ji}^2},$$

где  $Q_j$  – значение близости оцениваемого объекта к классу  $j$ ;  $R_{ji}$  – расстояние от оцениваемого объекта до  $i$ -го соседа из класса  $j$ ;  $n$  – общее число соседей, принадлежащих классу  $j$ .

Применение *весового* метода также позволяет снизить вероятность возникновения проблемы неоднозначности классификации, рассмотренной ранее.

Еще одним вариантом модификации данного метода является введение радиуса (предельного расстояния) оценивания вместо фиксированного числа  $k$  соседей. Тогда все объекты-соседи, находящиеся на расстоянии меньше либо равном радиусу оценивания, участвуют в классификации данного объекта. Это также снижает вероятность возникновения неопределенных ситуаций.

Далее будут рассмотрены основные особенности и приемы в реализации демонстрационной программы, показывающей работу метода  $k$  ближайших соседей для двумерного евклидова пространства (плоскости), модифицированного с учетом всего вышесказанного.

#### 1. Программная реализация поля и объектов

Для программной реализации двумерного поля с координатами хорошо подходит использование двумерного массива (матрицы). В этом случае индексы элементов массива будут соответствовать координатам объектов в пространстве. Это решение позволяет обойтись без переходных расчетов (при переходах от объектной модели к математической и обратно).

Для визуального представления данных тогда достаточно использовать сетку (таблицу) с квадратными ячейками, каждая из которых будет соответствовать одному из элементов матрицы. Соответственно каждый объект будет занимать ровно одну ячейку.

#### 2. Расчет расстояния между объектами

Для расчета расстояния между двумя объектами в данной модели будут использоваться следующие формулы:

$$R^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 = |x_2 - x_1|^2 + |y_2 - y_1|^2,$$
$$R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}.$$

#### 3. Использование весового метода $k$ ближних соседей

Для каждого объекта разумно производить расчеты с учетом весовых значений для повышения точности классификации и кластеризации.

#### 4. Введение настраиваемого минимального значения параметра $k$

Как уже было сказано ранее, слишком малое количество  $k$  соседей для классификации приводит к появлению так называемых «шумов» – кластеры могут иметь менее ровные границы и малые пустоты внутри. Поэтому необходимо ввести настраиваемый параметр минимального количества охватываемых соседей. При этом реальное текущее значение количества рассматриваемых соседей оцениваемого элемента будет варьироваться от случая к случаю, причина чего будет рассмотрена далее.

#### 5. Введение настраиваемого минимального значения радиуса (расстояния) $R$

Это решение также позволит снизить количество шумов, сделав границы кластеров более ровными. При этом программа будет работать по следующему алгоритму: сначала находятся все соседи объекта в минимальном радиусе охвата и находится их количество. Далее производятся необходимые расчеты. В случае, если количество соседей меньше минимального или расчеты привели к неопределенной ситуации, радиус охвата расширяется на какую-то константную величину (шаг  $h$ ). За шаг может быть взята и какая-то часть радиуса, например,  $1/10$ . Далее расчеты производятся снова – и так в цикле, до того момента, как все условия будут соблюдены и объект однозначно классифицирован.

Для оптимизации работы метода разумно сохранять все сделанные расчеты для области радиуса  $R$  и каждый раз лишь добавлять к ним результаты расчетов для кольца  $(R, R+h]$  (важно именно то, что левая граница диапазона не включена, так как расчеты для нее уже были произведены на предыдущем шаге).

На данный момент создан тестовый прототип программы, реализующий рассмотренный метод для 2-х групп объектов. Введены все рассмотренные модификации, возможно пронаблюдать эффект от их применения. Планируется добавление большего числа групп. Прототип интерфейса и результат работы программы представлены на рис. 2.

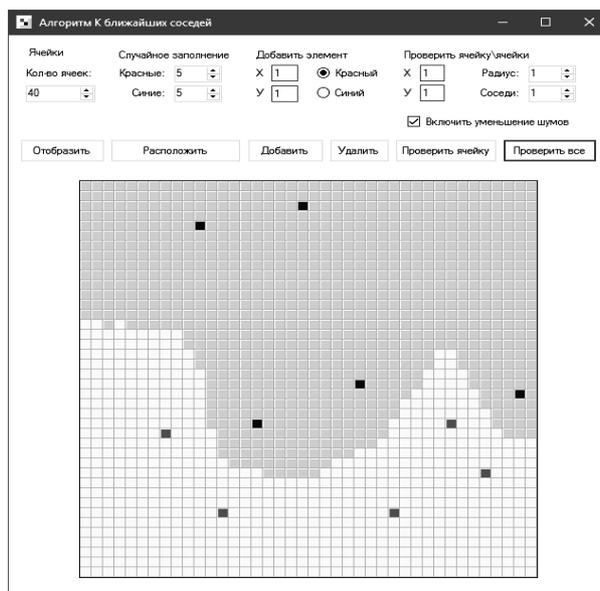


Рис. 2. Прототип программы

Существует еще множество других модификаций метода k ближайших соседей, применяемых в различных областях классификации объектов, например модифицированный и обобщенный метод ближайшего соседа для классификации библиографических текстовых документов [1] или распознавание рукописных цифр с помощью метода k ближайших соседей [2]. Также возможно применение особых приемов оптимизации метода [3].

В настоящее время при решении задач классификации объектов, наряду с методом k ближайших соседей, широкое применение находят различные алгоритмы кластерного анализа, в частности алгоритм нечетких с-средних [4], алгоритм возможностных с-средних [5] и т.п. При этом формирование самих кластеров осуществляется как с применением классических нечетких множеств (нечетких множеств первого типа), так и с использованием нечетких множеств второго типа [4, 5], а для уточнения результатов кластеризации реализуются те или иные эволюционные алгоритмы, например генетические алгоритмы, алгоритмы роя частиц и т.п. Одной из актуальных в последние годы сфер приложений таких алгоритмов является сегментация изображений, в том числе сегментация спутниковых изображений поверхности Земли [6, 7].

### Библиографический список

1. Толчев В.О. Модифицированный и обобщенный метод ближайшего соседа для классификации библиографических текстовых документов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 75. № 7. С. 63 – 70.
2. Метод K-ближайших соседей и распознавание рукописных цифр [Электронный ресурс] / Тимин А. // Режим доступа: <http://blog.flipback.net/blog/2012/08/27/k-nearest-neighbors-and-handwritten-digit-classification/>, свободный. (Дата обращения: 06.11.2015 г.)
3. Метод ближайших соседей [Электронный ресурс] // MachineLearning.ru – Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=KNN>, свободный. (Дата обращения: 02.11.2015 г.)
4. Демидова Л.А., Кираковский В.В. Методы кластеризации объектов на основе нечетких множеств второго типа и генетического алгоритма // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2008. Т. 6. № 69. С. 136 – 142.
5. Демидова Л.А., Кираковский В.В., Коротяев А.Н. Кластеризация объектов с использованием РСМ-алгоритма на основе интервальных нечетких множеств второго типа и генетического алгоритма // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. № 3. С. 53 – 62.
6. Демидова Л.А., Нестеров Н.И., Тишкин Р.В. Сегментация спутниковых изображений с применением аппарата теории нечетких множеств // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 41. С. 11 – 17.
7. Demidova L.A., Nesterov N.I. Fuzzy and possibilistic segmentation of earth surface images by means of intelligent information technologies // В сборнике: 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA) Editor: E. I. Veremey. Санкт-Петербургский государственный университет; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). 2014. С. 35 – 36.

УДК 004.932; ГРНТИ 29.19.22

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР

И.С. Толстова\*, А.Н. Гаврилов\*, Г.В. Абрамов\*\*

\* Воронежский государственный университет инженерных технологий,  
Россия, Воронеж, irin2102ka@mail.ru

\*\* Воронежский государственный университет,  
Россия, Воронеж, agwl@yandex.ru

*Аннотация.* Рассматриваются особенности разработки программного обеспечения для имитационного моделирования процесса электродугового синтеза УНС, позволяющего отслеживать влияние технологических параметров на процесс синтеза, проводить расчетные исследования.

*Ключевые слова.* Электродуговой синтез, УНС, моделирование.

## DEVELOPMENT PROGRAM FOR SIMULATION ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF CARBON NANOSTRUCTURES

I.S. Tolstova\*, A.N. Gavrilov\*, G.V. Abramov\*\*

\* Voronezh State University of Engineering Technologies,  
Voronezh, Russia, irin2102ka@mail.ru

\*\* Voronezh State University,  
Voronezh, Russia, agwl@yandex.ru

*Abstract.* The peculiarities of the development of software for the simulation of electric arc synthesis process carbon nanostructures, the tracking of the impact of process parameters on the synthesis process, to carry out the design of the study.

*Keywords.* Electric arc synthesis, carbon nanostructures, modeling.

Фуллерены и углеродные нанотрубки представляет собой аллотропную форму углерода. Так как химические и физические свойства этих наноструктур резко различаются, их обычно рассматривают как отдельные классы. Поэтому получение наноструктур с заданными параметрами является важной технологической задачей. Наиболее эффективный способ получения фуллеренов и нанотрубок основан на термическом разложении графита. Важной задачей является повышение технологической и экономической эффективности процесса синтеза УНС. Использование только экспериментальных подходов для определения оптимальных параметров синтеза является дорогостоящим и недостаточным. Практическое применение находит оптимизация технологических параметров процесса электродугового синтеза УНС с помощью математического и имитационного моделирования. При этом необходимо решить следующую задачу - выработка оптимального управления процессом на основе полученных технологических параметров промышленного электродугового синтеза углеродных наноструктур.

*Объект исследования*

Одним из распространенных методов получения качественных фуллеренов и нанотрубок является электродуговой синтез в атмосфере инертного газа (гелия) [1].

На рис. 1 представлена схема электродуговой установки для получения углеродных наноструктур.

*Математическая модель синтеза УНС*

В основу кинетической модели синтеза УНС электродуговым методом, описывающей динамику движения заряженных частиц в плазме с кулоновским взаимодействием, положена система уравнений Больцмана с учетом интеграла столкновений, записанных для каждого вида рассматриваемых частиц многокомпонентной плазмы, дополненная системой уравнений Максвелла[2,3].

Для решения системы уравнений используется метод расщепления, согласно которому исходная задача разбивается на две вспомогательных задачи: расчет переноса частиц и расчет столкновений и взаимодействий заряженных частиц в плазме. Укрупненный алгоритм решения представлен на рис. 2.

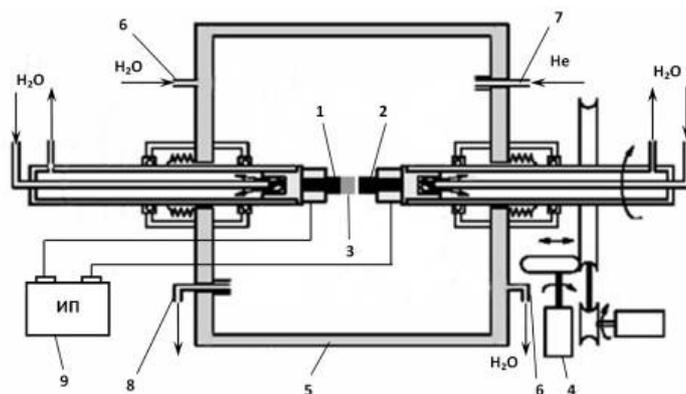


Рис. 1. Схема электродуговой установки для получения углеродных нанотрубок.  
 1 - графитовый катод, 2 - графитовый анод, 3 - депозитный осадок, содержащий УНС,  
 4 – устройство, поддерживающее постоянное расстояние между электродами, 5 - стенки рабочей камеры,  
 6 - система водяного охлаждения, 7- система подачи инертного газа He, 8 – система откачки воздуха,  
 9 – источник питания

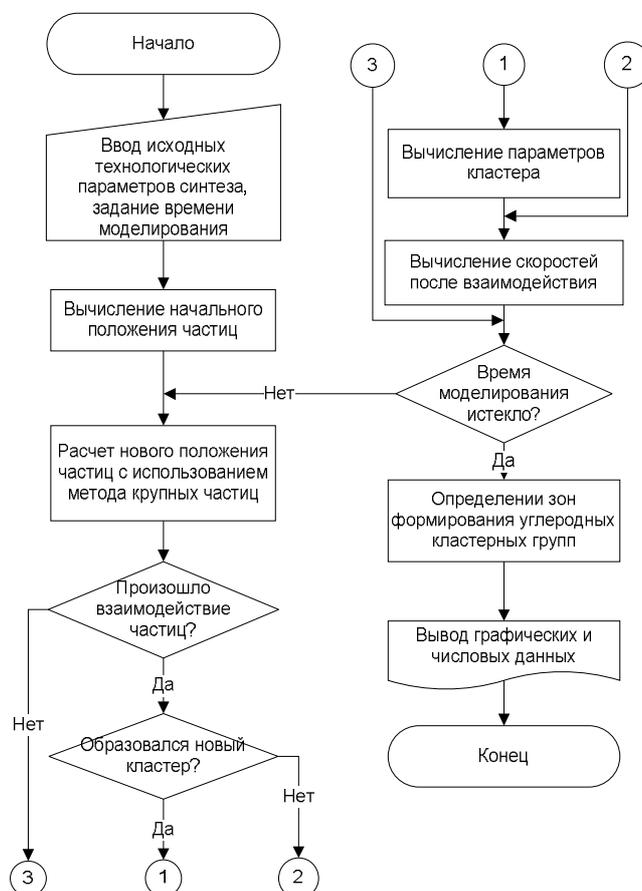


Рис. 2. Укрупненный алгоритм расчета

### Программная реализация

Разработанная модель синтеза УНС была программно реализована с помощью системы компьютерной математики Maple. Данная система имеет ряд средств для численного решения дифференциальных уравнений, обладает развитыми графическими средствами, обеспечивает визуальное проектирование пользовательского интерфейса. Разработанное приложение не требует специальной подготовки и просто в использовании. На главной форме программы представлены компоненты для ввода исходных параметров электродугового процесса синтеза углеродных наноструктур (рис. 3). После ввода исходных данных, если все поля были заполнены верно, при нажатии на кнопку «Результат» в новом окне отображаются результаты математического моделирования (рис. 4.).

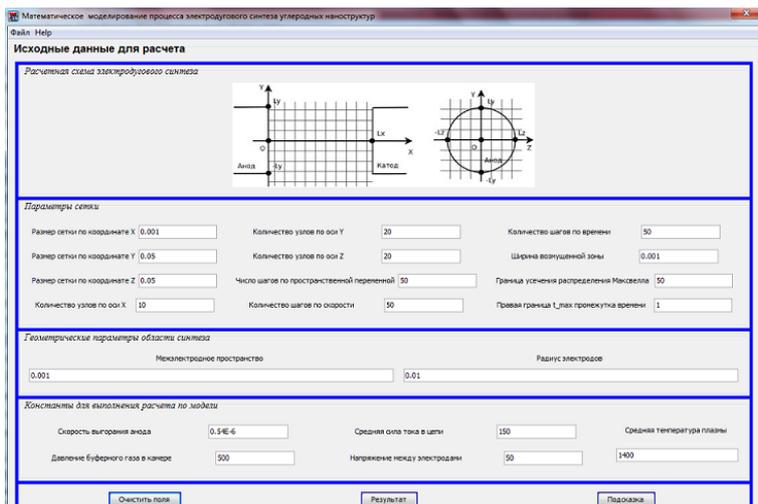


Рис. 3. Основное окно программы

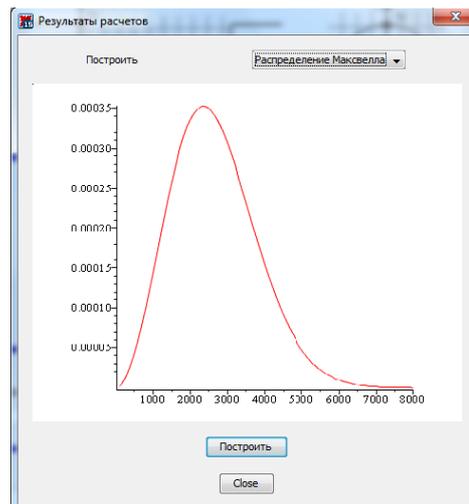


Рис. 4. Окно «Результаты расчетов»

Также предусмотрен по запросу пользователя вывод дополнительной расчетной информации (значения потенциала в сечениях межэлектродного пространства, функции распределения, модуль средней скорости частицы углерода, количество взаимодействий катионов углерода по оси электродов), на основе которой можно определить оптимальные параметры синтеза. Моделирование процесса синтеза УНС дает возможность найти оптимальные значения технологических параметров и позволяет прогнозировать изменения, происходящие в системе синтеза.

### Библиографический список

1. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Татаркин Е.С. Моделирование кинетики ионов при электродуговом синтезе углеродных наноструктур // Вестник СГТУ. Саратов. 2012. Т. 1. № 2с (64). С. 70-74.
2. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н. Математическое моделирование движения взаимодействующих частиц на основе функций распределения в плазме электродугового синтеза УНС // Вестник ВГУИТ. Серия: Информационные технологии, моделирование и управление. 2012. № 2(52). С. 71-75.
3. Абрамов Г.В., Гаврилов А.Н., Толстова И.С. Моделирование движения и взаимодействия частиц углерода в плазме электродугового разряда на основе метода крупных частиц // Сборник статей II международной научно-практической интернет-конференции (16-20.12.2013), Воронеж: ВГУИТ, 2014. С. 43-47.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

## ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ НА СЕТЯХ ПЕТРИ-МАРКОВА

**А.Н. Ивутин, Е.В. Ларкин**

*Тульский государственный университет,  
Россия, Тула, Alexey.Ivutin@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы получения оценок времени выполнения алгоритма в рамках решения задачи эффективного распараллеливания и оптимального распределения потоков управления в многопроцессорных конфигурациях.

*Ключевые слова.* Алгоритм, сеть Петри-Маркова, оптимизация, ветвления, параллелизм.

## OPTIMIZATION PROBLEMS ON PETRI-MARKOV NETS

**A.N. Ivutin, E.V. Larkin**

*Tula State University,  
Tula, Russia, Alexey.Ivutin@gmail.com*

*Abstract.* The problem of evaluation of execution time of algorithm in the problem of an efficient parallelization and optimal distribution of threads on multiprocessor configurations is described.

*Keywords.* Algorithm, Petri-Markov net, optimization, branching, parallelism.

Получение оценок времени выполнения алгоритма является одной из важнейших задач эффективного распараллеливания и оптимального распределения потоков управления в многопроцессорных конфигурациях. Традиционно именно время выполнения является основным, хотя и не единственным, индексом производительности. При этом измерения производительности на реальных системах для случая немонопольного использования

ресурсов не могут считаться надежными в силу того, что подобные измерения очень чувствительны к рабочей нагрузке на систему в момент измерения. Для однопрограммного режима вариативность времени исполнения также присутствует, однако ее величиной можно пренебречь. Более того, время выполнения программы в монопольном режиме в некоторой системе может служить нижней границей времени выполнения этой программы в этой же системе в конкурентном режиме, что, по сути, означает случай с полным отсутствием параллелизма в реализации алгоритма. Однако и такая оценка не может служить достоверной, поскольку не гарантирует неизменность или предсказуемость получаемого результата для систем, отличных от той, на которой и производилось сравнение. Таким образом, можно сделать вывод, что для ЭВМ фон Неймановского типа при обработке случайных данных время обработки является случайной величиной, а исход обработки является случайным, что определяется плотностями распределения обрабатываемых данных. Поэтому при оценке временной сложности требуется привлечение теории случайных, в частности Марковских, процессов [1].

Задача проектирования оптимальных по быстродействию программных систем является классической: требуется найти значение вектора  $\mathbf{X}^* = (x_1^*, \dots, x_n^*, \dots, x_N^*)$  варьируемых параметров  $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_n, \dots, x_N)$ , которое доставляет минимум целевой функции

$$\zeta(\mathbf{X}^*) = \min, \quad (1)$$

где  $\zeta(\mathbf{X})$  - скалярная функция векторного аргумента, которая представляет собой модель цели проектирования.

Варьируемые параметры характеризуют аппаратные компоненты и программные средства системы реальной вычислительной системы. Они входят в систему равенств, неравенств, булевых выражений, теоретико-множественных функций и т.п. вида

$$g_k(\mathbf{X}) \leq b_k; \quad 1 \leq k \leq K, \quad (2)$$

где  $g_k(\mathbf{X})$  - некоторая непрерывная, дискретная, логическая или иная функция;  $b_k$  - скалярный параметр.

Выражения, входящие в систему (2), отражают параметрические, структурно-параметрические и структурные изменения модели программно-аппаратного комплекса.

Таким образом, для целевой платформы с заранее известными характеристиками мы можем с высокой долей достоверности определить время выполнения операторов  $D^F$  и соответственно определить время выполнения линейных (без ветвлений) участков алгоритма. Введенное условие детерминированности позволит нам также вычислить и общее время выполнения программы с учетом операторов группы  $D^C$  как общее время выполнения алгоритма по всем ветвям условий, но эта оценка не будет являться достоверной, поскольку в любой момент времени может быть выполнено только одно из множества  $n$  условий.

Однако существует возможность уточнения результатов, заключающаяся в предсказании ветвлений алгоритма, поскольку любой из операторов алгоритма в конечном счете зависит только от вектора входных данных  $\mathbf{X}$ . Зная закон распределения входных данных  $f(\mathbf{X})$ , мы можем оценить вероятности исхода события  $D_i^C$ . Для этого представим вектор входных данных и вероятностный закон их распределения в виде  $n+1$ -мерного пространства, где осям абсцисс соответствуют компоненты вектора  $\mathbf{X}$ , а оси ординат - закон распределения  $f(\mathbf{X})$ . Тогда, чтобы при выполнении оператора  $D_i^C$  с  $n$  ветвлениями было выполнен переход по  $j$ -й ветке необходимо выполнение неравенства

$$G_{ij}(\mathbf{X}) \leq 0. \quad (3)$$

Обозначим область, соответствующую выражению (3), как  $\mu_{ij} = (G_{ij}(\mathbf{X}) \leq 0)$ , причем для областей исхода событий должно выполняться условие непересечения:

$$\mu_{ij} \cap \mu_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{если } j \neq k, \\ \mu_{ij}, & \text{если } j = k \end{cases} \quad (4)$$

Тогда вероятность выполнения перехода по  $j$ -й ветке для  $D_i^C$  оператора может быть определена выражением

$$p_j = \int_{\mu_{ij}} \dots \int f(\mathbf{X}) dx_1 dx_2 \dots dx_N, \quad (5)$$

где  $N$  — размерность вектора входных данных  $\mathbf{X}$ .

Из выражения (5) также можно получить вероятность неперехода по  $j$ -й ветке как  $1 - p_j$ , что для случая перехода с двумя условиями равносильно переходу по другой ветке.

В инженерных приложениях вместо плотностей распределения времени выполнения операторов используется минимальное, максимальное и среднее время выполнения операций и среднеквадратичное отклонение времени выполнения операций. Исследуем возможность получения математических выражений, которые позволяют напрямую рассчитывать основные числовые характеристики полумарковской матрицы (математические ожидания и дисперсии) по числовым характеристикам и стохастической матрице полумарковского процесса [2], что позволит, учитывая зависимости (3), оценить время выполнения программы.

Характерной особенностью систем исследуемого класса являются значительные размерности как множеств  $\Pi = \{A, Z, \tilde{\mathbf{R}}, \hat{\mathbf{R}}\}$ , так и матриц  $M = \{q, \tilde{\mathbf{h}}(t), \Lambda\}$ , что предполагает, в свою очередь, весьма обширный набор проектных решений, каждое из которых будет удовлетворять выбранной системе ограничений. Хотя в постановке (1) оптимизационная задача является классической, ее решение имеет целый ряд специфических особенностей. К специфике задачи оптимизации можно отнести структурно-параметрический характер вариации проектных решений. Структурность задачи заключается в возможности выбора для реализации ВС программного обеспечения, его компонентов, а также отдельно взятых программных компонент блоков различных типов, решающих одну и ту же функциональную задачу, в решении ряда функциональных задач с помощью одного и того же блока, параллельном выполнении алгоритма обслуживания запроса, уменьшение количества генераторов заявок на обслуживание и т.п. В пределах каждой выбранной структуры возможно изменение параметров компонентов таким образом, что это меняет показатели качества всей проектируемой системы. Изменение структуры может приводить к частичному изменению структуры скалярной целевой функции (2), поскольку может измениться элементный состав вектора параметров (1) за счет введения/исключения проектных переменных, описывающих включенные/исключенные компоненты и связи между ними.

В связи со значительной сложностью задачи оптимального проектирования целесообразно в качестве метода ее решения использовать метод целенаправленного выбора, являющийся разновидностью метода нисходящего проектирования. Этот метод сводится к декомпозиции объекта проектирования на иерархические уровни и решению оптимизационных задач на каждом уровне проектирования [3]. В общем случае ВС может быть разделена на следующие уровни: уровень вычислительной системы, уровень комплексов, уровень вычислительных модулей, уровень программного обеспечения.

На верхнем уровне, уровне системы, объектом проектирования является система в целом, а вектор варьируемых параметров  $\mathbf{X}$  представляет собой композицию векторов параметров комплексов:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_k, \dots, \mathbf{X}_K), \quad (6)$$

где  $\mathbf{X}_k = (x_{1(k,x)}, \dots, x_{j(k,x)}, \dots, x_{J(k,x)})$  - вектор внешних параметров  $k$ -го комплекса;  $1 \leq k \leq K$  - индекс для нумерации комплексов;  $1(k,x) \leq j(k,x) \leq J(k,x)$  - индекс для нумерации параметров  $k$ -го комплекса.

На уровне ПО объектами проектирования являются  $N[v(k)]$   $n[v(k)]$ -х алгоритма, вектор варьируемых параметров  $\mathbf{X}_{n[v(k)]}$  каждого из которых представляет собой композицию векторов параметров элементов:

$$\mathbf{X}_{n[v(k)]} = (\mathbf{X}_{1\langle n[v(k)] \rangle}, \dots, \mathbf{X}_{w\langle n[v(k)] \rangle}, \dots, \mathbf{X}_{W\langle n[v(k)] \rangle}), \quad (7)$$

где  $X_{w\langle n[v(k)] \rangle} = (x_{1\langle w\langle n[v(k)] \rangle \rangle}, \dots, x_{j\langle w\langle n[v(k)] \rangle \rangle}, \dots, x_{J\langle w\langle n[v(k)] \rangle \rangle})$  - вектор параметров операторов  $w\langle n[v(k)] \rangle$ -го элемента;  $1\langle n[v(k)] \rangle \leq w\langle n[v(k)] \rangle \leq W\langle n[v(k)] \rangle$  - индекс для нумерации операторов;  $1 \leq k \leq K$ ;  $1(k) \leq v(k) \leq V(k)$ ;  $1[v(k)] \leq n[v(k)] \leq N[v(k)]$ ;  $1\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle \leq j\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle \leq J\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle$  - индекс для нумерации параметров  $w\langle n[v(k)] \rangle$ -го оператора.

На параметры операторов накладываются естественные ограничения  $x_{j\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle} \min \leq x_{j\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle} \leq x_{j\langle w\langle n[v(k, x)] \rangle \rangle} \max$ . Кроме того, на оптимальные решения накладываются ограничения, а также ограничения в виде Петри-Марковской модели системы:

$$\Psi^{n[v(k)]} = \bigcup_{w\langle n[v(k)] \rangle=1\langle n[v(k)] \rangle}^{W\langle n[v(k)] \rangle} \Psi^{w\langle n[v(k)] \rangle}, \quad (8)$$

где  $\Psi^{w\langle n[v(k)] \rangle} = \{\Pi^{w\langle n[v(k)] \rangle}, M^{w\langle n[v(k)] \rangle}\}$  - ЭППМ, описывающая функционирование  $w\langle n[v(k)] \rangle$ -го оператора,  $1\langle n[v(k)] \rangle \leq w\langle n[v(k)] \rangle \leq W\langle n[v(k)] \rangle$ ;  $1[v(k)] \leq n[v(k)] \leq N[v(k)]$ ;  $1(k) \leq v(k) \leq V(k)$ ;  $1 \leq k \leq K$ .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Тульской области в рамках научного проекта 15-48-03232 р\_центр\_a.

### Библиографический список

1. Ларкин Е.В., Ивутин А.Н. «Соревнования» в многопроцессорных компьютерных системах // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. Вып. 12. Ч.2— Тула: Изд. ТулГУ, 2012. — С. 198-204.
2. Игнатъев В.М., Ларкин Е.В. Сети Петри-Маркова. - Тула: ТулГУ, 1997. - 163 с.
3. L. Zhang, L.M. Kristensen, C. Janczura, G. Gallasch, and J. Billington. A Coloured Petri Net based Tool for Course of Action Development and Analysis. In Proc. of Workshop on Formal Methods Applied to Defence Systems, volume 12 of Conferences in Research and Practice in Information Technology, pages 125–134. Australian Computer Society, 2001.

УДК 004.85; ГРНТИ 28.23.37

## ОБЗОР ОСНОВНЫХ ВИДОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ИХ ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

А.А. Ежов, А.С. Новиков

Тульский государственный университет  
Россия, Тула, info@tsu.tula.ru

*Аннотация.* Рассматриваются архитектуры наиболее широко известных видов нейронных сетей, описываются структуры алгоритмов обучения данных сетей, указываются области их практического применения.

*Ключевые слова.* Нейронная сеть, многослойный перцептрон Розенблатта, сеть Хопфилда, сеть Хемминга, синаптическая связь, функция активации нейронов.

## OVERVIEW OF MAIN NEURAL NETWORKS AND THEIR PRACTICAL USE

A.A. Ezhov, A.S. Novikov

Tula State University  
Russia, Tula, info@tsu.tula.ru

*Abstract.* We consider the architecture of the most widely known types of neural networks, describe the structure of these networks learning algorithms, specified areas of their practical application.

*Keywords.* Neural network, multilayer perceptron of Rosenblatt, Hopfield network, Hamming network, synaptic communication, activation function of neurons.

### Многослойный перцептрон Розенблатта

Одним из типичных представителей класса сетей прямого распространения является классический многослойный перцептрон Розенблатта [3]. На рис. 1 приведена архитектура данной сети.

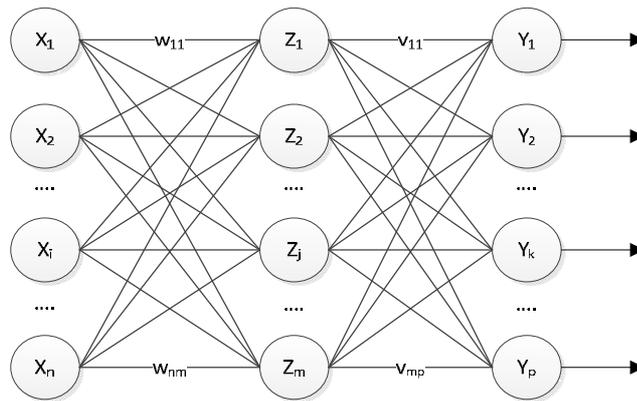


Рис.1. Архитектура многослойного перцептрона Розенблатта

Из рис. 1 видно, что в используемой нейронной сети всего имеется три слоя: входной слой, состоящий из  $n$  нейронов ( $i=1,2,\dots,n$ ), скрытый слой, включающий в себя  $m$  нейронов ( $j=1,2,\dots,m$ ), и выходной слой, состоящий из  $p$  нейронов ( $k=1,2,\dots,p$ ). Все нейроны связаны между собой синаптическими связями, которые фактически являются элементами матриц: связь между  $i$ -м нейроном входного слоя и  $j$ -м нейроном скрытого слоя обозначается через элемент матрицы  $W$  -  $w_{ij}$ , а связь между  $j$ -м нейроном скрытого слоя и  $k$ -м нейроном выходного слоя обозначается через элемент матрицы  $V$  -  $v_{jk}$ . Значения весов связей являются произвольными действительными числами.

Выходные значения нейронов каждого из слоев вычисляются с помощью так называемых функций активации. Для многослойного перцептрона обычно выбирают такие функции активации, как бинарный сигмоид или биполярный сигмоид. Значения выходов нейронов для бинарного сигмоида являются числами в интервале от 0 до 1, для биполярного – от -1 до 1.

Задача обучения многослойного перцептрона – это задача подстройки весов синаптических связей между нейронами таким образом, чтобы при подаче на вход сети некоторого набора признаков объекта сеть давала правильный отклик.

Одним из вариантов обучения перцептрона является метод обратного распространения ошибки (Backpropagation). Не будем вдаваться в математическое описание этого алгоритма и просто поясним, что суть этого метода заключается в вычислении ошибок нейронов выходного слоя и их использование при корректировке весов нейронных связей предыдущих слоев. Таким образом, получается, что ошибка передается от выхода ко входу, тем самым изменяя связи между нейронами всех слоев, отсюда и название метода обучения.

Преимущества данного метода обучения:

- возможно динамическое (потокковое) обучение сети;
- имеется возможность распараллеливания;
- на сверхбольших выборках необязательно брать все значения входных признаков.

Недостатки метода обучения Backpropagation следующие:

- возможна медленная сходимость;
- в данном алгоритме присутствует проблема переобучения сети;
- застревание в локальных минимумах.

Практическое применение перцептрон Розенблатта находит в следующих задачах:

1) прогнозирование и распознавание образов. В этих задачах от перцептрона требуется установить принадлежность объекта к какому-либо классу по его параметрам (например, по внешнему виду, форме, силуэту). Причём, точность распознавания будет во многом зависеть от представления выходных реакций перцептрона;

2) управление агентами. В искусственном интеллекте часто рассматриваются обучающиеся (адаптирующиеся к окружающей среде) агенты. При этом в условиях неопределённости становится важным анализировать не только текущую информацию, но и

общий контекст ситуации, в которую попал агент, поэтому здесь применяются персептроны с обратной связью. Кроме того, в некоторых задачах становится важным повышение скорости обучения персептрона, например, с помощью моделирования рефрактерности.

Многослойный персептрон является достаточно универсальным средством решения достаточно большого объема задач: он обучается на предъявляемых входных образах и выдает корректные отклики на выходе. Но, конечно же, в отдельных случаях применение персептрона бывает неэффективным, например, при достаточно большом количестве схожих входных признаков сеть может некорректно обучаться и выдавать неверные результаты при распознавании.

### Сеть Хопфилда

Следующей разновидностью нейронной сети является рекуррентная сеть Хопфилда [2, 3], архитектура которой приведена на рис. 2.

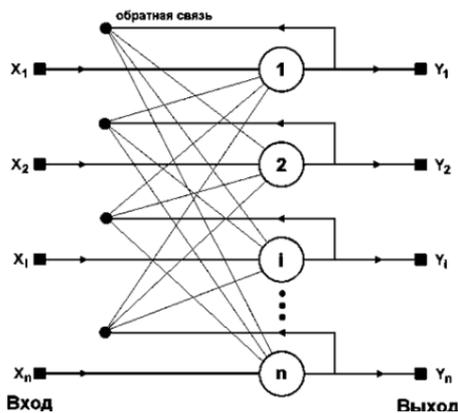


Рис. 2. Архитектура сети Хопфилда

Сеть Хопфилда – это полносвязная нейронная сеть с симметричной матрицей связей. В процессе работы динамика таких сетей сходится (конвергирует) к одному из положений равновесия. Эти положения равновесия являются локальными минимумами функционала, называемого энергией сети (в простейшем случае — локальными минимумами отрицательно определенной квадратичной формы на  $n$ -мерном кубе). Такая сеть может быть использована как автоассоциативная память, как фильтр, а также для решения некоторых задач оптимизации. В отличие от многих нейронных сетей, работающих до получения ответа через определенное количество тактов, сети Хопфилда работают до достижения равновесия, когда следующее состояние сети в точности равно предыдущему: начальное состояние является входным образом, а при равновесии получает выходной образ.

Нейронная сеть Хопфилда состоит из  $n$  искусственных нейронов. Каждый нейрон системы может принимать одно из двух состояний (что аналогично выходу нейрона с пороговой функцией активации):

$$y_i = \begin{cases} 1 \\ -1. \end{cases}$$

Нейроны в сети Хопфилда связаны синаптическими связями, веса которых отражены в матрице взаимодействий  $W$ . Эта матрица является симметричной ( $w_{ij}=w_{ji}$ ), а ее диагональные элементы полагаются равными нулю. Активационная функция нейронов для сети Хопфилда скачкообразная.

Задача, решаемая данной сетью в качестве ассоциативной памяти, как правило, формулируется следующим образом. Известен некоторый набор двоичных сигналов (изображений, звуковых оцифровок, прочих данных, описывающих некие объекты или характеристики процессов), которые считаются образцовыми. Сеть должна уметь из произвольного неидеального сигнала, поданного на ее вход, выделить ("вспомнить" по частичной информации) соответствующий образец (если такой есть) или "дать заключение" о том, что входные данные не соответствуют ни одному из образцов. Если, например, сигналы представляют собой некие изображения, то, отобразив в графическом виде данные с

выхода сети, можно будет увидеть картинку, полностью совпадающую с одной из образцовых (в случае успеха), или же "вольную импровизацию" сети (в случае неудачи).

Общая структура алгоритма обучения нейронной сети Хопфилда следующая [2]:

- 1) на входы сети подается неизвестный сигнал;
- 2) рассчитываются новое состояние нейронов и новые значения аксонов;
- 3) проверяется, изменились ли выходные значения аксонов за последнюю итерацию. Если да – переход к пункту 2, иначе (если выходы застabilizировались) – конец.

При этом выходной вектор представляет собой образец, наилучшим образом сочетающийся с входными данными.

Как говорилось выше, иногда сеть не может провести распознавание и выдает на выходе несуществующий образ. Это связано с проблемой ограниченности возможностей сети. Для сети Хопфилда число запоминаемых образов  $m$  не должно превышать величины, примерно равной  $0.15 \cdot n$ .

Нейронная сеть Хопфилда может применяться для решения следующих практических задач:

- 1) распознавание зашумленных образов. Сеть позволяет работать с зашумленными исходными данными и верно классифицировать входные объекты, например, распознавать зашумленные цифры и буквы;
- 2) решение комбинаторных задач оптимизации. Такие задачи сети Хопфилда позволяет решать внутренний механизм минимизации энергии. Так, сеть способна, например, решить задачу коммивояжера;
- 3) восстановление поврежденных изображений. Если во время обучения сформировать матрицу весовых коэффициентов (межнейронных связей) на основании эталонных бинарных векторов, то нейронная сеть в процессе работы под действием описанных выше полей будет менять состояния нейронов до тех пор, пока не перейдет к одному из устойчивых состояний. Когда сеть Хопфилда решает эту задачу, это значит, что она работает в режиме фильтрации.

У сети Хопфилда есть и недостаток. Этим недостатком является эффект «перекрестных ассоциаций». Он заключается в том, что, когда есть два похожих образа А и В, то предъявление на входы сети вектора А приведет к появлению на ее выходах вектора В и наоборот.

### Сеть Хемминга

Архитектура нейронной сети Хемминга [2] представлена на рис. 3. Когда нет необходимости, чтобы сеть в явном виде выдавала образец, то есть достаточно, скажем, получать номер образца, ассоциативную память успешно реализует сеть Хэмминга. Эту нейронную сеть можно рассматривать как модификацию сети Хопфилда. Данная сеть характеризуется, по сравнению с сетью Хопфилда, меньшими затратами на память и объемом вычислений, что становится очевидным из ее структуры.

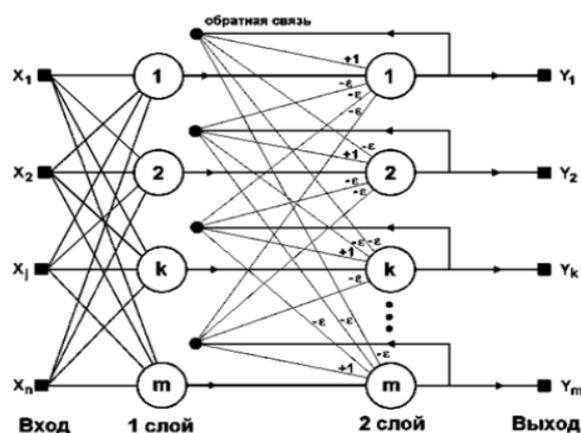


Рис. 3. Архитектура нейронной сети Хемминга

Сеть состоит из двух слоев. Первый и второй слои имеют по  $m$  нейронов, где  $m$  – число образцов. Нейроны первого слоя имеют по  $n$  синапсов, соединенных со входами сети (образующими фиктивный нулевой слой). Нейроны второго слоя связаны между собой ингибиторными (отрицательными обратными) синаптическими связями. Единственный синапс с положительной обратной связью для каждого нейрона соединен с его же аксоном. Активационная функция нейронов пороговая.

Идея работы сети состоит в нахождении расстояния Хэмминга от тестируемого образа до всех образцов. Расстоянием Хэмминга называется число отличающихся битов в двух бинарных векторах. Сеть должна выбрать образец с минимальным расстоянием Хэмминга до неизвестного входного сигнала, в результате чего будет активизирован только один выход сети, соответствующий этому образцу.

Общая структура алгоритма обучения сети Хемминга следующая [2]:

- 1) на входы сети подается неизвестный вектор  $X$ , исходя из которого рассчитываются состояния нейронов первого слоя. После этого полученными значениями инициализируются значения аксонов второго слоя;
- 2) вычисляются новые состояния нейронов второго слоя и значения их аксонов;
- 3) проверить, изменились ли выходы нейронов второго слоя за последнюю итерацию. Если да – перейти к шагу 2. Иначе – конец.

Из оценки алгоритма видно, что роль первого слоя весьма условна: воспользовавшись один раз на шаге 1 значениями его весовых коэффициентов, сеть больше не обращается к нему, поэтому первый слой может быть вообще исключен из сети (заменен на матрицу весовых коэффициентов).

Сеть Хемминга может применяться для решения следующих задач:

- 1) оптическое распознавание символов (OCR);
- 2) восстановление зашумленного исходного сигнала;
- 3) решение задач оптимизации.

### **Выводы**

Мы рассмотрели несколько классических вариантов нейронных сетей: многослойный персептрон Розенблатта, сеть Хопфилда и сеть Хемминга. Для перечисленных сетей изучили их архитектуру, алгоритмы обучения, привели примеры практических задач, где эти нейронные сети могут применяться. Но это лишь малая часть того, на что способны сейчас современные нейронные сети. Практическое применение они находят в достаточно широком диапазоне областей [1]:

- **экономика и бизнес:** прогнозирование временных рядов (курсов валют, цен на сырьё, объемов продаж,..), автоматический трейдинг (торговля на валютной, фондовой или товарной бирже), оценка рисков невозврата кредитов, предсказание банкротств, оценка стоимости недвижимости, выявление переоцененных и недооцененных компаний, рейтингование, оптимизация товарных и денежных потоков, считывание и распознавание чеков и документов, безопасность транзакций по пластиковым картам;
- **медицина:** постановка диагноза, обработка медицинских изображений, мониторинг состояния пациента, анализ эффективности лечения, очистка показаний приборов от шумов;
- **авионика:** обучаемые автопилоты, распознавание сигналов радаров, адаптивное пилотирование сильно поврежденного самолета, беспилотные летательные аппараты;
- **связь:** сжатие видеоинформации, быстрое кодирование-декодирование, оптимизация сотовых сетей и схем маршрутизации пакетов;
- **интернет:** ассоциативный поиск информации, электронные секретари и автономные агенты в интернете, фильтрация и блокировка спама, автоматическая рубрикация сообщений из новостевых лент, адресные реклама и маркетинг для электронной торговли, распознавание captcha;

- **автоматизация производства:** оптимизация режимов производственного процесса, контроль качества продукции, мониторинг и визуализация многомерной диспетчерской информации, предупреждение аварийных ситуаций;
- **робототехника:** распознавание сцены, объектов и препятствий перед роботом, прокладка маршрута движения, управление манипуляторами, поддержание равновесия;
- **политологические и социологические технологии:** предсказание результатов выборов, анализ опросов, предсказание динамики рейтингов, выявление значимых факторов, кластеризация электората, исследование и визуализация социальной динамики населения;
- **безопасность и охранные системы:** распознавание лиц; идентификация личности по отпечаткам пальцев, голосу, подписи или лицу; распознавание автомобильных номеров, анализ аэрокосмических снимков, мониторинг информационных потоков в компьютерной сети и обнаружение вторжений, обнаружение подделок, анализ данных с видеодатчиков и разнообразных сенсоров;
- **ввод и обработка информации:** распознавание рукописных текстов, отсканированных почтовых, платежных, финансовых и бухгалтерских документов;
- **геологоразведка:** анализ сейсмических данных, ассоциативные методики поиска полезных ископаемых, оценка ресурсов месторождений.

Нейронные сети сейчас позволяют решать достаточно большое количество задач и в дальнейшей перспективе своего развития позволят решать все новые и новые проблемы и задачи.

### Библиографический список

1. Ежов А.А, Шумский С.А. Нейрокомпьютинг и его применение в экономике и бизнесе. - М.: МИФИ, 1998. – 224 с.
2. CodeNet – Все для программиста [Электронный ресурс]. URL: [http://www.codenet.ru/progr/alg/ai/hm/gl3\\_5.php](http://www.codenet.ru/progr/alg/ai/hm/gl3_5.php) (дата обращения 01.02.2016).
3. Wikipedia: свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.wikipedia.org/> (дата обращения 01.02.2016).

УДК 004.421; ГРНТИ 50.53.17

## АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ РОЯ ЧАСТИЦ И ПЧЕЛИНОГО РОЯ

Е. А. Софьин\*, В. С. Решетова\*\*

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, \*EugeneSofjin@gmail.com, \*\*arev62rus@mail.ru*

*Аннотация.* В данной статье проанализированы алгоритмы роя частиц и пчелиного роя, произведено сравнение результатов оптимизации целевых функций данными алгоритмами.

*Ключевые слова.* Оптимизация, эволюционные алгоритмы, роевой интеллект.

## ANALYSIS OF PARTICLE SWARM ALGORITHM AND BEE ALGORITHM

E. A. Sofjin\*, V. S. Reshetova\*\*

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, \*EugeneSofjin@gmail.com, \*\*arev62rus@mail.ru*

*Abstract.* In this article considered comparison of the results of optimization objective functions by particle swarm algorithm and bee algorithm.

*Keywords.* Optimization, evolutionary algorithm, swarm intelligence.

Решение достаточно большого количества задач фундаментальных наук, таких как физика, математика, химия, сводится к оптимизации некоторой функции. Для быстрого нахождения экстремума (глобального максимума или минимума) применяются алгоритмы поисковой оптимизации, которые также называют роевыми или популяционными. В данной статье будут рассмотрены алгоритмы роя частиц и пчелиного роя.

### *Алгоритм роя частиц*

В основу алгоритма роя частиц лег тот факт, что при формировании стаи птиц или насекомых они рано или поздно начинают стремиться к одной точке, постепенно замедляя скорость полета. В природе этой точкой может быть кормушка или иной источник пищи. Причиной подобного поведения является негласное правило, которому подчиняются птицы

и некоторые виды насекомых: кружа в небе, каждая птица изменяет свое положение в пространстве, в зависимости от положения остальных членов стаи, а при нахождении источника пищи оповещает ближайших сородичей о месте находки.

Последний факт является особенно важным и играет одну из ключевых ролей в рассматриваемом алгоритме. Так как источники пищи обычно располагаются случайным образом на достаточно большом расстоянии друг от друга, в одиночку птица может погибнуть, не найдя пищу за долгий период времени. Именно поэтому каждая особь остается в выигрыше, делясь с сородичами информацией о найденных источниках.

#### *Математическое описание алгоритма*

Впервые алгоритм роя частиц был предложен Джеймсом Кеннеди (Kennedy) и Расселом Еберхартом (Eberhart) в 1995 году. В этом алгоритме частица, подобно птице, имеет некоторую скорость и положение в каждый момент времени. Для данного положения можно вычислить соответствующее значение целевой функции, на основе которого частица будет перемещаться с определенной скоростью. При вычислении скорости учитывается информация о наилучшей «соседней» частице и информация о лучшем предыдущем положении частицы. Коррекция скорости и координат происходит после каждой итерации [1 – 3].

Чтобы понять принцип работы алгоритма, достаточно представить себе некоторое  $n$ -мерное пространство, в котором перемещаются частицы. Вначале они рассредоточены по всей площади поиска случайным образом. Каждая из них имеет произвольно выбранный вектор скорости. При перемещении частиц происходит расчет значения целевой функции в каждой из точек, лучшие из них запоминаются. После этого происходит коррекция направлений движения и скоростей всех частиц. В результате любая частица должна быть ближе к точке, которую нашла сама частица, и одновременно стремиться к лучшей глобальной точке. Через некоторое количество итераций большинство частиц должно собраться вблизи лучшего значения целевой функции.

Наиболее важным аспектом алгоритма является коррекция скорости частиц, которая определяется следующим образом:

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + \varphi_p r_p (p_i - \chi_{i,t}) + \varphi_g r_g (g_i - \chi_{i,t}),$$

где  $v_{i,t}$  –  $i$ -я компонента скорости при  $t$ -й итерации;

$\chi_{i,t}$  –  $i$ -я координата частицы при  $t$ -й итерации;

$p_i$  –  $i$ -я координата лучшего решения, найденного частицей;

$g_i$  –  $i$ -я координата лучшего решения, найденного всеми частицами;

$r_p, r_g$  – случайные числа, принадлежащие интервалу (0, 1);

$\varphi_g, \varphi_p$  – коэффициенты скорости.

Коррекция координаты каждой из частиц происходит по формуле:

$$\chi_{i,t+1} = \chi_{i,t} + v_{i,t+1}.$$

Наибольшая точность и скорость оптимизации достигается при использовании алгоритма роя в каноническом виде. В данном варианте сходимость функции не так сильно зависит от коэффициентов скоростей  $\varphi_g$  и  $\varphi_p$ , что происходит за счет следующих нововведений:

$$v_{i,t+1} = X[v_{i,t} + \varphi_p r_p (p_i - \chi_{i,t}) + \varphi_g r_g (g_i - \chi_{i,t})],$$

где  $X$  определяется как:

$$X = \frac{2k}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|},$$

$$\varphi = \varphi_p + \varphi_g,$$

$$\varphi > 4,$$

$k$  – коэффициент, лежащий в интервале (0, 1).

#### *Алгоритм пчелиного роя*

Основой алгоритма пчелиного роя послужила модель поведения медоносных пчел при сборе нектара [1, 3].

Главной задачей пчелиной колонии в природе является нахождение областей с наибольшей плотностью нектара. Пчелы вылетают из улья и начинают поиск со случайных позиций и со случайной скоростью. Каждая пчела запоминает лучшие участки и сообщает об их расположении всей колонии. После этого пчела либо возвращается к месту, где она обнаружила наибольшее количество нектара, либо исследует место, найденное другими пчелами. Нужно учитывать, что любая особь может найти лучший участок, куда впоследствии слетится весь рой. Однако пчела может не заметить подходящий участок и пролететь мимо него. В процессе поиска концентрация пчел на лучших участках возрастает, а их скорость падает. В итоге, не найдя места с большим количеством нектара, пчелы непрерывно роятся в области, где плотность цветов достигает максимума.

#### *Математическое описание алгоритма*

Алгоритм пчелиного роя является достаточно молодым, и его первые упоминания датируются 2005 годом [1].

Пчела в колонии рассматривается как агент, который постоянно ускоряется в направлении наилучшего участка, найденного лично, и участка с наибольшей концентрацией цветов в общем. Агенты перемещаются в  $n$ - мерном пространстве в поисках подходящих участков. Каждый участок характеризуется функцией пригодности: чем больше цветов, тем лучше позиция.

Так же, как и в природе, в алгоритме пчелы запоминают лучшие участки, называемые персональными наилучшими позициями (ПНП). ПНП каждой пчелы определяется территорией, которую исследовала пчела в процессе поиска. Глобальной наилучшей позицией (ГНП) называется участок с самой высокой пригодностью на всем пространстве поиска. Пчелы передают информацию друг другу, и в итоге весь рой стремится к данному источнику нектара. В случае нахождения позиции с большей пригодностью ГНП изменяет свое место расположения [3].

Первым шагом при реализации алгоритма роя пчел является выбор целевой функции, которую нужно оптимизировать, определение интервала для поиска лучших значений, выбор размера самой колонии. После этого все пчелы располагаются на выбранном интервале случайным образом, задаются скорость и направление движения каждой особи в отдельности. Далее происходит перемещение пчел в пространстве, при этом осуществляются оценка пригодности каждого участка, сравнение ПНП и ГНП.

Одним из самых важных действий является корректировка скорости каждой пчелы. Данные преобразования выступают в качестве основного элемента для оптимизации. Скорость полета изменяется в зависимости от взаимного расположения ПНП и ГНП и выражается следующей формулой [3]:

$$v_n^{i+1} = \omega v_n^i + c_1 \text{rand}() (p_n - \chi_n) + c_2 \text{rand}() (g_n - \chi_n),$$

где  $v_n^i$  – скорость пчелы в  $n$ -м измерении на предыдущем шаге;

$\chi_n$  – координата пчелы в  $n$ -том измерении;

$p_n$  – ПНП;

$g_n$  – ГНП;

$\omega$  – коэффициент, лежащий в интервале (0, 1), называемый «инерциальным весом», который показывает, как долго может перемещаться каждая пчела без изменения курса под влиянием ПНП и ГНП;

$\text{rand}()$  – функция, возвращающая число в интервале (-1, 1);

$c_1$  – масштабный коэффициент, определяющий влияние ПНП на траекторию движения каждой пчелы;

$c_2$  – масштабный коэффициент, определяющий влияние ГНП на траекторию движения каждой пчелы.

Интересным является тот факт, что интервал для поиска минимума, задаваемый изначально, не упоминается в формуле. Это значит, что любая пчела может свободно вылететь за указанные границы, однако во время нахождения вне разрешенной области значения, полученные пчелой, не учитываются до тех пор, пока она не вернется обратно в указанное ранее пространство поиска.

#### Сравнение результатов работы алгоритмов роя частиц и пчелиного роя

Для сравнения производительности оба алгоритма были реализованы на языке программирования C#. Для наглядности был добавлен графический компонент ZedGraph, позволяющий отслеживать положение каждой частицы/пчелы в процессе оптимизации. По завершении расчетов выводится график, демонстрирующий сходимость значения целевой функции к оптимуму. При этом на графике отображаются значения целевой функции для лучшей частицы/пчелы на текущей итерации. Результат работы программы, реализующей алгоритм роя частиц, показан на рис. 1. Программная реализация алгоритма пчелиного роя выполнена аналогичным образом.

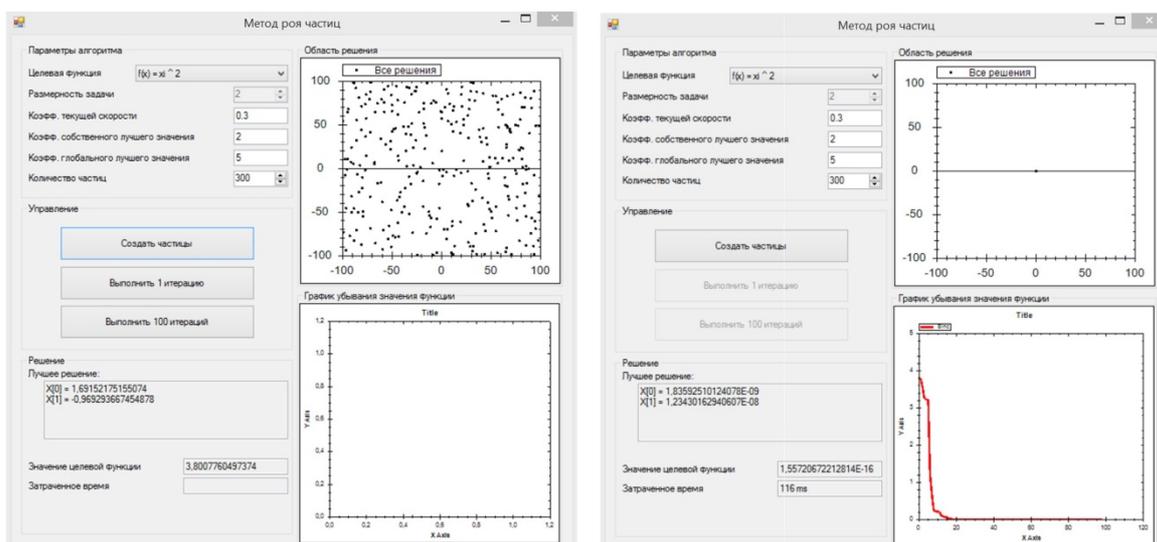


Рис. 1. Работа программы, реализующей алгоритм роя частиц

Для сравнения производительности работы алгоритмов были выбраны две целевые функции, глобальные минимумы которых располагаются в точке 0: функция сферы и функция Растригина (см. табл. 1). В табл. 2 и 3 приведены результаты минимизации целевых функций при одинаковом количестве итераций.

Таблица 1. Тестовые функции

Функция	Формула
Растригина	$10n + \sum_{i=1}^n [(x_i)^2 - 10 \cdot \cos(2\pi(x_i - 1))]$
Сфера	$\sum_{i=1}^n (1 - x_i)^2$

Таблица 2. Результаты оптимизации целевых функций алгоритмом роя частиц

Функция	Пространство поиска	Значение функции	$x_1$	$x_2$
Растригина	-5,12; 5,12	0	-3.17E-9	-1,02E-9
Сфера	-100; 100	1,63E-16	3.87E-9	1,08E-8

Таблица 3. Результаты оптимизации целевых функций алгоритмом пчелиного роя

Функция	Пространство поиска	Значение функции	$x_1$	$x_2$
Растригина	-5,12; 5,12	3.07E-11	3.75E-6	2,12E-6
Сфера	-100; 100	1,63E-6	0.07E-6	1,16E-6

Из полученных результатов видно, что точность алгоритмов значительно отличается. При оптимизации функции поиск глобального оптимума всегда осуществляется на определенном промежутке: в нашем случае (-100, 100) для функции сферы и (-5.12, 5.12) для функции Растригина. Отличием алгоритма роя частиц является то, что частицы не могут вылететь за пределы выбранного промежутка. Это значительно влияет на вероятность нахождения лучшего значения. В свою очередь, в пчелином алгоритме используются так называемые «невидимые стены». Пчелы свободно могут вылетать за границы выбранной области, однако точки, обнаруженные такими пчелами, не учитываются в процессе оптимизации.

Таким образом, можно заключить, что алгоритму пчелиного роя потребуется больше итераций, чтобы приблизиться к точности результатов алгоритма роя частиц.

### Библиографический список

1. Craig Reynolds. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. 21(4). 1987. pp. 25 – 34.
2. Kennedy J., Eberhart R. C. Particle swarm optimization // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. 1995. pp. 1942 – 1948.
3. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов // Информационные технологии. №7. 2012. С.1 – 32.

УДК 004.75; ГРНТИ 20.15.05

## ШАБЛОНЫ КОМПОНЕНТА HEAT В OPENSTACK

**О.Ю. Михеева, М.А. Иванов, К.В. Куликов**

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н. Г. Столетовых,  
Россия, Владимир, oxana.miheeva@mail.ru, k.kulikov@vlsu.ru*

*Аннотация.* В этой статье представлен обзор проекта Openstack. Рассматривается общий функционал компонента Heat в Openstack. Приводится краткий обзор написания сценария для запуска создания экземпляра и разбор основных блоков структуры сценария.

*Ключевые слова.* Openstack, открытый исходный код, облачные вычисления, Heat, Heat шаблоны, Orchestration, Horizon..

## HEAT TEMPLATE IN OPENSTACK

**O.Yu. Mikheeva, M.A. Ivanov, K.V. Kulikov**

*\*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,  
Russia, Vladimir, oxana.miheeva@mail.ru, k.kulikov@vlsu.ru*

*Abstract.* This article provides an overview of the project OpenStack. It considers the overall functionality of the Heat component in the Openstack. A brief overview of writing a script to run the instance creation and analysis of key blocks script structure.

*Keywords.* Openstack, Open source, Cloud Computing, Heat, Heat Template, Orchestration, Horizon.

### 1. Введение

Облачные вычисления с использованием Openstack являются относительно молодым направлением в информатике, которое занимается всеми основными компьютерными аспектами и соответствующими технологиями, такими как виртуализация, сети, облачное хранилище, параллельные вычисления и т.д. Облачные вычисления могут быть рассмотрены как технология, которая начала тенденцию использования вычислительных ресурсов [1].

В наши дни есть список компаний технологических гигантов, которые предоставляют свои облачные решения. Например, Microsoft Azure [2], IBM Cloud [3], Amazon EC2 [4] и др. Все они в основном частные (или собственные), это означает, что они разработаны и поддерживаются одноименными организациями и нет или почти нет доступа к их исходному коду.

Кроме вышеупомянутых имен, которые являются крупными игроками на рынке облачных вычислений, есть платформы облачных вычислений с открытым исходным кодом, которые благодаря этому имеют быстрый рост и развитие. Для заметки: программное обеспечение с открытым исходным кодом означает, что оно находится в публичном доступе и может быть изменено.

Openstack, OpenNebula, Puppet, Eucalyptus – это примеры платформ облачных вычислений с открытым исходным кодом.

Openstack – это множество программных средств, которые предназначены для управления платформой облачных вычислений, среди которых могут быть как публичные “облака”, так и частные. И все это бесплатно. В первую очередь это используется в качестве “инфраструктуры как услуга” (Infrastructure as a Service) или кратко – IaaS. Модель предоставляет облачные вычисления, при которых потребитель получает возможность управлять средствами обработки и хранения, а также и другими фундаментальными вычислительными ресурсами (виртуальными серверами и сетевой инфраструктурой), и все управление осуществляется через веб-интерфейс. Панель управления – Horizon (dashboard), средства командной строки (command-line tools - CLI), или RESTful API (передача состояния представления). OpenStack выпустили в соответствии с лицензией Apache License v2.0.

Проект Openstack был совместной инициативой NASA и Rackspace Hosting в 2010 году. Сейчас он находится под управлением некоммерческой организации Openstack foundation, которая была создана в 2012 году. Более чем 200 компаний, таких как IBM, Intel, Cisco, Go Daddy, HP, Dell, Avaya, AMD, VMware, Canonical, Oracle, SUSE Linux присоединились к этому проекту. Openstack сообщество собирается каждые 6 месяцев в разных точках земного шара, чтобы сделать очередной релиз. Совсем недавно саммит в Атланте привлек 4500+ посетителей, что составило в 2 раза большую аудиторию по сравнению с саммитом, который проходил полгода назад.

Первый релиз, который сделало Openstack сообщество, появился в октябре 2010 года и был назван Austin. Затем были релизы с именами Bexar, Cactus, Diablo, Essex, Folsom, Grizzly, Havana, Icehouse и Juno, они были выпущены подряд с разницей примерно в 6 месяцев. В настоящее время релиз носит название Kilo.

Из многих подпроектов Openstack можно выделить Heat и Horizon, это оба направления, на которых сосредоточен генератор шаблонов (the template generator). Horizon – это веб-интерфейс Openstack, созданный на Django Framework, в то время как Heat – это основной проект в Openstack Orchestration [1].

Orchestration описывает автоматическое устройство, координацию, управление сложными компьютерными системами и службами.

Далее обзревается Openstack компоненты Heat & Horizon. Затем рассматривается представление Template Generator с его реализацией деталей и архитектурой.

## 2. Общие сведения об архитектуре Openstack

Openstack – решением с открытым кодом, хорошо масштабируемое, надежное и имеет возможность легко развернуть “облака” с бесконечными, в идеале, ресурсами. Все компоненты предназначены для совместной работы, чтобы обеспечить работу IaaS. В состав входит много компонентов, которые обеспечивают различные сервисы через Application programming interface (API). Одни сервисы могут использовать другие с помощью API. Следовательно, в Openstack интеграция различных сервисов достигается с помощью API.

Openstack состоит из следующих компонентов.

- A. Horizon (Служба панели управления - “Dashboard service”)
- B. Heat (Управление шаблонами - “Orchestration”)
- C. Glance (Хранилище образов ОС - “Image store”)
- D. Keystone (Служба аутентификации - “Authentication service”)
- E. Swift (Объектное хранилище - “Object Store”)
- F. Nova (Служба вычислений - “Compute service”)

Как упоминалось ранее, в данной статье уделено внимание только в двум компонентам из этого списка.

#### A. Horizon

Horizon - это Django приложение, которое обеспечивает графический пользовательский интерфейс для использования Openstack сервисов.

Его архитектура имеет много общего с другими веб-приложениями.

1. Он развернут на apache server с использованием mod-wsgi.
2. БД, которая опирается на другие сервисы для данных. Он состоит из отдельных Python модулей, которые обычно сообщаются по средствам API [1].

#### B. Heat

Heat – это основной проект в OpenStack Orchestration. Он реализует Orchestration движок для запуска нескольких составных приложений облачных вычислений на основе шаблонов, которые представляют собой текстовые файлы и которые могут рассматриваться как код. Heat развивает свой основной шаблон, но также стремится обеспечить совместимость с AWS CloudFormation шаблоном, таким образом, многие из уже существующих CloudFormation шаблонов могут быть запущены на Openstack. Heat предоставляет как OpenStacknative ReST API, так и CloudFormation Query API.

#### 3. Работа с Heat

Шаблон Heat описывает облачную инфраструктуру в удобном и легко читаемом для пользователя текстовом файле.

Эта инфраструктура включает в себя ряд ресурсов, которые не имеют серверных ограничений, ограничений динамическими IP, объемами, группами безопасности, пользователями и т.д.

В шаблоне можно также указать связи между ресурсами. Например, Load Balancer L1 подключается к серверу S1 и серверу S2 и т.д. Это позволяет Heat вызывать Openstack API для создания всей инфраструктуры в правильном порядке, чтобы запустить приложение.

Heat также позволяет обновлять инфраструктуру. Простая загрузка нового шаблона для существующего стека изменит инфраструктуру, и Heat позаботится о таких вещах, как добавление или удаление ресурсов, по мере необходимости.

#### 4. Недостатки, связанные с шаблонами

Написать шаблон, передать его в Heat для дальнейшего запуска создания желаемой инфраструктуры - выглядит идеально.

Но и в этом также имеются некоторые недостатки. Далее они рассматриваются по очереди:

- написание шаблонов – это трудоемкая задача, так как нужно придерживаться заданного формата, например HOT (HeatOrchestration Template) формат;
- написание простого шаблона запуска стека с одним экземпляром (“instance”) также представляется большой работой;
- в Horizon нет компилятора и отладчика, который укажет на ошибки и позволит администратору их исправить.

Итак, если администратор пропустит хотя бы один символ, то Horizon оповестит об этом. Далее пользователю нужно читать построчно текстовое представление шаблона, найти и исправить ошибку. На рисунке 1 представлен шаблон, который используется для запуска одного экземпляра.

```

heat_template_version: 2015-04-30

description: Simple template to deploy a single compute instance

resources:
  my_instance:
    type: OS::Nova::Server
    properties:
      key_name: my_key
      image: F18-x86_64-cfntools
      flavor: m1.small

```

Рис. 1. Скрипт шаблона для одного экземпляра

## 5. Структура шаблона.

В этой части статьи приведено описание блоков, указанных на рис. 1.

Шаблон состоит из нескольких блоков. В первом (“heat\_template\_version: 2015-04-30”) указываются версия шаблона и используемый формат описания. В каждом новом выпуске платформы openstack поддерживается свой набор свойств и атрибутов, который постепенно изменяется. В приведенном выше примере используется версия 2015-04-30. Она поддерживает все свойства, реализованные при выпуске релиза Icehouse. Во втором блоке (“description: Simple template to deploy a single compute instance”) приводится общее описание шаблона и его назначения.

Далее идет перечисление ресурсов. В этом блоке описываются создаваемые ресурсы: сети, роутер, серверы и другие.

Затем идет перечисление некоторых дополнительных параметров, которые будут переданы Heat при создании стека. В параметре key\_name указывается пара ключей для подключения к созданному серверу по ssh. В параметре image указывается имя образа ОС, которая будет загружена на создаваемую виртуальную машину. В параметре flavor указывается шаблон конфигурации вычислительных ресурсов (виртуальные процессоры), ресурсов памяти и ресурсов хранения (жесткие диски), которые должны быть назначены экземплярам виртуальных машин. При установке по умолчанию предоставляется пять flavor-шаблонов, конфигурация которых может быть изменена администратором.

Более подробную информацию о структуре шаблонов можно найти в официальной документации проекта [5].

## 6. Текущая архитектура Heat

Текущая архитектура для создания стека в OpenStack предлагает указать шаблон с помощью любого из следующих способов: URL, или загрузить входной файл через компонент Horizon, или использовать интерфейс командной строки. После загрузки шаблона происходит его проверка средствами Heat Engine, после чего начинается запуск стека. Этот шаблон написан вручную. После развертывания стека пользователь может только просмотреть топологию стека. На рис. 2 представлена архитектура компонента Heat.

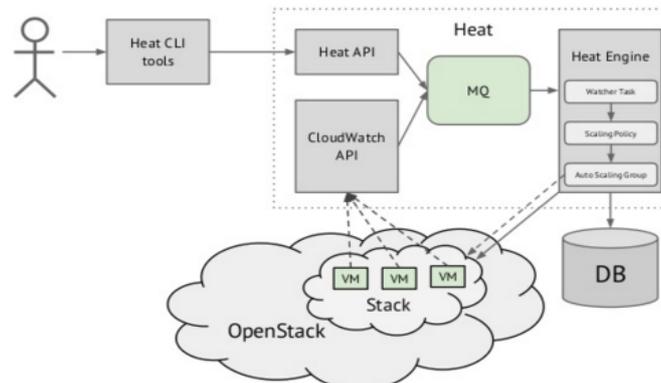


Рис. 2. Текущая архитектура компонента Heat

## Библиографический список

1. Prashant Sangale, Bharati Ainapure Kedar V. Kulkarni, Shrikant Gangade, Sujay Bothe. Heat Template Generator in Openstack//International Journal Of Engineering And Computer Science ISSN:2319-7242 Volume 4 Issue 5 May 2015, Page No. 11778-11782.
2. Microsoft Azure [Электронный ресурс] URL: <http://azure.microsoft.com/en-in/> (дата обращения 25.02.2016).
3. IBM Cloud [Электронный ресурс] URL: <http://www.ibm.com/cloud-computing/in/en/> (дата обращения 25.02.2016).
4. Amazon elastic compute cloud (EC2), [Электронный ресурс] URL: <http://aws.amazon.com/ec2/> (дата обращения 25.02.2016).
5. OpenStack Template. [Электронный ресурс]. URL: [http://docs.openstack.org/developer/heat/template\\_guide/index.html](http://docs.openstack.org/developer/heat/template_guide/index.html) (дата обращения 25.02.2016).

УДК 004.896; ГРНТИ 50.41.25

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЧЕРЕДИ

Л.Е. Мартынова, Н.И. Цуканова

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, liudmila.martynova.93@mail.ru, ninakorobova77@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки программного обеспечения для анализа эффективности работы электронной очереди.

*Ключевые слова.* Электронная очередь, анализ эффективности работы электронной очереди, автоматизированный подход к анализу эффективности работы электронной очереди.

## SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ANALYSIS PERFORMANCE OF ELECTRONIC QUEUE

L.E. Martynova, N.I. Tsukanova

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Ryazan, Russia, liudmila.martynova.93@mail.ru, ninakorobova77@gmail.com*

*Abstract.* Theoretical and practical issues of software development for the analysis of the efficiency of the electronic-queue operation.

*Keywords.* Electronic queue, analysis of the effectiveness of the electronic-queue work, automated approach to the analysis of the efficiency of the electronic-queue work.

Электронная очередь — это современный программно-аппаратный комплекс, позволяющий организовать и оптимизировать управление потоком посетителей [1]. Такие системы помогают изменить и повысить качество обслуживания за счет автоматизации очереди посетителей, а также увеличить коэффициент работы персонала предприятия.

В основе любой системы электронной очереди лежат алгоритмы, максимально эффективно организующие работу предприятия и распределяющие поток клиентов по очередям и услугам. Но проблема эффективности работы все же имеет место быть в таких системах.

Основная причина данной проблемы заключается в воздействии человеческого фактора на функционирование системы. Система электронной очереди классифицируется как автоматизированная информационная система - предполагает участие в процессе обработки информации и человека, и технических средств, причем главная роль отводится компьютеру.

Тем не менее, специалисты, обслуживающие клиентов, занимают одно из важных мест в системе электронной очереди. Эффективная организация их работы позволяет существенно повысить общую эффективность работы системы.

Практически все системы электронной очереди позволяют вести учёт и статистику работы операторов и интенсивности потока для последующего планирования нагрузки на операторов. Но дальнейшая задача по распределению нагрузки и оценке специалистов ложится на аналитиков компании. Присутствие человеческого фактора в этом вопросе требует времени на анализ и принятия решения о более эффективном перераспределении нагрузки, а ведь система электронной очереди работает в реальном времени и должна оперативно принимать решения, повышающие эффективность ее работы. Еще одним фактором, выступающим против принятия решения о способах повышения эффективности

работы системы человеком, является возможность ошибки аналитика, что может привести к различным негативным последствиям:

- простую специалистов;
- высокой нагрузке на специалистов;
- увеличению очереди;
- увеличению общего времени ожидания в очереди;
- увеличению времени на оказание услуги.

Следует отметить, что хоть в базовую функциональность подобных систем не входит способность к анализу, заказчики заинтересованы в средствах, способных оценить эффективность работы электронной очереди и специалистов и порекомендовать методы для улучшения характеристик производительности. Программа, обладающая такими средствами, поможет уменьшить очереди, время ожидания в очереди, а также время на оказание услуги.

В ходе исследования современного состояния изучаемой проблемы была поставлена проблема необходимости создания программного обеспечения для анализа эффективности работы электронной очереди с целью дальнейшего повышения качества обслуживания клиентов.

Исходя из этого, цель научно-исследовательской работы определяется созданием автоматизированного подхода к анализу эффективности работы электронной очереди для последующего увеличения производительности.

Чтобы достичь поставленной цели, были выделены задачи, над которыми в данный момент идет работа:

- сбор и формализация данных электронной очереди;
- разработка алгоритмов для оценки эффективности работы электронной очереди;
- реализация разработанных алгоритмов в виде решения для оценки эффективности электронной очереди.

**На этапе сбора и формализации данных электронной очереди** были выделены следующие подзадачи:

- отобрать данные, оказывающие влияние на эффективность работы электронной очереди, а также характеризующие ее специалистов;
- выбрать структуру хранения полученных данных или знаний о системе.

На данном этапе проведено исследование и сделаны следующие выводы.

Системы электронной очереди очень распространены в настоящее время. Все они имеют схожие принципы функционирования. Поэтому проектируемое программное обеспечение для анализа эффективности должно иметь возможность обрабатывать данные из всех систем данного типа. Для этого необходимо привести данные к единому стандарту.

В этом ключе электронная очередь может рассматриваться как бизнес- процесс, а представление ее данных – в виде онтологической модели. Еще одним преимуществом онтологического подхода является возможность извлечения новых знаний о бизнес-процессе [2], что также важно при анализе эффективности работы электронной очереди.

В связи с этим в статье «Применение онтологической модели к анализу бизнес-процессов» был рассмотрен простой пример бизнес-процесса «Запись клиента на получение услуги» [2]. Было выявлено, что, несмотря на преимущества онтологического подхода, из-за его трудоемкости и возможных возникновений противоречий на практике лучше использовать объектно-ориентированный подход. А после получения отлаженной модели возможен возврат к онтологическому подходу.

**На этапе разработки алгоритмов для оценки эффективности работы электронной очереди** были выделены следующие подзадачи:

- выявить правила и закономерности, влияющие на эффективность работы электронной очереди;
- выбрать методы решения поставленной задачи и адаптировать их к конкретной сфере исследования;
- разработать алгоритмы для анализа эффективности работы электронной очереди.

На данном этапе были сделаны следующие выводы:

В ходе исследования предметной области электронная очередь была классифицирована как многоканальная СМО с очередью (ожиданием). В настоящее время продолжается изучение предметной области, а также проводится выявление и анализ характеристик, влияющих на эффективность работы электронной очереди.

**На этапе реализации разработанных алгоритмов в виде решения для оценки эффективности электронной очереди** были выделены следующие подзадачи:

- реализовать интуитивно понятный интерфейс программы;
- произвести кодирование разработанных алгоритмов;
- отладить и проверить работоспособность программы;
- протестировать готовый проект;
- внедрить программу в работу конкретной эксплуатируемой системы электронной очереди и протестировать работу в реальном времени.

В результате последовательного выполнения всех задач должна быть достигнута цель научно-исследовательской работы, результатом которой станет программное обеспечение.

### **Библиографический список**

1. Электронная очередь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://avcomm.ru/category/elektronnaya-ochered>.
2. Цуканова Н.И., Мартынова Л.Е. Применение онтологической модели к анализу бизнес-процессов [Текст] / Н.И. Цуканова, Л.Е. Мартынова // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28 [текст]: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.7. / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав. гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 211-214.

УДК 681.324; ГРНТИ 28.17.19

## **МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В РАМКАХ СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

**Д.В. Макаров, В.Л. Бурковский**

*Воронежский государственный технический университет,  
Россия, Воронеж, [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)*

*Аннотация.* Рассматриваются модели анализа характеристик неоднородной замкнутой сети массового обслуживания (СМО) с вероятностями перехода, зависящими от состояния сети.

*Ключевые слова.* Структурная модель, математическая модель, сеть массового обслуживания, узел обработки транзакций, СМО.

## **MODELS OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM ELEMENTS IN QUEUEING NETWORK**

**D.V. Makarov, V.L. Burkovsky**

*Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russia, [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)*

*Abstract.* Analysis models of the characteristics of closed queueing network with the transition probabilities, depending on network conditions are considered.

*Keywords.* Structural model, a mathematical model, queueing network, transaction processing unit.

Математическая модель распределенной информационной системы в формате сети массового обслуживания (СМО) имеет главную особенность, обусловленную наличием большого количества циркулирующих классов заявок. Введение классов заявок необходимо по двум причинам.

1. Для каждого класса в модели имеется своя матрица маршрутов, которая отражает информационные потоки, циркулирующие внутри системы.
2. Для каждого класса заявок имеется свое распределение времени обслуживания в узле.

Моделирование процессов обработки запросов не зависит от классов на уровне обработки выборки запросов, которые, в свою очередь, имеют одинаковое распределение длительностей обслуживания. Поэтому моделирование обработки запросов занимает более низкий уровень абстракции относительно реального устройства, и появляется возможность более точно описать взаимодействие между элементами распределенной информационной системы [1]. С помощью такого подхода также существенно упрощаются

последовательности вычисления основных характеристик модели системы. Если существует возможность эквивалентного преобразования модели за счет замены узла с различным временным распределением обслуживания на аналогичный элемент сети, но с одинаковым распределением длительности обслуживания для каждого класса, то целесообразно воспользоваться предложенным подходом. Дисциплина «первым пришел - первым обслужен» является элементарной с точки зрения расчета характеристик. Поэтому данная дисциплина применима в качестве дисциплины обслуживания в рамках предложенного подхода.

Рассмотрим некоторый узел СеМО. Интенсивность обслуживания обозначим  $\mu$ , а интенсивность пуассоновского входящего потока заявок –  $\lambda$ . Внутренняя архитектура узла такова, что внутри его происходит обслуживание заявок, находящихся на более низком уровне. То есть в рамках обработки одной заявки, находящейся в составе узла, происходит обработка нескольких заявок внутри его. Интенсивность обслуживания обработки обозначим  $\mu^*$ . Требуется найти такое преобразование внутренней структуры узла, при котором среднее время, приходящееся на обслуживание входящей заявки, остается постоянным, а также количество заявок, которые в данный момент находятся на обслуживании в узле, остается неизменным.

Должно быть выполнено условие постоянства количества заявок для составления уравнений локального и глобального баланса. Выполнение этого условия необходимо для возможности эффективного расчета параметров системы. Заявки, которые покидают внутренний узел, с вероятностью  $P_B$  возвращаются в начало очереди и с вероятностью  $1-P_B$  покидают узел. Поток заявок поступает во внутренний узел с интенсивностью  $\lambda^*$ . Данный поток, в свою очередь, состоит из двух потоков заявок - поступившие в узел  $\lambda$  и отправленные на повторное обслуживание.

Узел с преобразованной структурой должен быть эквивалентен исходному узлу по характеристикам. Это необходимо для того, чтобы получить равенство длительности обслуживания в исходном узле и длительности обслуживания в преобразованном узле. Для того чтобы применить алгоритмы расчета характеристик модели, которые основаны на составлении уравнения баланса, необходимо условие равенства количества заявок в исходном узле и в эквивалентном ему.

$$N^* = \frac{\frac{\lambda}{(1-P_B)}}{\frac{\mu}{(1-P_B)} - \frac{\lambda}{(1-P_B)}} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = N.$$

Из полученного выражения следует, что количество заявок внутри устройства обработки транзакций остается неизменным. Можно также отметить, что преобразование не влияет на увеличение количества элементов сети, а только приведет к модификации матрицы вероятностей переходов. Это значит, что при использовании преобразования не произойдет увеличение операций при расчете характеристик модели.

Процесс замены узла на эквивалентный не оказывает влияния на основные характеристики всей модели. Для вычисления главных характеристик сети массового обслуживания основой является матрица вероятностей переходов заявки, которая для исходной сети массового обслуживания имеет вид:

$$|P| = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{21} & \dots & P_{N-11} & P_{N1} \\ P_{12} & P_{22} & \dots & P_{N-12} & P_{N2} \\ P_{13} & P_{23} & \dots & P_{N-13} & P_{N3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1N} & P_{2N} & \dots & P_{N-1N} & P_{NN} \end{vmatrix}.$$

В этой матрице элементу  $P_{ij}$  соответствует вероятность перехода заявки после обслуживания из центра  $i$  в центр  $j$ . Из этого вытекает, что сумма элементов любого столбца матрицы равна единице. Если узел с индексом  $i$  не заменить эквивалентным, то соответствующий элемент матрицы вероятностей переходов  $P_{ii}$  будет равным нулю. Если

заменить узел на эквивалентный, то сумма вероятностей перехода в другие узлы должна стать равной  $(1-P_{Bii})$  с вероятностью перехода на повторное обслуживание  $P_{Bii}$ . Преобразование такого вида неизменно приведет к изменению решения системы уравнений. Коэффициент  $e_i^*$  будет определять отличие полученного решения от решения системы исходной СеМО:

$$e_i^* = e_i / (1 - P_{Bii}).$$

Рассмотрим динамические изменения коэффициентов  $x_i$ :

$$x_i^* = \frac{\frac{e_i}{(1 - P_{Bii})}}{\frac{\mu_i}{(1 - P_{Bii})}} = \frac{e_i}{\mu_i} = x_i.$$

Из вышесказанного можно сделать вывод, что, если заменить элемент СеМО по предложенной схеме, то не произойдет изменения распределения вероятностей состояний сети, а следовательно, и значений, которые вычисляются на основе матрицы состояний переходов.

Для того чтобы отразить обработку транзакций классов на одном и том же устройстве обработки транзакций, которые имеют различные интенсивности обслуживания, необходимо эквивалентное преобразование узла. Для достижения этого в матрицах вероятностей перехода заявок различных классов, которые соответствуют типам транзакций, нужно задать такие вероятности повторного обслуживания, чтобы полученная интенсивность обслуживания в преобразованном узле была одинакова для заявок всех классов [2, 3].

Формируя СеМО с вероятностями перехода заявки, которые зависят от состояния узлов, можно в мультипликативной форме выразить вероятность стационарного состояния. Если учитывать зависимость вероятности перехода заявки от состояния узлов, то можно добавить функции передачи к сомножителям в мультипликативном выражении, применимом для стационарного состояния сети. В случае, если вероятности перехода не зависят от состояния узлов, то функции передачи принимают постоянное значение.

Исходя из маршрута заявки, согласно которому она переходит из узла и подкласса с фиксированным коэффициентом передачи, для каждого узла и подкласса определяются форма и значение функции передачи.

Для учета различной интенсивности обслуживания заявок разных классов, для узлов с типом дисциплины обслуживания FIFO («первый пришел - первый обслужен») и для узлов, имеющих одинаковую интенсивность обслуживания для всех классов заявок, можно воспользоваться расширенным подходом к преобразованию структуры СеМО.

### Библиографический список

1. Кирпичников, А.П. Прикладная теория массового обслуживания [Текст] / А. П. Кирпичников. – Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008. – 118 с.
2. Бурковский, В.Л. Моделирование и анализ распределенных систем обработки информации [Текст] : монография / В.Л. Бурковский, А.Е. Соколов. - Воронеж : ВГТУ, 2002. – 148 с.
3. Соколов А.Е. Метод преобразования стохастической модели системы обработки информации для применения эффективных алгоритмов анализа [Текст] / Соколов А.Е., Бурковский В.Л. // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: сб. науч. тр. VI Междунар. открытой науч. конф. Воронеж, 2001. – С.79.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

## МЕТОД СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТОМ НА СЛОЖНОМ ФОНЕ

С.М. Ларионов, А.А. Селяев

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sergej.larionov.94@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются способы модификации корреляционно-экстремального метода определения положения движущегося объекта в последовательности изображений при условии частичного заслонения объекта и при наличии участков фона, схожих с объектом слежения.

*Ключевые слова.* Корреляционно-экстремальный алгоритм, заслонение объекта слежения, объект на сложном фоне.

# METHOD OF OBJECT TRACKING ON A COMPLEX BACKGROUND

S.M. Larionov, A.A. Selyaev

Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, sergej.larionov.94@mail.ru

*Abstract.* The methods of modification of template matching algorithm of finding the moving object location in a sequence of images provided partial occlusion of target object and at presence of background areas, similar to the tracking object, are considered.

*Keywords.* Template matching algorithm, occlusion of tracking object, object on a complex background.

В настоящее время цифровая обработка изображений имеет широкий спектр применения, начиная от дорожного движения и медицины и до робототехники и военно-промышленного комплекса. При решении многих прикладных задач необходимо осуществлять слежение за некоторым движущимся объектом в последовательности кадров. На практике для определения положения объекта на изображении зачастую используют корреляционно-экстремальный разностный алгоритм, в основе которого лежит нахождение минимума критериальной функции вида (1):

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m |G(\alpha + i, \beta + j) - H(i, j)| \quad (1)$$

где  $F(\alpha, \beta)$  – критериальная корреляционная разностная функция,  $\alpha = \overline{1, (p-n)+1}$ ,  $\beta = \overline{1, (q-m)+1}$ ;  $G(\alpha+i, \beta+j)$  – значение яркости точки исходного изображения  $G$  размером  $p \times q$  с координатами  $\alpha+i$  и  $\beta+j$ ;  $H(i, j)$  – значение яркости точки эталонного изображения  $H$  с координатами  $i$  и  $j$ ;  $(n+1) \times (m+1)$  – число точек эталона  $H$ .

Координаты  $\alpha_m$  и  $\beta_m$ , соответствующие минимальному значению критериальной функции  $F(\alpha_m, \beta_m)$ , принимаются в качестве искоемых координат объекта наблюдения в текущем кадре.

Однако, если в процессе слежения объект наблюдения на некоторый короткий промежуток времени частично скрыт другими элементами сцены или его изображение частично искажено (например, из-за вспышек, дыма и т.п.), то при использовании критериальной функции вида (1) положение объекта может быть определено неточно вплоть до полной потери объекта. Вопрос о том, как работать с такими изображениями, если имеющееся эталонное изображение объекта не полностью ему соответствует, остаётся открытым, поэтому задача создания систем наблюдения, нацеленных на обработку изображений частично заслонённых объектов, в настоящее время является весьма актуальной.

В основе предлагаемого метода лежит модифицированный корреляционно-разностный алгоритм. Согласно этому алгоритму при вычислении критериальной функции вида (1) предлагается не использовать те пары точек изображений  $G$  и  $H$ , которые существенно отличаются друг от друга. Для этого вычисляется разность  $f$  между значением яркости точки текущего кадра  $G$  и значением яркости соответствующей точки эталонного изображения  $H$  по формуле (2):

$$f = |G(\alpha + i, \beta + j) - H(i, j)| \quad (2)$$

Если эта разность оказывается больше некоторой пороговой величины  $T$ , то она не учитывается при вычислении критериальной функции. При этом количество исключённых пар точек не должно быть велико и превышать некоторой величины  $N$ . В противном случае решение о соответствии изображений может быть принято по слишком малым частям изображений и приводить к неправильным результатам.

Если предположить, что изображения подвержены действию только гауссовского аддитивного шума с нулевым средним и известным средним квадратическим отклонением  $\sigma$ , то порог  $T$  следует выставить как  $T=3 \cdot \sigma$ .

Таким образом, представленный модифицированный корреляционно-разностный алгоритм позволяет определить координаты объекта слежения при его частичном заслонении за счёт исключения из рассмотрения заслонённых и искажённых точек.

Для решения проблемы частичного заслонения объекта также возможно использование метода экстраполяции. Однако данный метод удобно применять в разомкнутых системах слежения за объектом, то есть, когда видеодатчик неподвижен, а фон не изменяется. Если же речь идет об обработке изображений в замкнутых системах управления, то по причине перемещения видеодатчика, неоднородности фона и изменения самой сцены становится проблематично оценить траекторию движения и скорость объекта, и как следствие при использовании алгоритма экстраполяции возникают сложности.

Другой немаловажной проблемой, возникающей при слежении за движущимся объектом, является возможность наличия на изображении текущего кадра элементов сцены, то есть участков фона или других движущихся объектов, схожих с целевым по яркостной характеристике. Следует отметить, что корреляционно-экстремальный разностный алгоритм, основанный на вычислении критериальной функции вида (1), зачастую не справляется с поставленной задачей и приводит к срыву слежения.

Ошибки определения координат движущегося объекта в данном случае объясняются тем, что критериальная функция вида (1) может иметь несколько близких по величине значений, каждое из которых может быть принято за минимальное под действием тех или иных шумовых явлений, например, как показано на рисунке.

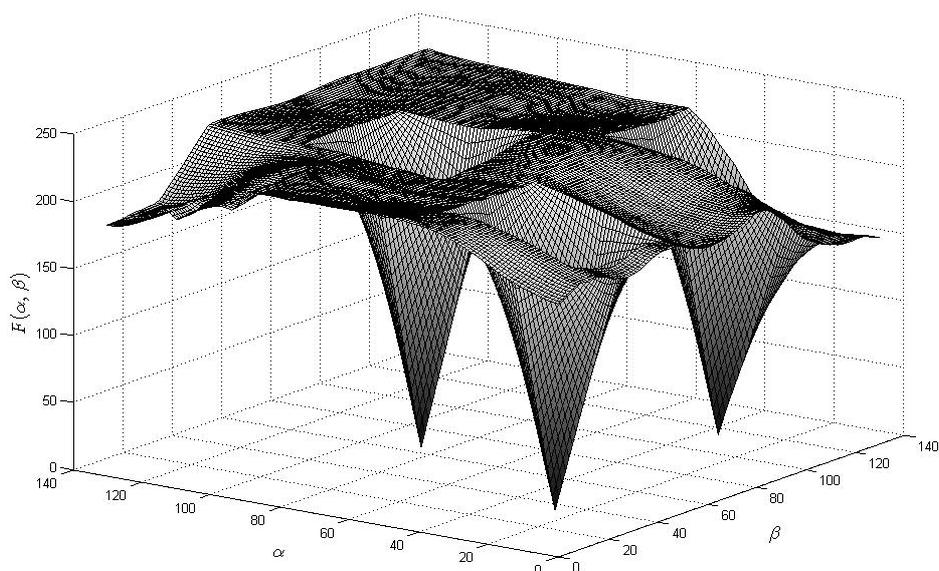


График зависимости двумерной критериальной функции  $F(\alpha, \beta)$  вида (1)

Для устранения указанного недостатка предлагается использовать модифицированную корреляционную функцию, учитывающую перепады яркости на анализируемых изображениях. Рассмотрим разложение в ряд Тейлора для функции двух переменных. Пусть функция  $\varphi(x, y)$  имеет полные производные вплоть до  $n$ -го порядка включительно в некоторой окрестности точки  $(x_0, y_0)$ .

Введём дифференциальный оператор  $D$  согласно формуле (3):

$$D = (x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y} \quad (3)$$

Тогда разложением в ряд Тейлора функции  $\varphi$  в окрестности точки  $(x_0, y_0)$  будет выражение (4):

$$\varphi(x, y) = \varphi(x_0, y_0) + D^1\varphi(x_0, y_0) + \frac{D^2\varphi(x_0, y_0)}{2!} + \dots \quad (4)$$

Исходя из вышесказанного, для решения задачи слежения при наличии участка сцены, схожего с целевым объектом, и повышения точности определения координат объекта на изображении предлагается разложить критериальную функцию  $F$  в ряд Тейлора, отсекая все члены разложения выше первого порядка, согласно выражению (5):

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \left( (G(\alpha + i, \beta + j) - H(i, j)) + (G'(\alpha + i, \beta + j) - H'(i, j)) \right) \quad (5)$$

где  $G'(\alpha + i, \beta + j)$  – значение градиента яркости изображения текущего кадра  $G$  в точке с координатами  $\alpha + i$  и  $\beta + j$ ;  $H'(i, j)$  – значение градиента яркости эталонного изображения  $H$  в точке с координатами  $i$  и  $j$ .

Таким образом, помимо яркостной характеристики, в выражение критериальной функции  $F$  будет включено значение градиента, т.е. перепадов яркости на эталонном изображении  $H$  и на изображении текущего кадра  $G$ .

Если рассматривать случай, когда в изображение  $H$  входят только точки объекта, то использование в качестве критериальной функции  $F$  вида (5) дает возможность точнее определить положение объекта, так как объект будет иметь более выраженные перепады яркости, чем схожий с ним участок фона.

Как показали исследования алгоритма, если эталонное изображение  $H$ , помимо объекта слежения, включает в себя и точки фона, то критериальная функция  $F$  вида (5) не ухудшает работу рассматриваемого корреляционно-разностного алгоритма. Стоит отметить, что при наличии большого числа внутренних перепадов яркости на изображении объекта использование критериальной функции вида (5) помогает более точно определить координаты объекта слежения.

Обобщив две модификации корреляционно-экстремального разностного метода, описанные выше, придём к следующей структуре модернизированного алгоритма определения положения движущегося объекта в последовательности кадров: для расчёта критериальной функции  $F(\alpha, \beta)$  следует применять выражение вида (5), причем, при её вычислении необходимо использовать только те пары точек изображения текущего кадра  $G$  и эталона  $H$ , для которых выполняется условие (6):

$$f < T, \quad (6)$$

где  $f$  – величина, вычисляемая согласно выражению вида (2);  $T$  – некоторый порог, выставляемый до начала работы алгоритма, исходя из характера и величины шума на анализируемых изображениях.

Предлагаемый метод слежения за объектом на сложном фоне был протестирован на различных видеопоследовательностях, для разной степени заслонения объекта и разного отношения сигнал-шум, при различных значениях пороговых величин  $T$  и  $N$ . Результаты показали, что в ряде случаев, когда применение корреляционно-разностного алгоритма (1) приводит к неточному определению координат движущегося объекта или срыву слежения, модифицированный метод справляется с задачей. Исследования предлагаемого алгоритма были проведены в среде программирования Matlab. Программа находит координаты движущегося объекта в последовательности кадров как при его частичном кратковременном заслонении другим элементом сцены, так и при наличии на изображении текущего кадра некоторой области, схожей с целевым объектом по яркостной характеристике. На изображениях обрабатываемых последовательностей присутствовал аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием. Полученные данные подтверждены визуальным слежением за объектом.

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРИ ЕГО РАЗРАБОТКЕ**

**С.С. Кузянов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, stepan.kuzyanov@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические вопросы анализа влияния изменений требований к программному обеспечению при его разработке.

*Ключевые слова.* Анализ влияния изменений, требования к программному обеспечению, трассировка требований, управление требованиями.

## **CHANGE IMPACT ANALYSIS OF SOFTWARE REQUIREMENTS DURING ITS DEVELOPMENT**

**S.S. Kuzyanov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, stepan.kuzyanov@gmail.com*

*Abstract.* Theoretical questions of analysis of the impact of requirements changes.

*Keywords.* Change impact analysis, software requirements, requirements traceability, and requirements management.

Требование к программному обеспечению – это условие, которому должно удовлетворять разрабатываемое программное обеспечение. Управление требованиями – это процесс выявления, документирования, анализа и управления изменениями требований.

В отсутствие управления требованиями к программному обеспечению более двух третей проектов завершаются неудачей, так как они не удовлетворяют потребностям заказчика, выходят за рамки сроков и бюджета (по данным отчета Standish Group).

Самым трудоемким процессом в управлении требованиями является оценка влияния на проект предлагаемых изменений требований. Изменением требований считается добавление новых требований или модификация уже существующих после утверждения спецификации требований.

Изменения требований к системе неизбежны. Проблема заключается в том, что изменения оказывают значительное влияние на уже выполненную работу. Оценка изменений требований позволяет контролировать затраты на разработку проекта. Для оценки влияния изменения требований применяются анализ влияния изменений.

Анализ влияния позволяет команде принимать решения о том, какое изменение одобрить, а какое нет. При анализе влияния изменений определяются компоненты, которые понадобятся добавить, изменить или удалить, и оцениваются затраты на реализацию изменений. Основным средством управления изменяющимися требованиями является трассировка требований.

Трассируемость позволяет описывать и отслеживать связи между различными артефактами требований – бизнес-требованиями, системными требованиями в различных формах (в том числе в виде вариантов использования), а в широком смысле и артефактами процесса разработки вообще [1].

Существуют специализированные системы управления требованиями, которые обладают различными функциями. К системам управления требованиями, поддерживающим трассировку, относятся Borland Caliber, IBM Rational RequisitePro, IBM Telelogic DOORS, Sparx Enterprise Architect, 3SL Cradle. Данные системы позволяют устанавливать связи между требованиями, которые отображаются в матрице трассировки. При изменении требований система отображает затрагиваемые изменением требования на основе установленных зависимостей.

Проблема заключается в том, что трассировка в таких системах позволяет выявить компоненты, которые может потребоваться изменить, т.е. оценить масштаб изменений, но не позволяют оценить затраты, связанные с реализацией изменения. Для оценки затрат на реализацию изменения необходимо разработать соответствующий алгоритм трассировки требований.

Для осуществления трассировки каждое требование должно принадлежать определенному типу: наиболее распространена классификация требований на бизнес-требования, пользовательские требования и функциональные требования. Бизнес-требования описывают назначение программного обеспечения, составляются топ-менеджерами предприятия. Пользовательские требования описывают решаемые системой задачи, требования к качеству системы, оборудованию и т.д. Функциональные требования описывают поведение разрабатываемой системы, ее функции. Трассировка в таком случае осуществляется в направлении от бизнес-требований к системным требованиям и от системных требований – к функциональным.

При трассировке используются различные виды отношений между требованиями. Выделим основные из них: «Связано с» – простая ссылка на другой артефакт, «Невозможно реализовать без» – требование не может быть выполнено без реализации другого требования (блокирующая связь), «Является частью» – связанный артефакт является частью другого артефакта (иерархическая связь), «Дублирует» – после выполнения данного требования выполнится другое, «Предшествует» – определяет порядок реализации требований (требование А должно быть выполнено до того, как начнется реализация требования В).

Тип требований и их отношения, вместе взятые, называются стратегией трассируемости. Она должна быть определена заранее и задокументирована в Плане управления техническими требованиями [2].

Каждое требование содержит определенное количество атрибутов (свойств) требования. Обычное любое требование (Requirement) содержит такие атрибуты, как «Уникальный идентификатор требования» (ID), «Наименование» (Name), «Текст требования» (Text), «Автор» (Author) и атрибуты, определяемые разработчиками спецификации требований.

Введем такие атрибуты, на основе которых можно будет оценить затраты на реализацию и изменение требования: «Сложность» (Complexity) – сложность реализации требования (высокая, средняя или низкая), «Риск» (Risk) – вероятность не реализации требования, «Приоритет» (Priority), «Уровень тестирования» (Test level) – вид тестирования требования (интеграционное или модульное), «Статус» (Status) – статус работ по реализации требования (реализовано, в разработке, в ожидании реализации), «Время реализации» (Development time) – затраченное время на реализацию требования, «Время в разработке» (Under development time) – как долго требования находится в разработке, «Время на реализацию» (Time on the development).

Каждому типу требования, виду связи и атрибуту поставим в соответствие определенный безразмерный коэффициент, характеризующий его относительную важность. Введем соответствующие обозначения коэффициентов: для типа требования –  $Qrt_i$ , для вида связи –  $Qrp_i$ , для атрибутов –  $Qa_i$ .

Таким образом, введя числовые эквиваленты атрибутам требований, затраты на реализацию требования можно оценить по формуле:

$$Sd = Qrt_i \cdot \sum_{j=1}^N Qa_j A_j,$$

где  $A_j$  –  $j$ -й атрибут требования;  $Qa_j$  – коэффициент важности  $j$ -го атрибута;  $Qrt_i$  – коэффициент важности  $i$ -го типа требования;  $N$  – количество атрибутов.

Затраты на изменение требования можно оценить по формуле:

$$Sm = \sum_{i=1}^K Qrp_i Sd_i,$$

где  $Sd_i$  –  $i$ -е связанное требование;  $Qrp_i$  – коэффициент важности  $i$ -й связи;  $K$  – количество связанных требований.

Алгоритм анализа влияния изменений требований следующий: для каждого требования оцениваются затраты на его реализацию, на основе связей между требованиями строится матрица трассировки, при запросе пользователя на изменение требования оценивается масштаб изменений и рассчитываются затраты на изменение требования. Результаты должны быть представлены пользователю системы в виде матрицы трассировки или в виде дерева трассировки.

Для пользователей разрабатываемой системы управления требованиями необходимо предусмотреть возможность настройки типов требований, типов связей между требованиями и значений соответствующих коэффициентов. Также необходимо предусмотреть возможность кардинальности отношений «многие-ко-многим».

Разрабатываемая система позволит оценить не только масштаб изменений, но и затраты на изменения требований, что является основным и весьма сложным процессом при управлении требованиями к программному обеспечению.

### Библиографический список

1. Трассируемость требований. EAM, ERP, Программное обеспечение [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Трассируемость\\_требований](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Трассируемость_требований) (дата обращения 23.02.2016).
2. Никуда без трассировки: практические советы по внедрению трассируемости [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/ru/library/behrens/> (дата обращения 23.02.2016).

УДК 004.94; ГРНТИ 50.41.25

## ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

К.А. Майков

*Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана  
Россия, Москва, maikov@bmstu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические аспекты построения логико-лингвистической модели коррекции ошибок нечеткого вывода Суджено с использованием набора контрольных прецедентов принятия решения.

*Ключевые слова.* Логико-лингвистическая модель, алгоритм Суджено, функции Фабера - Шаудера.

### LOGICAL-LINGUISTIC MODEL OF FUZZY INFERENCE ERROR CORRECTION

К.А. Maikov

*Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, Russia, maikov@bmstu.ru*

*Abstract.* The theoretical aspects of building the logical-linguistic model of fuzzy inference error correction using Sugeno control precedents decision set are considered.

*Keywords.* Logical-linguistic model, Sugeno algorithm, Faber-Schauder functions.

Рассмотрим возможность модификации нечеткого вывода Суджено [1], учитывающую частные прецеденты решения.

Для представления функциональной зависимости вида  $f: R^N \rightarrow R^M$  в слабо формализуемой задаче без ограничения общности будем полагать, что логико-лингвистическая модель задачи содержит правила продукции  $r_j$  с ядром  $\ker r_j = \langle A_j \rightarrow B_j \rangle$ , где  $A_j = \{(X_k^{j<}, T_{J(j,k)}) \mid k = \overline{1, N}, X_k^{j<} \in R^N\}$ ,  $B_j = (Z^{j>}, T_{J(j,k+1)})$ ,  $Z^{j>} \in R^M$ , где  $X_k^{j<}$  - определяющие лингвистические переменные,  $Z^{j>}$  - переменная вывода [2].

Этап логического вывода алгоритма Суджено определяет значение переменной вывода  $Z$  в виде линейной комбинации определяющих переменных [3]

$$z(x_1, \dots, x_N) = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i. \quad (1)$$

В этом случае целевая поверхность отклика выводимой переменной аппроксимируется гиперплоскостью, что может приводить на этапе композиции к

получению неприемлемой по величине погрешности [4]. Осуществим модификацию алгоритма Суджено, основываясь на возможности аппроксимации функции произвольного числа переменных суммой значений вкладов каждой определяющей переменной независимо друг от друга, что показано в работах Колмогорова о представлении непрерывных функций нескольких переменных. Тогда требуемая поверхность отклика выводимой переменной может быть представлена в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^n \delta_{l,n}(x_n), \quad (2)$$

где  $l$  – порядок (уровень) приближения,  $\delta_{l,n}(x_n)$  – вклад переменной  $X_n$  в значение  $z$  на  $l$ -м уровне приближения.

Для обеспечения сходимости (2) необходимо использовать аналогию многомерного обобщения базисных функций системы Фабера - Шаудера [5] и потребовать разбиения пространства  $X_1 \times \dots \times X_N$  на зоны решения  $\Omega_d^l$  так, что

$$\begin{aligned} \Omega_d^l &= \bigcup_i \Omega_i^{l+1}, \quad \Omega_i^{l+1} \cap \Omega_j^{l+1} = \emptyset, \text{ при } i \neq j; i, j = \overline{1, D_{l+1}} \\ (\forall L \in N) ((x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^L) &\rightarrow (\forall \Omega_i^L, i \neq d) (\delta_i^L = 0), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n}(x_n)$  – общая поправка в зоне  $\Omega_d^l$ .

С учетом разбиения пространства  $X_1 \times \dots \times X_N$  на зоны и требований (3) значение выводимой переменной представим в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = \lim_{L \rightarrow \infty} \sum_{l=1}^L \sum_{d=1}^{D(l)} p_d^l(x_1, \dots, x_N) \delta_d^l(x_1, \dots, x_N), \quad (4)$$

где  $p_d^l(x_1, \dots, x_N) = \begin{cases} 1, & (x_1, \dots, x_N) \in \Omega_d^l, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$  – признак необходимости учета

поправки  $\delta_d^l$  в итоговом решении,  $\delta_d^l$  – общая поправка в зоне  $\Omega_d^l$ .

Для расчета величины  $\delta_d^l$  будем использовать преобразованное соотношение Суджено (1)

$$\delta_d^l = z(x_1, \dots, x_1) = z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \cdot \alpha_i(x_i)), \quad (5)$$

где  $K_d^l$  – общий коэффициент зоны  $\Omega_d^l$ ,  $v_{d,i}^l \in [0,1]$  – коэффициент влияния переменной  $X_i$  в общем значении поправки,  $\alpha_i(x_i) \in [0,1]$  – значение функции принадлежности терма, расположенного в левой части продукционного правила, вычисленное на этапе фаззификации алгоритма нечеткого вывода.

Окончательно для этапа логического вывода модифицированного алгоритма Суджено значение выводимой переменной определяется в виде

$$z(x_1, \dots, x_N) = z_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i + \sum_{l=1}^L \frac{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N) \cdot \left( z_{d,0}^l + K_d^l \sum_{i=1}^N (v_{d,i}^l \cdot \alpha_i(x_i)) \right)}{\sum_{d=1}^D p_d^l(x_1, \dots, x_N)} \quad (6)$$

Для редукции ошибок решения в соответствии с (6) осуществляется построение логико-лингвистической продукционной модели на основе данных о частных решениях задачи – модели редукции ошибок. Модель редукции ошибок состоит из продукционных правил четырех видов:

$$\text{Если } (R_{x_1} = T_{l,d,k}^{R_{x_1}})u \dots u (R_{x_N} = T_{l,d,k}^{R_{x_N}})To(G^k = T_{l,d}^{G^k}), k = \overline{0, N}. \quad (7)$$

$$\text{Если } (G^0 = T_{l,d}^{G^0})u \dots u (G^N = T_{l,d}^{G^N})To(\Omega = T_{l,d}^\Omega). \quad (8)$$

$$\text{Если } (\Omega = T_{l,d}^\Omega)u (D_{x_1}^l = T_{l,d}^{D_{x_1}^l})u \dots u (D_{x_N}^l = T_{l,d}^{D_{x_N}^l})To(D_l = T^{D_l}). \quad (9)$$

$$\text{Если } (D_1 = T^{D_1})u \dots u (D_L = T^{D_L})To(D = D_1 + \dots + D_L). \quad (10)$$

Правила вида (7), (8) используются для локализации области поправки, правило вида (9) используется для вычисления величины поправки, а правило вида (10) определяет суммарное значение поправки. Таким образом, повышение практической приемлемости решения обеспечивается не модификацией исходной экспертной модели, с помощью которой осуществляется объяснение решения, а дополнением модели редукции ошибок, построенной на основе обработки частных решений задачи.

Для расчета параметров правил модели поправки используются разработанные алгоритмы обработки частных решений задачи, которые обеспечивают:

- разбиение пространства входных переменных  $X_1 \times \dots \times X_N$  на иерархию вложенных зон  $\Omega_d^l$ , удовлетворяющих (3);
- построение продукционных правил вывода для модели редукции ошибок;
- определение положения функций принадлежности термов в правилах модели редукции ошибок;
- расчет значений  $z_{d,0}^l$ ,  $K_d^l$ ,  $v_{d,i}^l$  для продукционных правил вывода для модели редукции ошибок.

Разбиение пространства входных переменных  $X_1 \times \dots \times X_N$  на зоны  $\Omega_d^l$  осуществляется алгоритмом обработки точек частных решений  $P_Z = \{\bar{p}_l(x_1, \dots, x_N, z) \mid t = \overline{1, T_Z}\}$ , задающих значение решения  $z^0$  при входных данных  $(x_1^0, \dots, x_N^0)$ . Зоной решения называется упорядоченная пара  $\Omega = \langle B, \bar{c} \rangle$ , где  $\bar{c}$  – радиус-вектор основания зоны,  $\bar{c} \in P_Z$ ,  $B = \{\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_N\}$  – система из N линейно независимых векторов (базис зоны), причем  $\bar{b}_i = \bar{p}_i - \bar{c}$ .

Основание зоны  $\bar{c}$  и векторы ее базиса  $\{\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_N\}$  задают положение гиперплоскости, определяющей признак  $p_d^l(x_1, \dots, x_N)$  учета поправки в итоговом решении и величину  $\delta_d^l(x_1, \dots, x_N)$  этой поправки.

Расчет значений  $p_d^l$  и  $\delta_d^l$  проводится следующим образом.

Представив произвольный вектор  $\bar{x} \in X_1 \times X_2 \dots \times X_N \times Z$  в виде суммы его ортогональных составляющих  $\bar{x}^0 \in X_1 \times X_2 \dots \times X_N$  и  $\bar{x}^\perp \in Z$ , выразим поправку  $\delta_d^l$  для зоны  $\Omega_d^l$  из разложения  $\bar{x}$  по базису зоны  $\Omega_d^l$  в виде

$$\delta_d^l = \bar{x}^\perp = \sum_{n=1}^N \alpha_n \bar{b}_n^\perp + \bar{c}_{l,d}^\perp, \quad (11)$$

где  $\alpha_n$  -коэффициенты разложения  $\bar{x}$  по базису зоны  $\Omega_d^l$ . Обозначив  $B_{n \times n} = (b_{i,j})$ ,  $B_{n \times n}^{-1} = (b_{i,j}^{-1})$ , выражение (11) преобразуем к виду

$$\delta_d^l(x_1, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N k_{d,n}^l x_n^* + \tilde{\delta}_d^l, \quad \text{где} \quad (12)$$

$$k_{d,n}^l = b_n^\perp \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}, \quad \tilde{\delta}_d^l = \bar{c}_{l,d}^\perp - \sum_{n=1}^N b_n^\perp c_{l,d,n} \sum_{j=1}^N b_{j,n}^{-1}.$$

Для расчета  $p_d^l$  требуется выполнение условий

$$(\bar{x}^0 - \bar{c}_{l,d}^0) \cdot \bar{h}_k^0 \geq 0, (\forall k \in \{1, 2, \dots, N\}), (\bar{x}^0 - \bar{c}_{l,d}^0 - \bar{b}_1^0) \cdot \bar{h}_0^0 \geq 0, (\forall j \in \{1, 2, \dots, N\}), \quad (13)$$

Что справедливо при

$$q^k(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i q_i^k - \tilde{q}^k \geq 0 \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, N\} \quad \text{и} \quad \sigma(x_1, \dots, x_N) = \sum_{i=1}^N x_i s_i - \tilde{s} \in [0, 1] \quad (14)$$

где

$$q_i^k = b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left( \sum_{m=1}^{N-1} \left( \sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \cdot \tilde{g}_{p,m}^k \right) \cdot g_{j,m}^k \right) \cdot b_{k,j}, \quad \tilde{q}^k = \sum_{i=1}^N c_i^{l,d} \left[ b_{k,i} - \sum_{j=1}^N \left( \sum_{m=1}^{N-1} \left( \sum_{p=1}^{N-1} g_{n,p}^k \cdot \tilde{g}_{p,m}^k \right) \cdot g_{j,m}^k \right) \cdot b_{k,j} \right],$$

$$\tilde{g}_{p,m}^k - \text{элемент матрицы } (G_k^T G_k)^{-1}, \quad s_i = \sum_{j=1}^N b_{j,i}^{-1}, \quad i = \overline{1, N}, \quad \tilde{s} = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{i=1}^N b_{i,j}^{-1} \right) c_j^{l,d}, \quad \bar{h}_k, k = \overline{0, N} -$$

ортогональное дополнение к системе базисных векторов граней  $G_k$ , причем  $\bar{h}_k \cdot \bar{b}_k \geq 0$  при  $k = \overline{1, N}$  и  $\bar{h}_0 \cdot \bar{b}_0 \leq 0$ .

Выражения (11), (12) для расчета поправки  $\delta_d^l$  и (13), (14) для критерия  $p_d^l$  позволяют определить положение функций принадлежности термов в правилах модели редукции ошибок. Показано, что в общем случае линейная комбинация  $z = k_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_i$  в

зоне  $\Omega$  с основанием  $\bar{c} = (c_1, \dots, c_{N+1})$  может быть выражена в виде

$$z = c_{N+1} + K \sum_{i=1}^N (v_i \cdot \alpha_i(x_i)) \quad (15)$$

где  $v_i = \frac{k_i \cdot |\Omega|_i}{K}$ ,  $K = \sqrt{\sum_{i=1}^N (k_i \cdot |\Omega|_i)^2}$ ,  $|\Omega|_i$  - протяженность зоны вдоль оси, заданной ортом стандартного базиса  $\bar{e}_i$ ,  $\alpha_i(x_i)$  - функция принадлежности треугольного вида [6].

Из вышеприведенного видно, что учет частных решений задачи - прецедентов в модели редукции ошибок обеспечивает локальную коррекцию результатов классического алгоритма нечеткого вывода Суджено и повышает практическую приемлемость решения без изменения исходной экспертной модели задачи.

Рассмотренная модификация нечеткого вывода позволяет снизить влияние субъективного фактора, ухудшающего качество решения из-за неточностей, вносимых экспертом при описании системы. Предложенный подход с помощью набора корректировочных прецедентов позволяет добиться практически необходимой погрешности решения в области исходных данных, где знания эксперта, выраженные в нечетком описании системы, оказываются неточными или ошибочными. При этом корректировочные данные приводят не к модификации созданных экспертом правил или определений характеристических функций, а к дополнению существующего описания, что позволяет сохранить объяснительную возможность нечеткого вывода решения в терминах, введенных экспертом.

### Библиографический список

1. L. Wang and J. M. Mendel. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning // IEEE Transactions Neural Networks.-September 1992 . - V. 3.- №5. - P. 807- 814.
2. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transactions on Computers . - November 1994 . - V. 43. - № 11. - P. 1329-1333.
3. Castro, J.L.; Delgado, M. Fuzzy systems with defuzzification are universal approximators // IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics. - April 1995. - V. 25. - № 4. - P. 629-635.
4. Tsukamoto T. An Approach to Fuzzy Reasoning Method // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications. - 1979. - P.137-49.
5. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identificaton of systems and its applications to modeling and control. // IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics . - 1985 . - V. 15. - №1. - P. 116 - 132.

## ОСНОВЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЕТЕВЫХ ПРОБЛЕМ

П.А. Корнев, А.В. Шолохов

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, k-p-al@yandex.ru, renaissance7e@gmail.com

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические аспекты решения сетевых проблем с помощью базовых технологий искусственного интеллекта. Предлагается алгоритмическое обеспечение для решения типовых задач при возникновении конфликтов в функционировании локальных вычислительных сетей.

*Ключевые слова.* Сетевые проблемы, нечеткая логика, нейрон, нечеткая нейронная сеть.

## BASICS OF SYNTHESIS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS TO SOLVE NETWORK PROBLEMS

P.A. Kornev, A.V. Sholokhov

\* Ryazan State Radio Engineering University,

Russia, Ryazan, k-p-al@yandex.ru, renaissance7e@gmail.com

*Abstract.* The theoretical aspects of solving network problems using the basic technologies of artificial intelligence are considered. The algorithms for solving typical problems when conflicts arise in the operation of local area networks are offered.

*Keywords.* Network problems, fuzzy logic, neuron, fuzzy neural network.

Для решения различных сетевых проблем (конфликтов) IT-специалистам удобно использовать вспомогательный программный инструментарий, который может быть реализован на базе технологий искусственного интеллекта [1,2].

Конструктивно система поддержки принятия решений при ликвидации сетевых проблем (СППРЛСП) может состоять из следующих блоков (рис. 1).

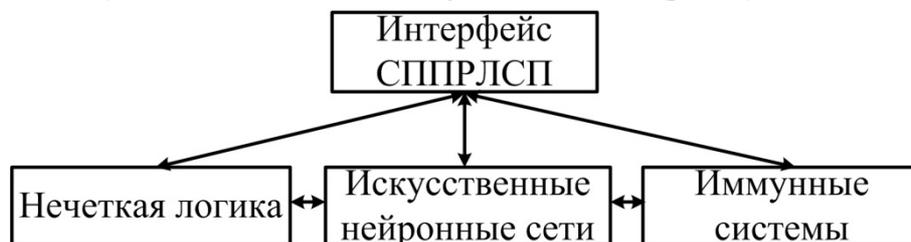


Рис. 1. Структура системы поддержки принятия решений при ликвидации сетевых проблем

Переходя к более детальной схеме, можно выбрать один из путей автоматизации, который заключается в следующем алгоритме [3,4].

1. Сбор и систематизация информации от первичных источников.
2. Идентификация проблемного сетевого события.
3. Вызов соответствующей подпрограммы или скрипта автоматизации для устранения сетевой проблемы.
4. Анализ результата работы исправляющих операций.

Наибольший интерес вызывает второй этап базового алгоритма, на который традиционно приходится наивысшая интеллектуальная нагрузка. В качестве математического базиса в процессе принятия решений на данном этапе целесообразно использовать гибридные конструкции искусственного интеллекта (например, нечеткие нейронные сети или нейроиммунные системы) [3,4]. Известно, что основным недостатком в процессе эксплуатации подобных конструкций является сравнительно низкая скорость обучения (или адаптации). Для нивелирования подобного недостатка предлагается в общий алгоритм идентификации добавить специальный прогностический модуль на основе методов математической статистики (ПММС). Таким образом, модифицированный алгоритм идентификации будет функционировать по следующей схеме (рис. 2). Если рассматривать работу ПММС более подробно, то его базовый алгоритм представим следующим образом (рис. 3).

Вычисленный с помощью ПММС статистический параметр  $M$  позволяет ускорить в последующем процедуру предварительной настройки нейро-нечеткой сети за счет выбора оптимальных значений из матрицы параметров.

Для синтеза модуля нечеткой нейронной сети (ННС) предлагается использовать следующий алгоритм (рис. 4). В общем случае формирование структуры первого слоя подразумевает создание совокупности математических примитивов теории нечетких множеств по следующему алгоритму (рис. 5). Второй и третий слои ННС создаются по алгоритмам, приведенным на рис. 6 и 7 соответственно [3,4].

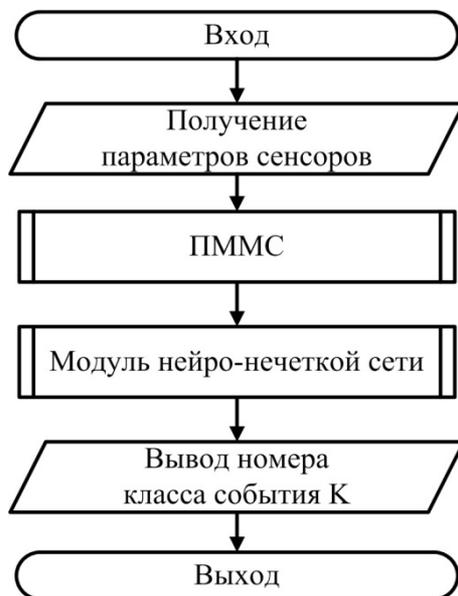


Рис. 2. Алгоритм идентификации проблемного сетевого события

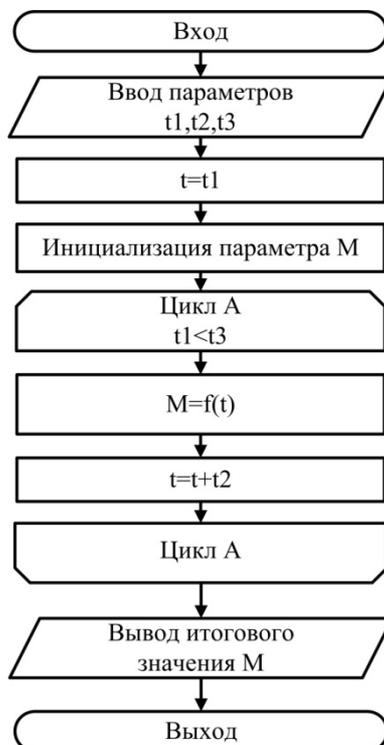


Рис. 3. Алгоритм работы прогностического модуля математической статистики



Рис. 4. Алгоритм синтеза модуля нейро-нечеткой сети

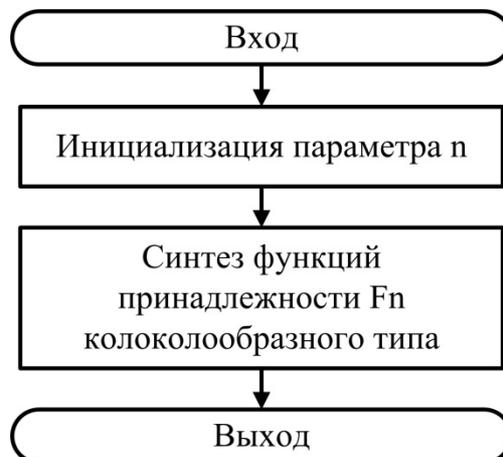


Рис. 5. Алгоритм формирования структуры первого слоя нейро-нечеткой сети

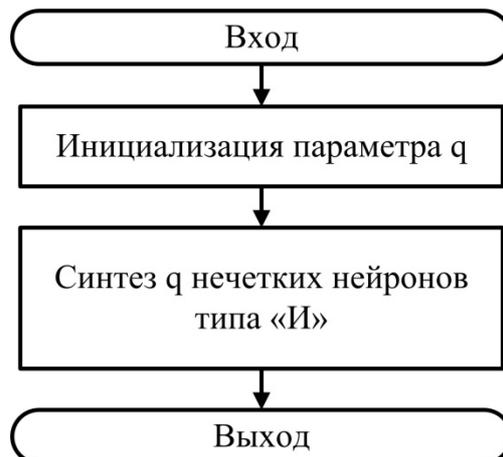


Рис. 6. Алгоритм формирования структуры второго слоя нейро-нечеткой сети

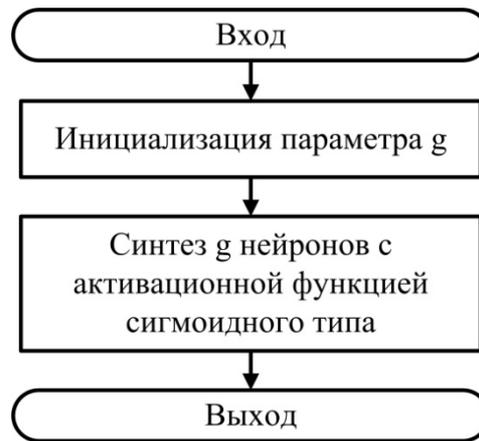


Рис. 7. Алгоритм формирования структуры третьего слоя нейро-нечеткой сети

Таким образом, синтезирован комплекс базовых алгоритмов для реализации на практике систем искусственного интеллекта для решения сетевых проблем. Представленные алгоритмы нуждаются в уточнении и детализации отдельных параметров с целью повышения эффективности, надежности и качества программных модулей, создаваемых на их основе.

### Библиографический список

1. Норткат Стивен. Обнаружение нарушений безопасности в сетях. – 3-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 447 с.
2. Лукацкий А. В. Обнаружение атак. – 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003 (Акад. тип. Наука РАН). – 596 с.
3. Хайкин Саймон. Нейронные сети. Полный курс. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

УДК 681.518; ГРНТИ 50.43.19

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СХОДИМОСТИ АЛГОРИТМА РОЯ ЧАСТИЦ И ЕГО МОДИФИКАЦИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

И.А. Ключева

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, iraryazan@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются характеристики сходимости алгоритма роя частиц (PSO) и его модификации - гибридного PSO-GS алгоритма. Для возможности оценки преимуществ PSO алгоритма по сравнению с классическими оптимизационными алгоритмами проводится сравнение показателей качества алгоритма роя частиц и алгоритма наискорейшего спуска.

*Ключевые слова.* Алгоритмы искусственного интеллекта, поведенческие алгоритмы, гибридизация, решение задач глобальной безусловной оптимизации.

## THE CONVERGENCE CHARACTERISTICS RESEARCH OF THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM AND ITS MODIFICATION IN THE GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEM SOLVING

I.A. Kluyeva

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, iraryazan@mail.ru*

*Abstract.* The paper considers the convergence characteristics of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm and its modification - the hybrid PSO-GS algorithm. An opportunity to assess the advantages of the PSO algorithm in comparison with the classical optimization algorithms, the quality indicators of the PSO algorithm and of the steepest descent algorithm are compared.

*Keywords.* Artificial intelligence algorithms, behavioral algorithms, hybridization, problem solving of the global unconstrained optimization.

Выделяют три группы алгоритмов решения задач глобальной безусловной оптимизации: детерминированные, стохастические и эвристические. В свою очередь,

эвристические алгоритмы разделяются на эволюционные и поведенческие алгоритмы. В данной работе рассматривается алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO), являющийся поведенческим алгоритмом безусловной оптимизации [1]. PSO алгоритм был предложен в 1995 году учеными Дж.Кеннеди и Д.К. Эберхартом в качестве алгоритма оптимизации непрерывных нелинейных функций.

Алгоритм роя частиц появился относительно недавно, однако различными исследователями уже был предложен целый ряд его модификаций, и новые работы на эту тему не перестают публиковаться. Можно выделить несколько путей улучшения классического алгоритма, реализованных в большинстве из них: комбинирование алгоритма с другими алгоритмами оптимизации, уменьшение вероятности преждевременной сходимости путем изменения характеристик движения частиц, а также динамическое изменение параметров алгоритма во время оптимизации. Известно большое число модификаций алгоритма [2 – 4], большинство из которых являются последовательными, хотя известны и параллельные варианты алгоритма [1].

В основу алгоритма положена социально-психологическая поведенческая модель толпы. Агентами в алгоритме являются частицы в пространстве поиска, обладающие в этом пространстве параметров задачи оптимизации положениями и скоростями. На каждой итерации при определении следующего положения частицы учитывается информация о наилучшей частице из числа соседних частиц, а также информация о положении данной частицы на той итерации, когда этой частице соответствовало наилучшее значение целевой функции [1]. Таким образом, частицы в PSO алгоритме обладают «памятью».

Следует отметить, что на эффективность работы PSO алгоритма влияет настройка его параметров, что является неоднозначной задачей и требует исследований в каждом конкретном случае [5].

Настраиваемыми параметрами PSO алгоритма являются: ограничение на максимальную скорость движения частиц, когнитивный и социальный параметры обучения, число частиц в рое, количество итераций метода, параметры инерции (статические, динамические и др.), ограничение на минимальное-максимальное значения параметра инерции, способ представления частиц (топология).

Эффективность PSO алгоритма в значительной мере зависит от используемой алгоритмом топологии соседства частиц. Так, например, топология типа клика обеспечивает высокую эффективность алгоритма, но может привести к его преждевременной сходимости к некоторому локальному минимуму целевой функции. В случае топологии типа «кольцо» преждевременной сходимости можно избежать, но алгоритм оказывается эффективным лишь для сложных многоэкстремальных функций [1].

Для возможности оценки преимуществ алгоритма роя частиц по сравнению с классическими оптимизационными алгоритмами проведено сравнение PSO алгоритма (топология «клика») с алгоритмом наискорейшего спуска, являющимся численным алгоритмом безусловной оптимизации первого порядка [6].

В задаче поиска минимума функции вида  $f(x) \rightarrow \min_{x \in R^n}$ , в алгоритме наискорейшего спуска движение к оптимальному решению осуществляется в направлении антиградиента  $-\nabla f$ . Тогда координаты очередного приближения  $x^{[k+1]}$  к глобальному оптимуму рассчитываются по следующей формуле:

$$x^{[k+1]} = x^{[k]} - \lambda^{[k]} \nabla f(x^{[k]}), \quad (1)$$

где  $i = 1, \dots, n$ .

В алгоритме наискорейшего спуска величина шага  $\lambda$  вычисляется в результате решения задачи одномерной оптимизации:

$$\lambda^{[k]} = \arg \min_{\lambda} f(x^{[k]} - \lambda \nabla f(x^{[k]})). \quad (2)$$

Сравнение алгоритмов проводилось на нескольких тестовых целевых функциях в процессе решения задачи оптимизации.

Формула функции Растригина [7] представлена ниже:

$$F_{rastrig} = \sum_{i=1}^n [10 + x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]. \quad (3)$$

Функция принимает глобально оптимальное значение, равное  $f = 0$ , в точке  $x$  с нулевыми координатами, например с координатами (0,0) при  $n = 2$ .

Пространство поиска было задано в диапазоне [-5.12, 5.12; -5.12, 5.12]. Начальное приближение выбиралось случайным образом в том же диапазоне, т.е. на всем заданном пространстве поиска.

Несмотря на то, что средняя скорость нахождения глобального оптимума у градиентного алгоритма в случае функции Растригина оказалось меньшей, чем у PSO алгоритма (для алгоритма наискорейшего спуска: среднее время сходимости к глобальному оптимуму в случае его нахождения – 3,56 с, среднее количество итераций сходимости – 2; для PSO алгоритма соответственно: 16,60 с и 168), проценты нахождения глобально-оптимального решения распределились следующим образом: для алгоритма наискорейшего спуска – 17 %, для PSO алгоритма – 100 %. При этом полагалось, что реализация PSO алгоритма и алгоритма наискорейшего спуска для поиска глобального оптимума тестовой функции Растригина проводилась для случая 100 запусков алгоритмов, а условие, при котором прогон считался «успешными», являлось нахождение первого значения целевой функции, меньшего заданной точности поиска глобального оптимума, равной  $0,000001$  ( $f(x) \leq 10^{-6}$ ). Полученные результаты позволяют судить об эффективности PSO алгоритма по сравнению с алгоритмом градиентного спуска с точки зрения надежности достижения глобального решения.

Скорость сходимости в методе наискорейшего спуска зависит от вида минимизируемой функции. Так, в случае овражной функции [6], например функции Розенброка [7], алгоритм градиентного спуска оказывается очень медленным при движении по оврагу. Направление антиградиента овражной функции существенно отклоняется от направления движения в точку глобального оптимума, что приводит к замедлению скорости сходимости [6].

Формула функции Розенброка [7] выглядит следующим образом:

$$F_{rozenb} = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2]. \quad (4)$$

Функция принимает глобально оптимальное значение, равное  $f = 0$ , в точке  $x$  с единичными координатами, например с координатами (1,1) при  $n = 2$ . Начальное приближение в эксперименте выбиралось в пределах заданного диапазона пространства поиска: [-150, 150; -150, 150].

По результатам исследования для алгоритма наискорейшего спуска количество итераций при нахождении глобального решения тестовой функции Розенброка с точностью  $f(x) \leq 10^{-6}$  в среднем превышало число, равное 13000, что по времени функционирования одного «успешного» запуска алгоритма соответствовало среднему значению  $t \geq 6600$  с. При реализации PSO алгоритма среднее время сходимости к глобальному решению при 100 запусках алгоритма составляло 39,39 с. Приведенные результаты исследования подтверждают эффективность PSO алгоритма по сравнению с алгоритмом градиентного спуска с точки зрения времени сходимости к глобальному оптимуму в случае работы с овражными функциями.

Для возможности повышения эффективности алгоритма роя частиц в работе проводились исследования PSO алгоритма в комбинации с алгоритмом решетчатого поиска (Grid Search) [8].

В гибридном PSO-GS [9] алгоритме ускорение поиска глобально-оптимального решения в рое достигается:

- благодаря дополнительному поиску по сетке в области потенциального глобально «лучшего» положения в рое;

- обновлению популяции роя частиц и удалению «худших» частиц.

Основное отличие процесса реализации гибридного PSO-GS алгоритма от классического PSO алгоритма заключается в следующем. После уточнения координат глобально «лучшей» точки в рое алгоритмом поиска по сетке предполагается обновление популяции частиц роя. После выполнения шагов Grid Search алгоритма и получения нового глобально-оптимального решения в популяции роя удаляется «худшая» частица и вместо нее добавляется «лучшее» решение по результатам выполнения алгоритма поиска по сетке на соответствующей итерации. Таким образом, гибридный PSO-GS алгоритм объединяет преимущества алгоритма роя частиц и поиска по сетке.

Результаты исследования алгоритмов на нескольких тестовых функциях, таких как функции Растргина, Розенброка и Экли [7], подтверждают, что гибридизация PSO алгоритма с алгоритмом поиска по сетке характеризуется лучшими значениями показателей качества оптимизации (среднее время сходимости к оптимальному решению, дисперсия, стандартное отклонение и др.) по сравнению с классическим PSO алгоритмом. Исследования проводились на 100 и 1000 запусках каждого алгоритма. При этом каждый запуск алгоритмов инициализировался идентичными случайно сгенерированными начальными популяциями как для PSO алгоритма, так и для PSO-GS алгоритма, т.е. реализации проводились из одинаковых начальных приближений решений оптимизационной задачи.

Для возможности сравнения PSO и PSO-GS алгоритмов на рис. 1,2 приведены графики сходимости классического PSO алгоритма и гибридного PSO-GS алгоритма в процессе нахождения глобально-оптимального решения тестовой функции Экли.

Формула функции Экли [7] выглядит следующим образом:

$$F_{ack} = 20 + \exp(1) - 20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right). \quad (5)$$

Функция принимает глобально-оптимальное значение, равное  $f = 0$ , в точке  $x$  с нулевыми координатами, например с координатами  $(0,0)$  при  $n = 2$ . Начальное приближение в эксперименте выбиралось в пределах заданного диапазона пространства поиска:  $[-50, 50; -50, 50]$ .

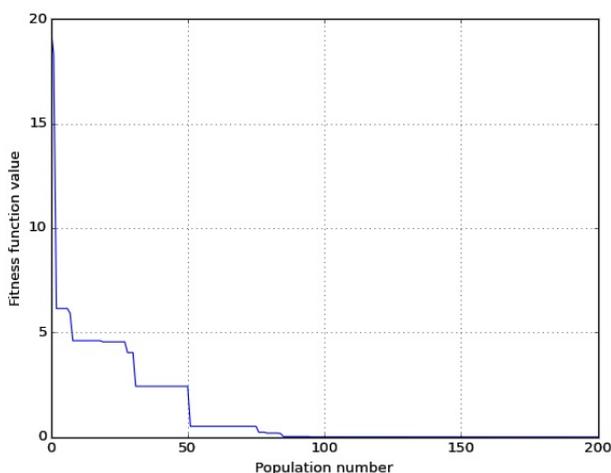


Рис. 1. График сходимости PSO алгоритма

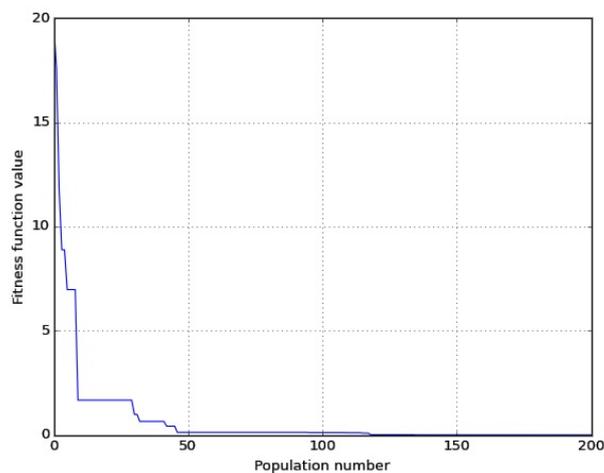


Рис. 2. График сходимости PSO-GS алгоритма

Анализ вышеприведенных графиков позволяет сделать вывод, что гибридный PSO-GS алгоритм обеспечивает нахождение точки глобального оптимума быстрее, чем классический PSO алгоритм.

Результаты экспериментальных исследований, полученные на основе экспериментов по оптимизации тестовых функций, подтверждают целесообразность использования преимуществ PSO алгоритма в процессе решения задачи оптимизации. При этом для повышения эффективности классического подхода эволюционных вычислений целесообразно комбинировать сильные стороны PSO алгоритма с другими алгоритмами поиска.

В дальнейшем предполагается использовать PSO-GS алгоритм при разработке SVM-классификаторов данных с целью подбора оптимальных значений параметра регуляризации и параметра функции ядра классификатора, представленного радиальной базисной функцией [3, 4, 8, 9].

### **Библиографический список**

1. Воробьева Е. Ю., Карпенко А. П., Селиверстов Е. Ю. Ко-гибридизация алгоритмов роя частиц. [Электронный ресурс]// Электронное научно-техническое издание «Наука и образование».-77-30569/355792, №04 апрель 2012г. URL: <http://technomag.edu.ru> (дата обращения: 24.02.2016).
2. Ключева И.А. Подходы к модификации алгоритма роя частиц// Информационные технологии в процессе подготовки современного специалиста: межвуз. сб. статей. – Липецк: ФГБОУ ВПО «ЛГПУ», 2015. – Вып. 19. – С. 40-46.
3. Демидова Л.А., Соколова Ю.С. Аспекты применения алгоритма роя частиц в задаче разработки SVM-классификатора// Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. - С. 109-117.
4. Demidova L., Sokolova Yu. Modification Of Particle Swarm Algorithm For The Problem Of The SVM Classifier Development // В сборнике: 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP) 2015. – С. 623-627.
5. Звонков В.Б. Сравнительное исследование генетических алгоритмов и стайного алгоритма оптимизации. [Электронный ресурс]// Информационно-справочный портал Самарского научного центра Российской академии наук (СамНЦ РАН). URL: <http://www.ssc.smr.ru> (дата обращения: 24.02.2016).
6. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения. [Электронный ресурс]// MATLAB.Exponenta: информационно-справочный портал центра компетенции MathWorks. URL: <http://matlab.exponenta.ru> (дата обращения: 24.02.2016).
7. Сытник К.И. Разработка и исследование оптимизационных алгоритмов эволюционных вычислений на основе унификации методов гибридизации// Рукопись диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Липецк, 2015.
8. Lean Yu Shouyang Wang, Kin Keung Lai, Ligang Zhou. Bio-Inspired Credit Risk Analysis.// Computational Intelligence with Support Vector Machines, 2008. - P. 49-50.
9. Ключева И.А. Гибридный алгоритм настройки параметров интеллектуального классификатора данных. [Электронный ресурс]// Материалы XXVIII - Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-28». URL: <http://mmtt28.sstu.ru> (дата обращения: 24.02.2016).

УДК 519.876.5; ГРНТИ 50.43.19

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОЗАПРАВКОЙ В СРЕДЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПЛК "GEB AUTOMATION"**

**А.В. Калачев, А.С. Войнов, И.В. Сенокосов, Л.И. Панюшкина**

*Пензенский государственный университет,  
Россия, Пенза, [andrei.kalachev@gmail.com](mailto:andrei.kalachev@gmail.com)*

*Аннотация.* Рассмотрены основные этапы моделирования системы управления топливозаправкой летательных аппаратов в среде «GEB Automation» с использованием стандартов IEC 61131. Результаты моделирования позволяют осуществить контроль процессов поступления и расхода топлива в режиме реального времени.

*Ключевые слова.* Моделирование, стандарт IEC-61131, язык FBD, топливозаправка, системы управления.

## **SIMULATION OF CONTROL SYSTEM FUELING IN THE PLC PROGRAMMING ENVIRONMENT "GEB AUTOMATION"**

**A.V. Kalachev, A.S. Vojnov, I.V. Senokosov, L.I. Paniushkina**

*Penza State University,  
Penza, Russia, [andrei.kalachev@gmail.com](mailto:andrei.kalachev@gmail.com)*

*Abstract.* The main stages in the «GEB Automation» environment simulation control system of fuel-aircrafts using the standard IEC 61131. The simulation results are allowed to carry out admission control processes and fuels consumption in real time.

*Keywords.* Modeling, IEC-61131 standard, the FBD language, control systems.

Моделирование применяется в различных сферах человеческой деятельности, где требуется решать сложные научные и технические задачи. На сегодняшний день моделирование на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) является одним из самых эффективных и широко применяемых методов в автоматике, вычислительной технике и других областях [1].

Стандарт IEC-61131 хорошо себя зарекомендовал при моделировании систем управления [2]. Системы управления, разработанные в соответствии с данным стандартом, характеризуются следующими признаками: возможностью быстрой и простой модификации программного описания, надежностью создаваемого программного обеспечения, переносимостью проекта с одного ПЛК на другой, возможностью повторного использования разработанных компонентов программы и наращивания ее функциональности, а также простотой языка и ограничением количества его элементов [3]. Зачастую в состав системы управления включается подсистема обратной связи для корректировки работы системы [4].

В соответствии с политикой импортозамещения [5] и «Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года» большую роль в повышении конкурентоспособности аэропортов России, превращении их в транзитные и трансферные центры международного значения играет повышение эксплуатационной эффективности системы наземного обслуживания воздушных судов, а также внедрение и развитие конкуренции в потенциально конкурентных сферах аэропортовой деятельности: топливозаправке, техобслуживании и т.д. [6].

Основной целью данной работы является моделирование системы управления топливозаправкой летательных аппаратов (СУТЗЛА) в среде программирования ПЛК «GEB Automation» [7]. Процесс топливозаправки летательных аппаратов (ЛА), а также прототип СУТЗЛА на основе функциональных блоков нового международного стандарта IEC 61499, являющийся новой версией стандарта IEC 61131, были представлены в работе В.Н. Дубинина и Н.П. Вашкевича [8].

Среда разработки «GEB Automation» представляет собой интегрированную среду разработки (IDE), предназначенную для моделирования процессов управления с использованием текстового языка (ST) и графических языков (FBD, LD) в соответствии со стандартом IEC 61131-3 [9].

Компиляция к стандартному C позволяет компилировать IEC-61131 программы в исполняемые двоичные файлы, которые могут работать в любой платформе, которая имеет компилятор C. Поскольку существуют компиляторы Си практически для каждого процессора (Intel, AMD, AVR, Renesas, Siemens, Texas Instruments и т.д.) и операционной системы (Linux, Windows, DOS, QNX и т.д.), то созданные в «GEB Automation» программы не будут привязаны к определенной архитектуре процессора. Пользователь может легко изменить процессор, на котором будет работать устройство, его периферийные устройства, линии связи или даже всю архитектуру путем простой замены библиотеки или компилятора C. Программа, написанная по стандарту IEC 61131-3 [10 - 11], при этом останется неизменной.

«GEB Automation» позволяет импортировать программы и элементы в формате PLCopen [12]. Это означает, что пользователь может создавать и редактировать программы с любого устройства или платформы разработки, поддерживающих данный стандарт.

Главными достоинствами разработки в среде «GEB Automation» являются: низкий порог вхождения, что играет большую роль при необходимости изучения принципов моделирования и разработки устройств в короткие сроки; возможность быстрой и удобной отладки в среде с использованием тестирующих элементов управления и ввода-вывода; возможность транслировать программы, реализованные на языках по стандарту IEC 61131-3 в программы на языке Си, для дальнейшей загрузки полученного алгоритма в заданную платформу. Однако основными недостатками использования данной системы являются её высокая стоимость лицензии (999\$ на 2 года) и отсутствие поддержки языка SFC [7].

Моделирование СУТЗЛА в «GEB Automation» следует начать с определения функциональных составляющих. Для имитации сигналов, поступающих с датчиков на клапане и насосе (с использованием временных задержек), а также вывода обратного отчета до срабатывания заданной действия был создан программный компонент с именем OPEN\_ELEM, который был реализован на языке FBD (рис. 1).

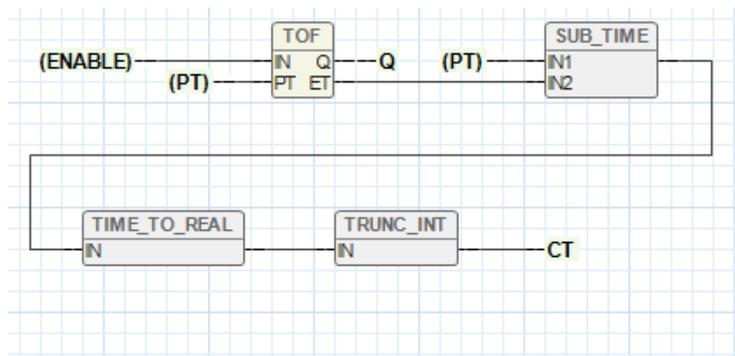


Рис. 1. Функциональная схема компонента «OPEN\_ELEM»

Данный компонент имеет следующие входы: ENABLE – включение (тип BOOL), PT – время работы (тип TIME) и выходы: Q – работа таймера (тип BOOL), CT – обратный отсчет (тип INT).

В программный компонент также включены элементы стандартной библиотеки IEC 61131-3, а именно: TOF – таймер с задержкой отключения; SUB\_TIME – элемент для вычисления разности между заданной задержкой и пройденной; TIME\_TO\_REAL – элемент для приведения полученной разности с элемента SUB\_TIME к числу с плавающей запятой; TRUNC\_INT – элемент для выделения целой части от разности между заданной задержкой и пройденной. Таким образом, элемент OPEN\_ELEM реализует в себе таймер обратного отсчета с выводом оставшегося времени.

Также в состав системы входит элемент BLINK, имеющий следующие входы: ENABLE – включение (тип BOOL), TIMELOW – задержка по нижнему фронту (тип TIME), TIMEHIGH – задержка по верхнему фронту (тип TIME) и выход: OUT – выходной сигнал (тип BOOL).

Еще один тип элементов tank, имеющий следующие входы: CI – сигнал с генератора импульсов, имитирующего работу насоса (тип BOOL R\_EDGE), CV – нижний уровень топлива емкости (тип INT), CD – флаг декремента, если CD = TRUE, то уровень уменьшается, а не увеличивается (тип BOOL), CM – верхний уровень топлива емкости (тип INT), REV – реверс, если REV = TRUE, то инкремент заменяется на декремент и наоборот, а выходное значение уровня сравнивается не с верхним значением уровня CM, а с нижним CV (тип BOOL) и выходы: Q – выводит импульс при осуществлении заправки или слива (тип BOOL), QV – текущее значение уровня (тип INT), QL – Наличие топлива в емкости (выводит FALSE, если емкость пуста тип BOOL).

После того, как функциональные компоненты модели были определены, необходимо перейти к этапу моделирования. Результат моделирования СУТЗЛА представлен на рис. 2.

Разработка и реализация модели СУТЗЛА позволили сформулировать следующие выводы.

1. Реализованная модель управления топливозаправкой может быть транслирована в Си код, что позволит использовать данную систему в других программных продуктах.

2. Реализация алгоритма на языке FBD, выполненная в среде «GEB Automation», позволяет осуществлять контроль процессов поступления и расхода топлива в режиме реального времени, что дает возможность существенно увеличить надежность работы системы.

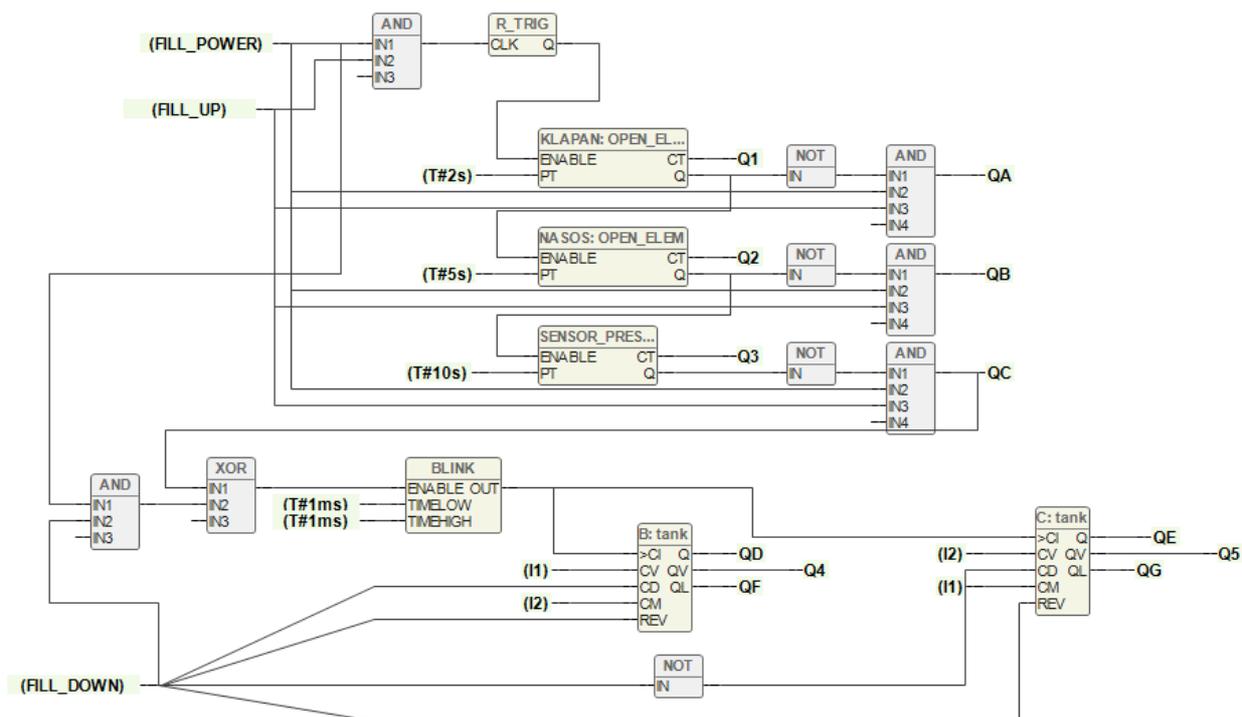


Рис. 2. Модель заправки СУТЗЛА на языке FBD

### Библиографический список

1. Stephen P. T. Programmable Logic Controller (PLC) Tutorial Allen-Bradley Micro800 / Stephen Philip Tubbs, 2013. – 118 p.
2. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного программирования / И. В. Петров; под ред. В.П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
3. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко: М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.
4. Шепелев Г. А. Моделирование управляемых систем с запаздывающей обратной связью / Ульяновск: ФГБОУ ВПО УлГУ, 2011. – 246 с.
5. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: Федеральный закон Российской Федерации от 27.07.2006 N 149-ФЗ (ред. от 13.07.2015) [Текст] // СЗ РФ. – 2015. - № 36. Ст. 15.
6. Коникина Е.В. Совершенствование методов принятия решений в интерактивном режиме диспетчером системы комплексного оперативного управления наземным обслуживанием воздушных судов / Санкт-Петербург: МИНТРАНС России РОСАВИАЦИЯ ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», 2009. - 252 с.
7. Официальный сайт среды разработки программ ПЛК «GEB Automation» [Электронный ресурс]: URL: <http://gebautomation.com> (дата обращения 24.02.2016).
8. Вашкевич Н.П., Дубинин В.Н. Разработка комплекса формальных моделей и их трансформаций для проектирования распределенных информационно-управляющих систем промышленной автоматике: отчет о НИР по проекту № 2.1.2/4257 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)». Пенза: ПГУ, 2011. – 419 с.
9. Robert W. Lewis Programming Industrial Control Systems Using IEC 1131-3/ The Institution of Engineering and Technology; Revised ed., 1998. – 345 p.
10. Karl-Heinz John, Michael Tiegelkamp IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems: Concepts and Programming Languages, Requirements for Programming Systems, Decision-Making Aids / Springer, 2010. – 390 p.
11. IEC TC/SC 65B IEC 61131-3 Ed. 2.0 en:2003, Programmable controllers - Part 3: Programming languages / Multiple. Distributed through American National Standards Institute (ANSI), August 19, 2007. – 226 p.
12. Официальный сайт стандарта PLCOpen [Электронный ресурс]. URL: <http://www.plcopen.org/> (дата обращения 24.02.2016).

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ**

**М.В. Неменко, С.А. Лесько, Д.О. Жуков**

*Московский технологический университет (МИРЭА),*

*Россия, Москва, nemomasha@mail.ru*

*Аннотация.* Описаны алгоритмы построения топологии транспортных сетей со случайной структурой, моделирования в них перколяционных процессов и нахождения порогов перколяции.

*Ключевые слова.* Транспортная сеть со случайной структурой, алгоритмы моделирования перколяционных процессов.

## **THE DEVELOPMENT OF ALGORITHMS SIMULATING OPERATION OF TRANSPORT NETWORKS ON BASIS OF THE PERCOLATION THEORY**

**M.V. Nemenko, S.A. Lesko, D.O. Zhukov**

*Moscow Technological University (MIREA),*

*Moscow, Russia, nemomasha@mail.ru*

*Abstract.* The described algorithms for constructing topology transport networks with random structure, a fashion-lation in their percolation processes and finding the percolation limit.

*Keywords.* Transport network with random structure, percolation process modeling algorithms.

### **Введение**

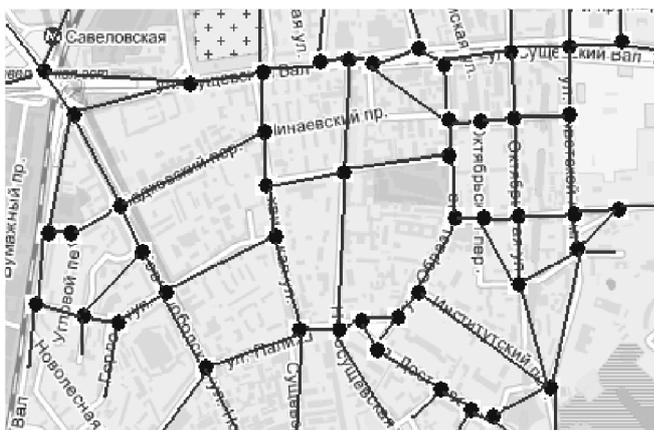
Существующие математические модели, используемые для анализа моделирования транспортных сетей, очень разнообразны по задачам, которые они решают, математическому аппарату, степени детализации движения и данным, которые они используют, и могут быть разделены по своему типу на [1, 2] макроскопические (используют для описания потоков усредненные параметры, например, такие как средняя скорость автомобиля и т.д.) и микроскопические (рассматривается движение каждого автомобиля). Данные модели имеют как существенные достоинства, так и недостатки. В целом большинство из них дает неплохие результаты с точки зрения построения на их основе систем управления транспортными потоками. Общим для микроскопических и макроскопических моделей является то, что они ориентируются на свойство самих транспортных потоков и в большинстве случаев практически не учитывают сложную физическую топологическую структуру транспортных систем.

Для демонстрации примера сложности их структуры можно привести наземную транспортную сеть любого крупного города (см. рис. 1). Как видно из рис. 1, дорожная система современного города представляет собой граф, вершины (узлы сети) которого могут быть связаны между собой произвольным образом, случайным числом от 3 до 12 связей. Разработка эффективных математических и информационных моделей работы транспортной сети города вряд ли возможна только на основе существующих традиционных микроскопических и макроскопических подходов, не учитывающих физическую топологию транспортных систем.

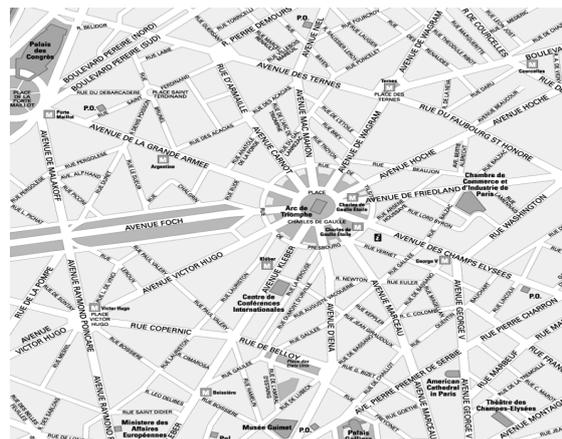
На наш взгляд, определенный успех может быть достигнут, если отойти от традиционных моделей и разработать модель управления работоспособностью всей транспортной сетью с нерегулярной случайной структурой в целом, на основе методов теории перколяции и стохастических моделей с недетерминированными параметрами.

### **Постановка задачи для построения перколяционной макроскопической модели балансировки потоков**

При определенных условиях связи (магистралей) и узлы сетей могут блокироваться вследствие того, что потоки транспортных средств не успевают обрабатываться. С течением времени близлежащие заблокированные узлы могут объединяться и образовывать связанные кластеры, приводящие к общей потере работоспособности транспортной сети (автомобильные пробки можно рассматривать как образование кластеров заблокированных узлов - перекрестков на дорогах города или станций метрополитена).



а



б

Рис. 1. Пример наземной дорожной сети современных мегаполисов (дорожные карты взяты с ресурса [www.yandex.ru](http://www.yandex.ru)): а - Часть Московской дорожной системы в районе метро Савеловская; б - Часть дорожной сети города Парижа в районе площади Звезды

Очевидно, что если заблокированных узлов или связей будет не очень много, то между двумя произвольно выбранными не близлежащими узлами будет сохраняться хотя бы один “открытый” путь (путь, состоящий из неблокированных узлов или связей). Доля заблокированных узлов, при которой сеть в целом потеряет работоспособность, называется порогом перколяции, ниже его значения сеть является работоспособной, несмотря на то, что в ней есть некоторые узлы или их заблокированные группы (кластеры). Выше порога перколяции вся сеть целиком выключается и теряет работоспособность. И между двумя произвольно выбранными узлами нет ни одного “открытого” пути.

Представляется интересным исследовать процессы кластеризации сети по заблокированным узлам и достижение в ней порога перколяции в зависимости от среднего числа связей, приходящихся на один узел, и характеристик транспортного движения, что позволит выработать рекомендации по управлению и изменению топологии сетей с целью предотвращения образования в них пробок за счет балансировки потоков.

Для проведения подобных исследований необходимы алгоритмы и специальное программное обеспечение, разработанное на их основе.

#### **Алгоритмы построения случайных сетей и описания перколяционных процессов**

За основу построения транспортной сети была взята теория графов. На основании теории графов была разработана графическая среда, с помощью которой можно построить сеть произвольной структуры. Как и в теории графов, основными оперируемыми объектами построения сети являются следующие элементы:

- Узел (Вершина графа);
- Дуга (Ребро графа).

*Алгоритм поиска пересечений дуг.* Предположим, даны два отрезка  $a_{x1}, a_{x2}, a_{y1}, a_{y2}$  и  $b_{x1}, b_{x2}, b_{y1}, b_{y2}$ . Тогда для поиска точки пересечения применяется следующий алгоритм:

1. Преобразуем первый и второй отрезки в общую форму уравнения прямой  $Ax + By = C$ .
2. Для первого отрезка получаем:  $a_1 = a_{y2} - a_{y1}, b_1 = a_{x1} - a_{x2}, c_1 = a_1 * a_{x1} + b_1 * a_{y1}$ .
3. Для второго отрезка получаем:  $a_2 = b_{y2} - b_{y1}, b_2 = b_{x1} - b_{x2}, c_2 = a_2 * b_{x1} + b_2 * b_{y1}$ .
4. Вычисляем коэффициент  $d$  (знаменатель в формуле Крамера):  $d = a_1 * b_2 - a_2 * b_1$ .
5. Если коэффициент  $d = 0$ , то прямые параллельны или совпадают, поиск пересечения прекращается.
6. Если коэффициент не  $d \neq 0$ , то находим координаты точки пересечения:  $x = (b_2 * c_1 - b_1 * c_2)/d, y = (a_1 * c_2 - a_2 * c_1)/d$ .
7. Для каждого из следующих набора точек:  $(a_{x1}, a_{x2}, x; a_{y1}, a_{y2}, y)$  и  $(b_{x1}, b_{x2}, x; b_{y1}, b_{y2}, y)$  проведем проверки.

- 7.1. Проверка, равны ли точки  $x$  или  $y$  с проверяемыми координатами отрезка, далее координаты отрезка будем обозначать за  $a$  и  $b$ , а координаты проверяемой точки пересечения за  $c$ . Возьмем коэффициент погрешности  $e = 0.000001$ , тогда  $|a - c| < e \vee |b - c| < e$ .
- 7.2. Проверим, лежит ли точка пересечения между координатами переданных отрезков  $(a < c \wedge c < b) \vee (b < c \wedge c < a)$ .
8. Если после выполнения пп. 7.1 и 7.2 в каком-либо из наборов  $(a_{x1}, a_{x2}, x; a_{y1}, a_{y2}, y)$  или  $(b_{x1}, b_{x2}, x; b_{y1}, b_{y2}, y)$  получился ложный ответ, значит, координаты  $x$  и  $y$  не принадлежат к данным отрезкам.
9. Если оба набора вернули положительный результат, значит, координата  $x$  и  $y$  является точкой пересечения данных отрезков.

*Алгоритм объединения пересечений в одной точке.* Рассмотрим работу алгоритма при перемещении дуги в произвольном направлении с поиском новых точек пересечения и объединением их в одну точку при достижении определенных условий. Создаются две коллекции. Первая коллекция содержит: пары дуг и точку их пересечения. Вторая коллекция содержит в виде ключа точку пересечения, а в виде значения список из дуг, породивших эту точку пересечения и количество вхождений конкретной дуги в эту точку пересечения. Обозначим первую коллекцию за  $A$ , вторую коллекцию за  $P$ , а перемещаемую точку за  $l$ .

1. Выбираем  $n$  дуг и итерационно перебираем каждую.
2. Проверяем, есть ли точка пересечения у дуги  $l$  и  $n_i$  в коллекции  $A$ . Если точка пересечения  $e$  найдена, то выполняем следующие шаги:
  - а) в коллекции  $P$  уменьшаем количество вхождений дуг  $l$  и  $n_i$  в точке  $e$  на 1. Если показатель вхождения дуги в точку  $e$  становится равным 0, то данная дуга удаляется из точки  $e$  коллекции  $P$ ;
  - б) из коллекции  $A$  удаляется связь между дугами  $l$  и  $n_i$ .
3. Производим проверку пересечения дуг  $l$  и  $n_i$ . Если координаты точки пересечения не были найдены, то выполняем следующие действия:
  - а) если была найдена точка  $e$  на 2 шаге и у нее нет породивших ее дуг в коллекции  $P$ , то данная точка удаляется;
  - б) в итерации берется следующая дуга.
4. Определяем точку пересечения по следующей логике:
  - а) итерационно перебираем все точки из коллекции  $P$  и сравниваем координаты расположения с полученными координатами точки пересечения на 3 шаге. Если на какой-либо из итераций координаты совпали, то запоминаем точку пересечения с текущей итерацией и переходим к шагу 5;
  - б) если после перебора имеющихся точек пересечения из коллекции  $P$  не было найдено совпадений, а на 2 шаге была найдена точка  $e$ , запоминаем эту точку и переходим к шагу 5;
  - с) если в ходе всех действий не была найдена точка пересечения, то создается новая точка, запоминаем ее и переходим к шагу 5.
5. Добавляем к точке пересечения дуги  $l$  и  $n_i$ , увеличиваем вхождение каждой из дуг на 1.
6. Добавляем связи между дугами  $l$  и  $n_i$  в коллекции  $A$ .

*Алгоритм поиска достижимости вершин графа.* Обозначим начальный узел за  $A$ , а узел, до которого производим поиск пути, за  $B$ , тогда для определения достижимости узла  $A$  до узла  $B$  используется следующий алгоритм.

1. Перед началом поиска пути все узлы сети помечаем как непосещенные.
2. Начальный узел  $A$  помечается как посещенный и добавляется в список узлов поиска.
3. До тех пор, пока в списке узлов поиска есть хотя бы один узел выполняем следующие шаги.
4. Из списка узлов выбираем и удаляем первый элемент.
5. Для выбранного элемента проверяем все его достижимые вершины (все узлы, с которыми данный узел связан дугой).

6. Если достижимая вершина равна выбранному узлу В, то из узла А есть путь до узла В, поиск прекращается.
7. Если достижимая вершина не равна искомому узлу В и ещё не посещалась, то эта вершина помечается как посещённая и добавляется в список узлов поиска.
8. Если после перебора всех возможных путей от узла А путь до узла В не был найден, то это значит, что не существует такого пути, который связывал бы узлы А и В.

Для более быстрого поиска необходимо обеспечить такую структуру, чтобы каждый узле графа содержал в себе информацию о всех связанных с ним узлах в виде индекса узла в списке сети.

*Оценка сложности алгоритма поиска “свободного” пути между узлами случайной сети.* Данный алгоритм работает с уже построенной сетью, то есть генерация сети для моделирования надежности не предусматривается.

1. Устанавливаем количество итераций эксперимента и количество самих экспериментов.
2. Случайным образом выбираем два узла А и В. При выборе узлов необходимо, чтобы выполнялось следующее условие: узлы не должны иметь прямую связь друг с другом. Пока данное условие не выполнено, узлы будут пере выбираются.
3. Перед началом процесса расчета надежности конкретного шага эксперимента проходим по всем узлам сети и устанавливаем их в состояние «активные». Активное состояние узла означает, что можно использовать данный узел для перемещения до его связанных узлов.
4. Следующим шагом будет выбор случайного узла для деактивации. Главными критериями выбора узлов будут следующие параметры: узел не должен быть ранее деактивирован, нельзя деактивировать узлы, выбранные для расчета надежности в текущей итерации.
5. Проверяем, есть ли во всей сети хотя бы один «открытый» путь от узла А к узлу В. Если есть хотя бы один «открытый» путь, то продолжаем выполнение пунктов 4 - 5. Если из точки А нет пути до точки В, переходим к пункту 6.
6. Сохраняем шаг, на котором связь между узлами А и В разорвалась. Продолжаем выполнение расчета, возвращаясь на пункт 3. Пусть количество таких повторений будет Q раз (пусть  $Q = 100$ ). Если выполнены все эксперименты, переходим на шаг 7.
7. Определяем максимальный шаг N из полученных, на котором связи между А и В были доступны. Для каждого шага эксперимента строим вектор длиной N. Вектор заполняется 0 до тех пор, пока связь между А и В существовала, начиная с шага разрыва связи, вектор заполняется 1. Например, максимальный полученный шаг  $N = 4$ , а при первом эксперименте связь была разорвана на 3 шаге, тогда вектор будет выглядеть следующим образом:  $\{0,0,1,1\}$ . Далее векторы складываются, полученную сумму сохраняем в списке.
8. Возвращаемся к выполнению пункта 2. Заново выбираем узлы А и В, повторяем выполнение пунктов 3, 4, 5, 6, 7, 8 еще W раз (пусть  $W = 100$ ).
9. После окончания всех итераций W рассчитываем надежность: суммируем все полученные векторы из списка со всех экспериментов и делим на количество итераций W.
10. Полученный результат представим в виде графика. По оси x будет количество экспериментов, а по оси y – вероятность отказа сети.

Для получения более точных решений необходимо провести большое число численных экспериментов.

Оценка сложности алгоритма:

$Iteration * O(NetLength * Exp)$ ,

где:

Iteration – количество итераций экспериментов;

NetLength – количество узлов в сети;

Exp – количество проводимых экспериментов в рамках одной итерации.

### **Специализированное программное обеспечение для моделирования перколяционных процессов в транспортных сетях с случайной структурой**

На основании описанных алгоритмов было разработано специализированное программное обеспечение для моделирования перколяционных процессов в случайных сетях, интерфейс которого предоставляет следующий ряд функциональных возможностей:

- создание узла;
- создание связей между узлами, используя дуги;
- удаление узлов и связей (дуг);
- изменение формы сети посредством перемещения узлов;
- создание новых узлов в точке пересечения дуг;
- возможность задать название узла, цветовую гамму для дуг и узлов;
- сохранение и загрузка проекта;
- расчет надежности построенной сети;
- графический интерфейс результатов расчета с полным обзором выполнения расчета на каждом шаге итерации;
- графический интерфейс по настройке параметров эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-37-00373 мол\_а, «Разработка перколяционных и стохастических моделей балансировки потоков и управления высоконагруженными транспортными сетями».

### **Библиографический список**

1. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и Телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.
2. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. М.: Издательство МЦНМО, 2013. 428 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.19

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОПТИМИЗАЦИОННОГО АЛГОРИТМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗЕМЛЯНИКИ**

**Е. А. Жданкина**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, aaa\_rrr@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматривается популяционный алгоритм, вдохновленный способом распространения земляники. Алгоритм предназначен для решения задачи глобальной непрерывной оптимизации.

*Ключевые слова.* Глобальная непрерывная оптимизация, популяционный алгоритм, алгоритм распространения земляники.

## **A NUMERICAL OPTIMIZATION ALGORITHM INSPIRED BY THE STRAWBERRY PLANT**

**E. A. Zhdankina**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, aaa\_rrr@mrul.ru*

*Abstract.* The paper presents a review of population algorithm inspired by the strawberry plant for global continuous optimization.

*Keywords.* Global continuous optimization, population algorithm, optimization algorithm inspired by the strawberry plant.

### **Введение**

Многие задачи, возникающие в фундаментальных науках, сводятся к задачам глобальной оптимизации. Для эффективного решения таких задач разработаны стохастические поисковые алгоритмы. В настоящее время известны различные подходы к реализации данных алгоритмов [1, 2]. При этом наибольшее распространение получили генетический алгоритм [2, 3], алгоритм клонального отбора [4], алгоритм роя частиц [1], алгоритм муравья [1], пчелиный алгоритм [1]. В последние годы появляются и активно развиваются новые разновидности поисковых алгоритмов глобальной оптимизации (так называемые алгоритмы роевого интеллекта), к которым можно отнести алгоритм косяка рыб, алгоритм кукушки, светляковый алгоритм, алгоритм летучих мышей и пр. [1]. В данной статье рассматривается популяционный алгоритм, вдохновленный способом распространения земляники [1, 6 – 8].

### *Биологические основы*

Животные и птицы переносят изменения окружающей среды гораздо легче, чем растения, потому что у них есть конечности, позволяющие передвигаться в пространстве и выбирать места с лучшими условиями, когда это необходимо. Но растения привязаны к почве корнями и не могут перемещаться в места с желаемыми условиями. Однако некоторые растения (такие, как земляника) могут размножаться при помощи ползущих стеблей, побегов.

Материнское растение производит побег, на втором конце которого образуется дочернее растение, которое, в свою очередь, затем само становится материнским растением и производит новые побеги.

Воспроизведение земляники и подобных ей растений может рассматриваться как своего рода передвижение растений, так как и материнское, и дочернее растения имеют точно такие же гены, и могут рассматриваться как одно растение.

С математической точки зрения растения с побегами производят своего рода оптимизацию. Более точно можно сказать, что такие растения производят и глобальный, и локальный поиск, чтобы найти ресурсы: воду и минералы, путём развития побегов и корней соответственно. И побеги, и корни развиваются чаще всего случайно. Но когда побег достигает места с большим количеством ресурсов, соответствующее дочернее растение производит больше корней и побегов, что влияет на рост всего растения в целом.

Очевидно, чтобы создать численный алгоритм оптимизации, вдохновлённый земляникой, мы должны смоделировать поведение растения простыми, но точными правилами. Допустим, поведение земляники можно эффективно описать следующими тремя фактами.

1. Каждое материнское растение размножается с помощью побегов, которые распространяются случайно (глобальный поиск ресурсов).
2. Каждое материнское растение развивает корни случайно (локальный поиск ресурсов).
3. Дочернее растение, которое достигло почвы, богатой ресурсами, растёт быстрее и производит больше побегов и корней, и, с другой стороны, и побеги, и корни, которые попали на бедную почву, вероятнее всего, погибнут.

Согласно сказанному выше, в рассматриваемом алгоритме сначала мы случайным образом генерируем определённое количество точек в области поиска. Каждая из них может быть рассмотрена как материнское растение. Затем в каждой итерации любое материнское растение производит один корень и один побег (дочернее растение): корень поблизости, а побег относительно далеко.

Затем целевая (объектная) функция оценивается в точках, образованных побегами и корнями, и половина из этих точек, которые имеют более высокие фитнес-значения, отбираются, например, с помощью метода рулетки, или элитарного отбора, и в дальнейшем рассматриваются как материнские растения в следующие итерации. Оставшаяся часть растений «погибает». Эта процедура повторяется, пока не удовлетворится условие выхода из цикла [7].

#### *Математическое описание алгоритма*

Рассмотрим решение следующей естественной оптимизационной проблемы.

$$\min f(x), \quad x_l \leq x \leq x_u, \quad (1)$$

где  $f: R^m \rightarrow R$  – объектная функция, которую необходимо минимизировать;

$x \in R^m$  – вектор решений, который необходимо вычислить;

$x_l, x_u$  – векторы, указывающие нижнюю и верхнюю границы переменных.

Согласно предыдущему описанию, чтобы решить задачу оптимизации, сначала сгенерируем  $N$  случайных точек в области рассмотрения проблемы. Каждую назовем материнским растением. Затем на каждой итерации каждое материнское растение генерирует две случайные точки: одну очень близко к себе и другую далеко от себя. Ближняя и дальняя точки моделируют корни и побеги соответственно. Корни используются для поиска вокруг

локации материнского растения, а побеги используются для поиска в локациях далеко от него. С этого момента побеги играют очень важную роль для перемещения от одного локального минимума к другому, эффективно позволяя алгоритму избежать «ловушки» в этой точке.

В алгоритме распространения земляники  $x_j(i) \in R^m$  представляет собой расположение  $j$ -го материнского растения ( $j = 1, \dots, N$ ) в  $i$ -й итерации. Матрица  $X_{prop}(i)$ , содержащая расположения соответствующих побегов и корней в итерации, рассчитывается следующим образом:

$$X_{prop}(i) = [X_{root}(i)X_{runner}(i)] = [X(i)X(i)] + [d_{root}r_1 \ d_{runner}r_2], \quad (2)$$

где

$$X(i) = [x_1(i)x_2(i) \dots x_N(i)],$$

$$X_{prop}(i) = [x_{1,prop}(i) \ x_{2,prop}(i) \dots x_{2N,prop}(i)],$$

$X_{root}(i) \in R^{m \times N}$  и  $X_{runner}(i) \in R^{m \times N}$  – матрицы, содержащие расположение корней и побегов, рассчитываемых следующим образом:

$$X_{root}(i) = [x_{1,root}(i)x_{2,root} \dots x_{N,root}(i)], \quad (3)$$

$$X_{runner}(i) = [x_{1,runner}(i)x_{2,runner} \dots x_{N,runner}(i)], \quad (4)$$

$r_1, r_2 \in R^{m \times N}$  – случайные матрицы, состоящие из независимых случайных номеров с равномерным распределением в диапазоне  $[-0.5, 0.5]$ ;

$d_{root}$  и  $d_{runner}$  – два скаляра, означающие расстояние от корня и побега до материнского растения соответственно (обычно  $d_{runner} \gg d_{root}$ ), и  $N$  – номер материнского растения.

Заметим, что согласно (2) две точки сгенерированы от одного материнского растения (корни и побеги), в результате чего происходит удвоение количества агентов вычисления, т.е.  $X_{prop}(i)$  содержит  $2N$  столбцов (потенциальных решений проблемы), когда  $X(i)$  содержит только  $N$  столбцов.

После вычисления  $X_{prop}(i)$  мы используем какую-нибудь схему отбора, например колесо рулетки, чтобы отобрать  $N$  столбцов среди  $2N$  столбцов из  $X_{prop}(i)$ . Схема основана на том, что лучший вектор имеет больше шансов быть отобранным (отобранный вектор будет рассмотрен в качестве материнского растения в следующей итерации). На практике замечено, что комбинация элитарного и случайного отбора приводит к лучшему результату. Таким образом, в рассматриваемом алгоритме половина требуемого количества материнских растений отбирается с помощью элитарного отбора и половина – с помощью рулеточного колеса. Перед использованием рулеточного колеса сначала рассчитывается фитнес-значение  $j$ -го столбца с помощью следующего уравнения:

$$fit(x_{j,prop}(i)) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha + f(x_{j,prop}(i))} & f(x_{j,prop}(i)) > 0, \\ \alpha + |f(x_{j,prop}(i))| & f(x_{j,prop}(i)) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

где  $f$  – функция, которую необходимо минимизировать;

$\alpha \geq 0$  – параметр, используемый для оптимизации рулеточного колеса. В дальнейшем принимаем  $\alpha = 0$ .

После вычисления фитнес-значения вероятность выбора  $j$ -го столбца  $p_j$  вычисляется следующим образом:

$$p_j = \frac{fit(x_{j,prop}(i))}{\sum_{k=1}^N fit(x_{k,prop}(i))}. \quad (6)$$

Выбранный вектор будет рассматриваться как материнское растение для следующей итерации [7-10].

*Реализация и результаты*

На основе предложенного алгоритма автором разработано программное обеспечение для поиска глобального минимума функции. Среда разработки – Microsoft Visual Studio, язык программирования – Visual C++.

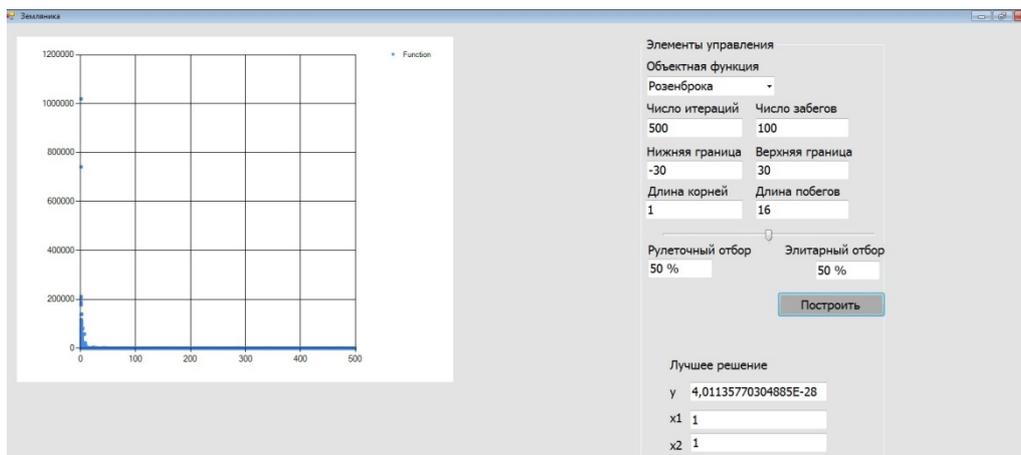


Рис. 1. Окно программы при минимизации функции Розенброка

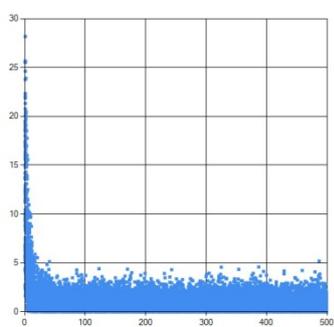


Рис. 2. Функция Растригина

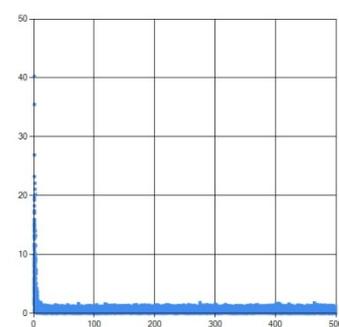


Рис. 3. Функция Гриванка

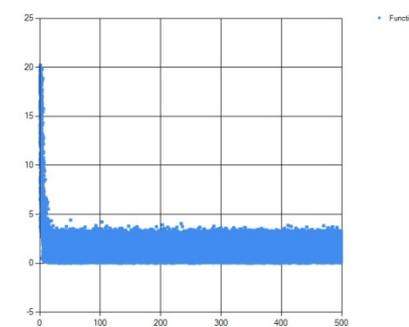


Рис. 4. Функция Экли

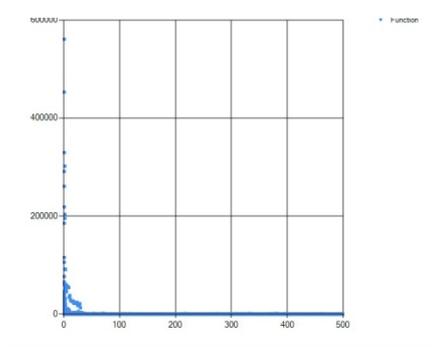


Рис. 5. Функция Розенброка

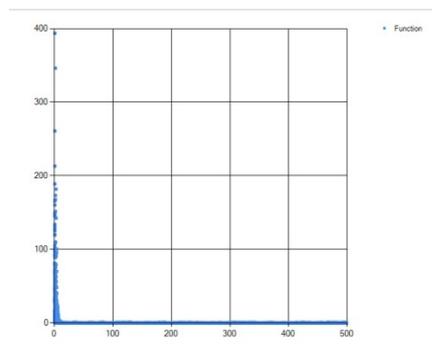


Рис. 6. Сфера

На рис. 1 показан общий вид интерфейса программы на примере минимизации функции Розенброка. В верхней части окна, справа от графика указываются значения параметров задачи и параметров метода. В нижней части отображается результат (точка минимума функции, значение функции в точке минимума).

На графиках (рис. 2 – рис. 6) показаны зависимости минимального значения целевой функции в текущей итерации от номера итерации.

В качестве метода отбора  $N$  точек из вектора  $X_{prop}(i)$  были выбраны метод рулеточного колеса и элитарный отбор. Опыты показывают, что наилучший результат получается при использовании комбинации этих методов.

Для тестирования работы алгоритма проводилась минимизация пяти тестовых функций, приведенных в табл. 1. Первые четыре функции многоэкстремальны. Для всех

функций значение в точке глобального оптимума равно 0. Функции Растригина и Гриванка достигают глобального минимума в  $x_i=0$ , ( $i = \overline{0, n}$ , где  $n$  – количество переменных). Функции Экли, Розенброка и сферы сдвинуты в пространстве координат таким образом, чтобы глобальный оптимум достигался в точке  $x_i=1$ , ( $i = \overline{0, n}$ , где  $n$  – количество переменных) (для исключения достижения оптимума при последовательном уменьшении переменных).

Ограничения поискового пространства, длина корней, длина побегов, значения функции и переменных приведены в табл. 2. Поиск производился для 2 измерений (то есть 2 переменных,  $n=2$ ), количество материнских растений – 50, максимальное число итераций в каждом забеге – 500, всего забегов – 100.

В табл. 2 приведены усредненные результаты исследований.

Тестовые функции Таблица 1

Функция	Формула
Растригина	$10n + \sum_{i=1}^n [(x_i)^2 - 10 \cdot \cos(2\pi(x_i - 1))]$
Гриванка	$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - 1)^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$
Экли	$20 + e - 20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi(x_i - 1))\right)$
Розенброка	$\sum_{i=1}^{n-1} (100 \cdot (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2)$
Сфера	$\sum_{i=1}^n (1 - x_i)^2$

Использованные параметры для тестовых функций Таблица 2

Функция	Пространство поиска	Длина корней	Длина побегов	Значение функции	$x_1$	$x_2$
Растригина	-5,12; 5,12	0,2	2,5	0	1,34E-13	1,01E-14
Гриванка	-600; 600	10	400	3,30E-22	1,19E-14	2,84E-14
Экли	-32; 32	1	16	-4,52E-14	-4,17E-14	-1,7 E-15
Розенборка	-30; 30	1	16	1,15E-27	1,00	1,00
Сфера	-25; 25	1	12	1,23E-30	1,00	1,00

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность оптимизационного алгоритма распространения земляники для поиска глобальных минимумов рассмотренных тестовых функций. Дальнейшие исследования предполагается посвятить вопросам применимости данного алгоритма при решении задач многоцелевой оптимизации [10].

### Библиографический список

- 1 Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов // Информационные технологии. 2012. № 7. С.1–32.
2. Курейчик В.В. Теория эволюционных вычислений / В. В. Курейчик, В. М. Курейчик, С. И. Родзин. М.: Физматлит, 2012. 260 с.
3. Демидова Л.А. Разработка однофакторных нечетких моделей для анализа тенденций временных рядов с использованием генетического алгоритма // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2007. № 52-2. С. 156-164.
4. Демидова Л.А., Титов С.Б. Исследование влияния основных параметров алгоритма функционирования искусственной иммунной сети на качество кластеризации объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 40. С. 54-60.
6. Демидова Л.А., Соколова Ю.С. Аспекты применения алгоритма роя частиц в задаче разработки SVM-классификатора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 84-92.
7. Merrikh-Bayat F. A Numerical Optimization Algorithm Inspired by the Strawberry Plant. Department of electrical and computer engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1407/1407.7399.pdf> (дата обращения 02.12.2015).

8. Salhi A., Fraga E. S. Nature-inspired optimisation approaches and the new plant propagation algorithm, 2011. [Электронный ресурс]. URL: <http://repository.essex.ac.uk/9974/1/paper.pdf> (дата обращения 02.12.2015).
9. Sulaiman M., Salhi A., Fraga E. S. The plant propagation algorithm: Modifications and implementation, 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://arxiv.org/pdf/1412.4290v1.pdf> (дата обращения 02.12.2015)
10. Deb K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester. UK: Wiley. 2001. pp. 221–232.

УДК 004.42; ГРНТИ 50.41.25

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТРУКТУРЫ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский

*Воронежский государственный технический университет,  
Россия, Воронеж, [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)*

*Аннотация.* В докладе рассматривается структура программного обеспечения оптимизационных моделей, обеспечивающих решение задачи развития мультисервисных сетей на основе аппарата дискретного и динамического программирования.

*Ключевые слова.* Динамическое программирование, дискретное программирование, мультисервисные сети.

## THE SOFTWARE FOR THE MODEL OF THE OPTIMAL MULTI-SERVICE NETWORK STRUCTURE DEVELOPMENT

D.E. Elizarov, V.L. Burkovsky

*Voronezh State Technical University,  
Voronezh, Russia, [bvl@vorstu.ru](mailto:bvl@vorstu.ru)*

*Abstract.* The report deals the structure of the software optimization model which provides a solution to the problem of multi-service networks development based on the discrete and dynamic programming methods.

*Keywords.* Dynamic programming, discrete programming, multiservice networks.

В связи со стабильным ростом потребности в мультисервисных услугах у населения, а также с высокой конкуренцией среди компаний, поставляющих данные услуги, особенную актуальность приобретает задача оптимизации развивающихся структур мультисервисных сетей с учетом сложившейся динамики роста потребности. Целью решения данной задачи является увеличение клиентской базы путем подключения новых пользователей и удержания существующих, а также расширение сфер влияния компании поставщика услуг. В этой связи необходимо реализовать новые средства оптимальной реорганизации развивающихся структур мультисервисных сетей и динамической модернизации комплекса технических средств (КТС) [1,2].

Для решения описанной проблемы предлагается модель выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей, позволяющая решать две основные задачи: задачу оптимального размещения включаемых в сеть дополнительных узлов и задачу оптимальной динамической модернизации комплекса технических средств (КТС) для узлов, включенных в сеть [2]. Обе задачи необходимо решать с учетом спрогнозированной динамики роста потребности в услугах мультисервисной сети. Рассмотрим детально каждую из них.

Для формального рассмотрения задачи оптимального размещения включаемых в сеть дополнительных узлов введем следующие обозначения:

$U = \{u_1, \dots, u_I\}$  - множество узлов сети  $u_i$ ,  $i = \overline{1, I}$ ;

$L = \{l_1, \dots, l_J\}$  - множество альтернативных мест размещения узлов сети  $l_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$p_{ij}$  - затраты на размещение узла  $u_i$  в месте  $l_j$ ;

$v_j$  - потенциальная емкость сети на территории  $l_j$ ,  $j = \overline{1, J}$ , отражает физическую потребность пользователей в услугах сети;

$V_{\min}$  - минимальное количество задействованной емкости, определяемое в соответствии с планом развития сети.

Используя введенные обозначения рассматриваемая задача может быть формально представлена в виде дискретной задачи минимизации суммарных затрат на размещение дополнительных узлов [1,3,4,5,6]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} z_{ij} \rightarrow \min, \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} v_j \geq V_{\min}, \sum_{j=1}^J z_{ij} \leq 1, i = \overline{1, I}, \quad (1)$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{узел } u_i \text{ размещается в месте } l_j; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Для реализации данной оптимизационной модели предлагается использовать модифицированный метод, базирующийся на методе Розша и методе ветвей и границ [3,7].

Задачу оптимальной динамической модернизации (КТС) для узлов, включенных в сеть, будем рассматривать в условиях фиксированного спроса на услуги сети на детерминированном временном интервале  $[0; T]$ . Для ее формального рассмотрения введем следующие обозначения:

$\tilde{t}_k$  - подынтервал времени, в рамках которого решается задача оптимального выбора КТС для  $k$ -го периода, где  $k = \overline{1, K}$ ;

$t_{kie}$  - подынтервал времени, в рамках которого осуществляется выбор типа оборудования  $b_e$  для узла  $u_i$ ,  $e = \overline{1, E}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $k = \overline{1, K}$ ;

$B = \{b_1, \dots, b_E\}$  - множество альтернативных типов оборудования, которые могут быть установлены в узлах сети;

$c_e$  - стоимость установки оборудования типа  $b_e$ ,  $e = \overline{1, E}$ ;

$d_e$  - стоимость деинсталляции оборудования типа  $b_e$ ,  $e = \overline{1, E}$ ;

$v_e$  - физическая емкость оборудования  $b_e$ ,  $e = \overline{1, E}$ , определяет максимальное количество пользователей, которых возможно подключить к оборудованию  $b_e$ .

Используя введенные обозначения рассматриваемая задача может быть представлена в виде задачи динамического программирования, где необходимо выбрать оптимальный состав КТС для каждого подынтервала  $\tilde{t}_k \in [0; T]$ ,  $k = \overline{1, K}$  и каждого включенного в сеть узла при условии минимизации затрат на модернизацию оборудования [1,3,8]:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E Q(t_{kie}) \rightarrow \min, \sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E v_e x(t_{kie}) \geq V_k^{\min}, k = \overline{1, K}. \quad (3)$$

$$Q(t_{kie}) = \begin{cases} 0, & \text{если } (\overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap \overline{x(t_{kie})}) \cup \\ & \cup (\overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap x(t_{kie})); \\ c_e, & \text{если } \overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap \overline{x(t_{kie})}; \\ d_e, & \text{если } x(t_{(k-1)ie}) \cap \overline{x(t_{kie})}, \end{cases} \quad (4)$$

$$x(t_{kie}) = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \text{ включается} \\ & \text{в состав} \\ & \text{узла } u_i \text{ на подынтервале } t_{kie}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

Данная задача является модифицированной версией задачи о ранце [9], и для ее решения предлагается использовать модифицированный метод динамического программирования, положенный в основу алгоритма, структура которого представлена на рис. 1.

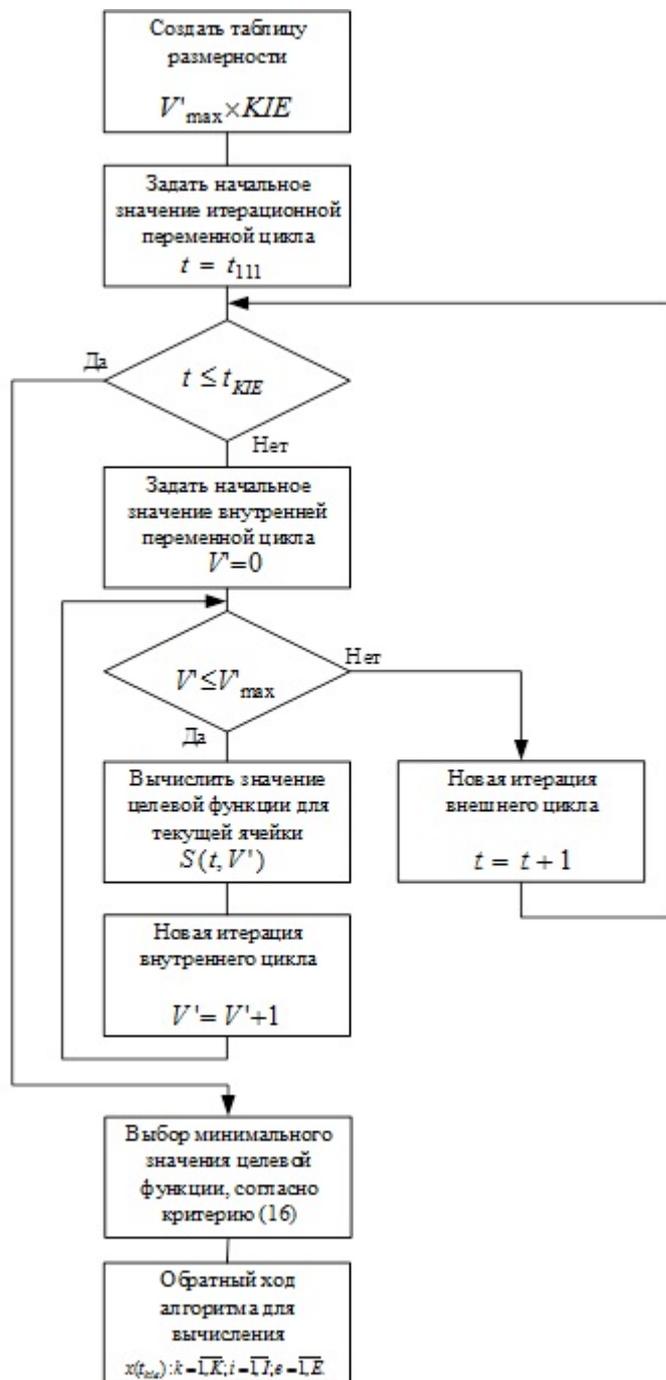


Рис. 1. Структура алгоритма решения задачи динамической оптимизации КТС

Средствами разработки выбраны среда программирования Microsoft Visual Studio 2013, язык программирования Visual C# и программная среда .Net 4.5. Для реализации графического интерфейса пользователя выбрана технология Windows Presentation Foundation(WPF) с применением шаблона проектирования Model-View-ViewModel (MVVM). В качестве хранилища данных создана база данных в СУБД Microsoft SQL Server 2012. Для обеспечения взаимодействия между базой данных и программой используется технология Entity Framework 6.0.

Структурная схема программного обеспечения представлена на рис. 2.

Разработанная программа обеспечивает решение рассмотренных задач на основе введенных пользователем данных: структура линий связи, структура узлов связи, структура КТС узлов сети, спрогнозированные уровни потребности в услугах сети на конкретных территориях, множество альтернатив мест размещения узлов, множество альтернатив технического обеспечения узлов. Ввод данных производится с помощью графического интерфейса пользователя.

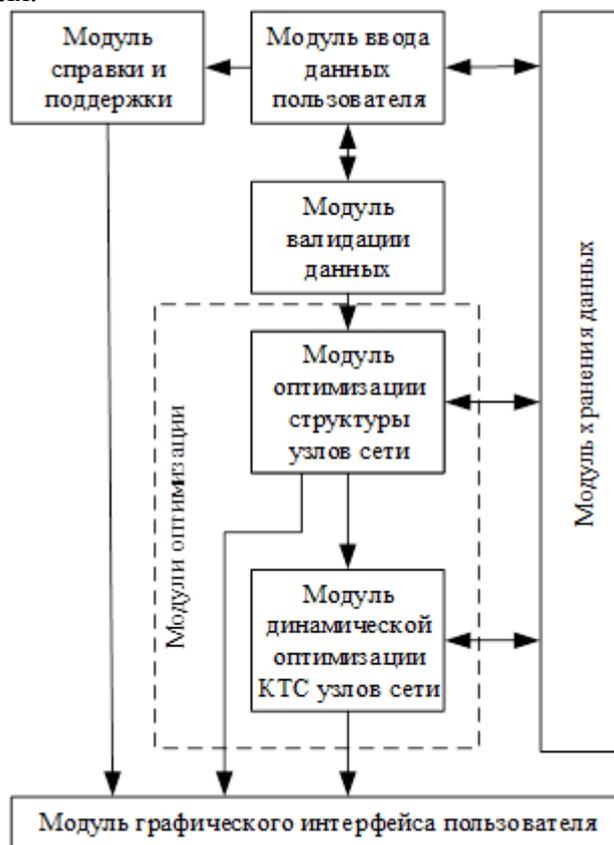


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения

Разработанное программное обеспечение предназначено для долгосрочного планирования оптимального развития структуры мультисервисных сетей в условиях фиксированного спроса пользователей на услуги и минимизацию затрат на реорганизацию структуры узлов сетей и модернизацию КТС, что способствует расширению сферы влияния в условиях жесткой конкуренции, а также привлечению новых пользователей и удержанию существующих [3,4,5].

### Библиографический список

1. Елизаров, Д.Э. Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся мультисервисных сетей информационного обслуживания населения [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - № 4. – С. 20-23.
2. Степанов, С.Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей [Текст] / С.Н. Степанов. – М.: Эко-Трендз, 2010. - 392 с.
3. Елизаров Д.Э. Обобщенная оптимизационная модель развития мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - № 3. - С 28-30.
4. Елизаров Д.Э. Алгоритмизация решения задачи динамической оптимизации структуры мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - № 6. – С 59-61.
5. Бурковский, В. Л. Анализ развивающихся информационных систем на основе аппарата моделирования и оптимизации [Текст]: монография / В. Л. Бурковский, И. М. Матвиенко, А. В. Бурковский. – Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2009. – 136 с.
6. Елизаров Д.Э. Модификация метода Беллмана решения динамической задачи о ранце [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.-Т. 11. - № 5. – С. 31-33.

7. Ковалев М. Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование [Текст] / М.Ковалев. - Либроком, 2011. - 192 с.
8. Беллман Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. - М.: Наука, 1965. - 460 с.
9. Pisinger D. Knapsack problems [Текст] / D. Pisinger, H. Kellerer, U. Pferschy. – Springer Science & Business Media, 2013. – 548 с.

УДК 681.5; ГРНТИ 50.43.17

## **СПЕЦИФИКАЦИЯ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ IEC 61499 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ASML**

**В.Н. Дубинин\*, Н.П. Вашкевич\*, Л.П. Климкина\*\***

*\* Пензенский государственный университет,  
Россия, Пенза, [duvini@mail.ru](mailto:duvini@mail.ru)*

*\*\* Пензенская государственная сельскохозяйственная академия,  
Россия, Пенза, [ludmila.klimkina@gmail.com](mailto:ludmila.klimkina@gmail.com)*

*Аннотация.* Предложен объектно-ориентированный подход к спецификации базисных функциональных блоков стандарта IEC 61499 на языке AsmL, позволяющий получить высокоуровневые выполнимые спецификации на основе машин абстрактных состояний.

*Ключевые слова.* Спецификация, машины абстрактных состояний, AsmL, базисный функциональный блок, IEC 61499.

## **SPECIFICATION OF IEC 61499 BASIC FUNCTION BLOCKS USING ASML LANGUAGE**

**V.N. Dubinin\*, N.P. Vashkevich\*, L.P. Klimkina\*\***

*\* Penza State University,  
Penza, Russia, [duvini@mail.ru](mailto:duvini@mail.ru)*

*\*\* Penza State Agricultural Academy,  
Penza, Russia, [ludmila.klimkina@gmail.com](mailto:ludmila.klimkina@gmail.com)*

*Abstract.* This paper proposes an object oriented approach to the specification of IEC 61499 basic function blocks using AsmL language that allows to obtain high-level executable specification on the basis of abstract state machines.

*Keywords.* Specification, abstract state machines, AsmL, basic function block, IEC 61499.

Понятие машин абстрактных состояний (*Abstract State Machines - ASM*), в более ранней терминологии – «эволюционирующей» алгебры, появилось и было развито в работах Ю. Гуревича в начале 90-х годов [1]. Машины абстрактных состояний - это мощное средство формальной спецификации операционной семантики вычислительных систем (алгоритмов) на любом требуемом уровне абстракции. Основная идея теории *ASM* состоит в хранении состояний объекта как определенного набора значений, связанных с локациями. Согласно этой теории математическая модель какого-либо вычислительного процесса включает формальное определение множества возможных состояний системы; а также функции переходов (которые по текущему состоянию вычисляют следующее). Математическая модель начинает свою работу в начальном состоянии. Затем осуществляется ряд последовательных переходов в последующие состояния. Причем каждое состояние математической модели может быть представлено некой алгебраической структурой – множеством с отношениями и функциями. Таким образом, выполнение математической модели представляется в виде последовательности описанных структур. В результате оказывается, что математическая модель в целом может быть представлена в виде конечного числа правил переходов очень простого вида.

*AsmL (Abstract State Machine Language)* – язык машин абстрактных состояний, разработанный группой *Foundations of Software Engineering* из исследовательского центра *Microsoft* [2]. Это объектно-ориентированный язык спецификаций, в основе которого лежит теория машин абстрактных состояний. Кроме того, *AsmL* является *.Net* языком и имеет доступ ко всем стандартным сервисам *.Net Framework*. Однако, прежде всего, *AsmL* является языком спецификаций и содержит высокоуровневые конструкции, близкие к математическим (множества, отображения и т.д.). Кроме того, язык *AsmL* ориентирован на поддержку разработки, основанной на моделях, с ее средствами моделирования программ,

генерацией тестовых последовательностей и исследованием состояний на метауровне. Спецификации на *AsmL* могут быть запущены как программы, например, чтобы имитировать поведение определенной системы. Однако предполагается, что в отличие от обычных программ размер кода исполняемых спецификаций должен быть минимален. Кроме того, использование *AsmL* должно сводить к минимуму усилия пользователя для внесения изменений в модель.

Общепризнано, что в настоящее время стандарт IEC 61499 является одной из ключевых технологий в построении распределенных компонентно-базированных систем управления в сфере промышленной автоматизации. Существует ряд работ, в которых затрагиваются вопросы формального описания и моделирования функциональных блоков (ФБ) стандарта IEC 61499 (например, [3]). Ниже представлена методика описания базисных ФБ на языке *AsmL*. Поскольку машины абстрактных состояний являются формальной нотацией, то и описание ФБ на языке *AsmL* можно отнести к классу формальных моделей.

Рассмотрим алгоритм функционирования базисного ФБ:

*/\* Фаза инициализации \*/*

*Установка диаграммы OSM (Operation State Machine) в состояние s0*

*Установка диаграммы ECC (Execution Control Chart) в начальное состояние*

*Установка начальных значений переменных (если нужно)*

*/\* Фаза обработки сигнала \*/*

*Прием сигнала*

*M1: ЕСЛИ OSM находится в состоянии s0, ТО*

*{Если есть соответствующие WITH-связи, ТО Выполнение съема данных*

*M2: Переход OSM в состояние s1*

*Вычисление (поиск) в ECC разрешенных ЕС-переходов*

*ЕСЛИ разрешенных ЕС-переходов нет, ТО*

*{Переход OSM в состояние s0*

*Перейти на метку M1}*

*Выборка из множества разрешенных ЕС-переходов самого приоритетного*

*Переход OSM в состояние s2*

*Переход ECC в состояние, соответствующее выбранному ЕС-переходу*

*Последовательное выполнение ЕС-акций, прикрепленных к текущему ЕС-состоянию*

*ЕСЛИ все ЕС-акции выполнены, ТО Перейти на метку M2*

Для кодирования ФБ с помощью языка *AsmL* предлагается два класса:

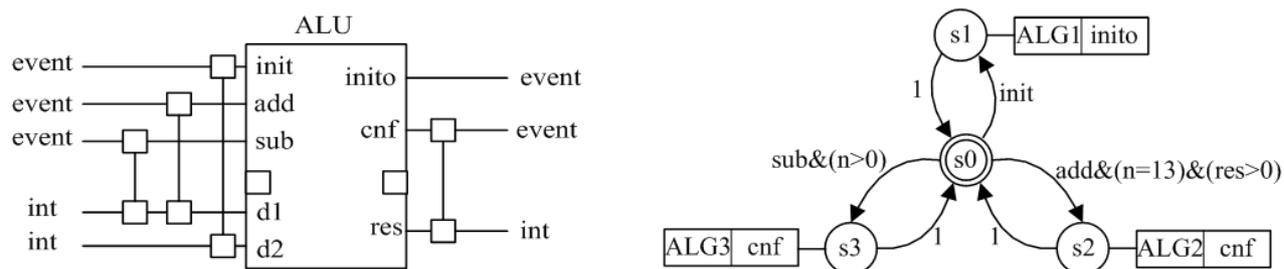
1) class *OSM* – класс, описывающий работу диаграммы *OSM*; 2) class *ECC* – класс, описывающий диаграмму *ECC* (основной класс для ФБ). Для описания функции переходов в диаграммах используется высокоуровневая конструкция языка *AsmL Map*. *Map* – это перечисление связей элемента с элементом в форме {*ключ<sub>1</sub>* -> *значение<sub>1</sub>*, *ключ<sub>2</sub>* -> *значение<sub>2</sub>*, ...}. В качестве ключа в данной функции используется не одна переменная, а последовательность из двух: текущего состояния и сигнала; в качестве значения – следующее состояние диаграммы.

Выдача выходных сигналов и переменных, полученных в результате действий в ФБ, осуществляется через внешние буфера. Для выходных сигналов используется последовательность переменных типа *boolean*: *var BufOutputSignals as Seq of Boolean*.

Диаграммы *OSM* и *ECC* представлены в виде отдельных классов. В каждом из классов определен метод *ExecFB* – метод классов *ECC* и *OSM*, предназначенный для описания переходов в соответствующих диаграммах. В методе *ExecFB* класса *OSM* осуществляется переход в автомате, соответствующем диаграмме *OSM*. Метод возвращает последовательность из состояний, в котором была диаграмма *OSM* [*S0, S1, S2, S1, S0*]. В методе *ExecFB* класса *ECC* создается экземпляр класса *OSM*, осуществляется запуск функции переходов для него. И, в зависимости от полученной после выполнения функции переходов для *OSM* последовательности сигналов и условий, осуществляются переходы в диаграмме *ECC*.

Обработка входных сигналов (в базисных ФБ) является одним из самых дискуссионных моментов в моделях выполнения ФБ. Это связано, прежде всего, с тем, что сам стандарт не определяет полно жизненный цикл входных сигналов, это особенно касается тех моментов, которые связаны с их удалением. При моделировании ФБ периодически возникает ситуация, когда на один функциональный блок одновременно приходит два или более сигналов. В этом случае предлагается выбрать сигнал с наивысшим приоритетом и осуществить удаление остальных. Поиск и удаление сигнала осуществляются с помощью алгоритма *AlgorithmDelSignals*. В алгоритме *AlgorithmDelSignals* предлагается задать последовательности вектора приоритетов и номеров сигналов.

Рассмотрим пример кодирования базисного ФБ *ALU* (см. рисунок) по приведенной выше методике.



Базисный функциональный блок *ALU*: интерфейс (слева) и диаграмма *ECC* (справа)

Для кодирования диаграммы *OSM* создается переменная *OSMALU*, представляющая собой конструкцию “*Map*”, где ключом является последовательность переменных производных типов *State* (состояние) и *Condition* (условие), а значением – переменная типа *State* (состояние):

```
var OSMALU as Map of (State, Condition) to State = {
  ("S0", "t1") -> "S1",
  ("S1", "t3") -> "S2",
  ("S1", "t2") -> "S0",
  ("S2", "t4") -> "S1"}.

```

Также необходимо создать переменную для обозначения текущего состояния диаграммы *OSM*:

```
var CurrentStateOSM as State = "S0"
var AllTransition as Seq of (Seq of State) = [{"S0"}].

```

На вход метода класса *OSM ExecFB* подается последовательность из входных сигналов, пришедших в данный момент на входы ФБ. Для *ALU* это будет последовательность из трех элементов типа *boolean*. Возвращает данный метод последовательность из состояний, в которые осуществлялся переход в диаграмме *OSM*. На первом шаге работы *OSM* производится проверка, есть ли на входах хоть один сигнал. Если такой сигнал присутствует, то условие перехода *t1* – истинно и осуществляется переход в состояние *S1*:

```
S1 := true
CurrentStateOSM := OSMALU(CurrentStateOSM, "t1")
ReturnSeq(ind) := "S1"

```

На следующем шаге работы алгоритма осуществляется проверка истинности условий перехода из текущего состояния для диаграммы *ECC*. Если хотя бы одно условие – истина, то диаграмма *OSM* переходит в состояние *S2* под действием условия *t3*:

```
S2 := true
CurrentStateOSM := OSMALU(CurrentStateOSM, "t3")
ReturnSeq(ind) := "S2"

```

В противном случае осуществляется возврат к состоянию  $S0$  под действием условия  $t2$ :

```
CurrentStateOSM:=OSMALU(CurrentStateOSM,"t2")
ReturnSeq(ind) := "S0"
```

Возврат из состояния  $S2$  в  $S1$  осуществляется автоматически.

```
CurrentStateOSM:=OSMALU(CurrentStateOSM,"t4")
ReturnSeq(ind) := "S1"
```

Снятие же входных сигналов и переменных со входов, моделирование *WITH*-связей и выполнение алгоритмов осуществляются в классе *ECC*. Рассмотрим выполнение *ECC* пошагово.

Сама диаграмма *ECC* (условия переходов в ней и состояния) описывается аналогичным образом, как и *OSM*:

```
var FuncTransitionECC = {
("S0","Init") -> "S1",
("S1","I") -> "S0",
("S0","Add") -> "S2",
("S2","I") -> "S0",
("S0","Sub") -> "S3",
("S3","I") -> "S0" }.
```

Текущее состояние *ECC* также обозначается аналогично:

```
var CurrentStateECC as State = "S0".
```

Кроме того, необходимо описать выходные сигналы (как переменные типа *boolean*) и переменные (с соответствующим им типом):

```
var Init0 as Boolean = false
var Cnf as Boolean = false
var d1 as Integer = 0
var d2 as Integer = 0.
```

В качестве входных переменных функции *ExecFB* используется последовательность сигналов: *SeqInputSignals as Seq of Boolean*.

Если сигнал на входе есть, то он обозначается как "1" (*true*). Если же вход "не занят", то на месте этого сигнала – "0" (*false*). Иногда, как описывалось выше, возникает ситуация, когда сигналы приходят на несколько входов одновременно. Так что перед тем, как анализировать возможные переходы в *ECC* и *OSM*, необходимо выполнить проверку: действительно ли на входе ФБ присутствует хотя бы один сигнал.

Удаление «двойных» и «тройных» входных сигналов осуществляется в данном блоке также по описанной выше методике:

```
AlgorithmDelSignals (InputSeq as Seq of Boolean) as Seq of Boolean
var SeqPriority as Seq of Integer
var ReturnSeq as Seq of Boolean
var MaxPriority as Integer
var NumberMaxPriority as Integer.
```

```
ReturnSeq := InputSeq
```

Необходимо задать вектор приоритетов и номеров сигналов:

```
SeqPriority := [1, 3, 2]
NumberPriority = {0, 1, 2}.
```

То есть в данном случае "нулевой" вход имеет максимальный приоритет – 1. Входы нумеруются сверху вниз. Таким образом, для того, чтобы изменить приоритеты входов, пользователю достаточно только изменить вектор *SeqPriority*. Далее осуществляется поиск входного сигнала с наивысшим приоритетом:

```
step until fixpoint
choose i in NumberPriority
```

```

where (SeqPriority(i) < MaxPriority) and (ReturnSeq(i) = true)
  MaxPriority := SeqPriority(i)
  NumberMaxPriority := i.

```

Удаление всех остальных сигналов (приоритеты которых меньше):

```

step
  foreach Z in NumberPriority
    if (Z < NumberMaxPriority) or (Z > NumberMaxPriority) then
      ReturnSeq(Z) := false
    else
      ReturnSeq(Z) := true.

```

Функция возвращает измененную последовательность входных сигналов (с удаленными сигналами):

```

return ReturnSeq.

```

На следующем шаге происходит “распаковка” последовательности входных сигналов и составление условий переходов для ECC:

```

var Init as Boolean = SeqOfSignals(0)
var Add as Boolean = SeqOfSignals(1)
var Sub as Boolean = SeqOfSignals(2)

```

```

cond_s0s1 := Init
cond_s0s2 := Add and (n=13) and (res>0)
cond_s0s3 := Sub and (n>0).

```

Далее осуществляется создание экземпляра класса *OSM* для данного ФБ и запуск этой диаграммы (на вход функции подается последовательность входных сигналов, возвращает же она, как описано выше, последовательность состояний, в которых была диаграмма *OSM*):

```

step
  let F1_OSM = new OSM()

```

```

var S as Seq of String = F1_OSM.ExecFB(SeqOfSignals).

```

На следующих этапах, в зависимости от состояния *OSM*, осуществляются те или иные действия. Если диаграмма *OSM* перешла в состояние *S1*, то необходимо запустить диаграмму *ECC* и произвести съём данных согласно *WITH*-связям. Съём данных осуществляется с внешних буферов, названия которых, для наглядности, дублируют названия переменных с приставкой *buf*. Например, если истинно условие перехода *ECC* из состояния *S0* в *S1* (*cond\_s0s1 = true*), то выполняется следующая последовательность операторов:

```

CurrentStateECC := FuncTransitionECC(CurrentStateECC, "Init")
d2 := bufD2.

```

Если затем диаграмма *OSM* перешла в состояние *S2*, то необходимо выполнить соответствующие алгоритмы, осуществить выдачу входных сигналов и переменных, например:

```

AlgorithmADD(d1,d2)
Cnf := true
bufRES := res
CurrentStateECC := FuncTransitionECC(CurrentStateECC, "1").

```

Сами же алгоритмы описываются как отдельные методы внутри класса *ECC*:

```

AlgorithmADD(d1 as Integer, d2 as Integer)
  res := d1 + d2 + n.

```

Тестирование выполнения базисного блока *ALU* производилось в системе *SpecExplorer* [4]. Данная система, разработанная фирмой *Microsoft*, является интерпретатором языка *AsmL*.

Направлением дальнейших исследований является разработка комплексной методологии спецификации систем ФБ, включающей составные ФБ и субприложения, с учетом моделей выполнения, а также разработка автоматического транслятора XML-описаний функциональных блоков в код *AsmL*.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 15-11-10010 «Анализ и синтез сетевых структур сложных систем на основе тензорных и трансформационных методов».

### **Библиографический список**

1. Gurevich Y. Evolving Algebras 1993: Lipari Guide // Specification and Validation Methods. – Oxford University Press, 1995. – pp. 9-36.
2. Gurevich Y., Rossman B., Schulte W. Semantic Essence of AsmL: Extended Abstract // Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 3188. – Springer-Verlag, 2004. – pp. 240-259.
3. Дубинин В.Н., Вяткин В.В. Модели функциональных блоков ИЕС 61499, их проверка и трансформации в проектировании распределенных систем управления: монография. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 348 с.
4. Model-based Testing with SpecExplorer [Электронный ресурс]. URL: <http://research.microsoft.com/en-us/projects/specexplorer/> (дата обращения 21.02.2016).

УДК 004.021; ГРНТИ 50.07.05/50.33.04

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МНОГОПОТОЧНОГО ОПРОСА ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА ЛОКАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

**И.А. Веденяпин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [vedenyapin.ivan@yandex.ru](mailto:vedenyapin.ivan@yandex.ru)*

*Аннотация.* Представленный алгоритм и метод расчета оптимального числа потоков при многопоточной организации опроса объектов мониторинга локальной вычислительной сети позволяют реализовать мониторинг сети при существенной минимизации затрат аппаратных ресурсов сервера в целом и процессорного времени как ресурса в частности.

*Ключевые слова.* Мониторинг локальной вычислительной сети, снижение нагрузки, многопоточность, алгоритм опроса объектов.

## **DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR MULTI-THREADED POLLING MONITORING OBJECT LOCAL AREA NETWORK**

**I.A. Vedenyapin**

*Ryazan state radio engineering university,  
Ryazan, Russia, [vedenyapin.ivan@yandex.ru](mailto:vedenyapin.ivan@yandex.ru)*

*Abstract.* The algorithm and the method of calculating the optimum number of threads in the multithreaded polling organization monitoring objects LAN allows for network monitoring with substantial cost minimization of hardware resources of the server as a whole and CPU time as a resource, in particular.

*Keywords.* Monitoring of local area network, reducing the load, multithreading algorithm polling objects.

Рассматривается ряд проблемных вопросов по реализации многопоточной схемы работы системы мониторинга ресурсов локальной вычислительной сети. Предлагаются способ опроса объектов мониторинга с учётом экономии процессорного времени и алгоритм работы серверной составляющей программного продукта.

Повышение надежности компьютерных систем обеспечивается как надежностью программного и аппаратного обеспечения системы, так и правильной организацией управления системой. Одним из актуальных моментов управления является наблюдение (мониторинг) за параметрами аппаратных составляющих и её ресурсами.

При проектировании современных систем мониторинга наибольшую сложность представляет решение вопроса выделения требуемых ресурсов серверной составляющей программного комплекса. Решить данную проблему, обусловленную необходимостью снижения нагрузки на серверную часть вычислительной сети и экономии процессорного времени, предлагается путем реализации многопоточной схемы работы системы мониторинга.

Современные операционные системы (ОС) за счет распределения процессорного времени реализуют возможность многопоточной работы приложений [1]. Для основных задач системы мониторинга использование многопоточности в работе приложения является выгодным, так как в процессе опроса рабочих станции вычислительной сети имеются временные интервалы, в которых не используются ресурсы процессора и памяти.

Использование данных интервалов для создания и работы параллельных потоков опроса объектов мониторинга позволят минимизировать время простоя процессора, как представлено на рис. 1.

При расчете оптимального числа потоков при опросе объектов мониторинга используются принятые соотношения [2].

Для случая без учета загруженности процессора (идеальный случай):

$$N = t_t / t_p,$$

где  $t_t$  – средняя длительность потока;  $t_p$  – средняя длительность использования потоком процессорного времени.

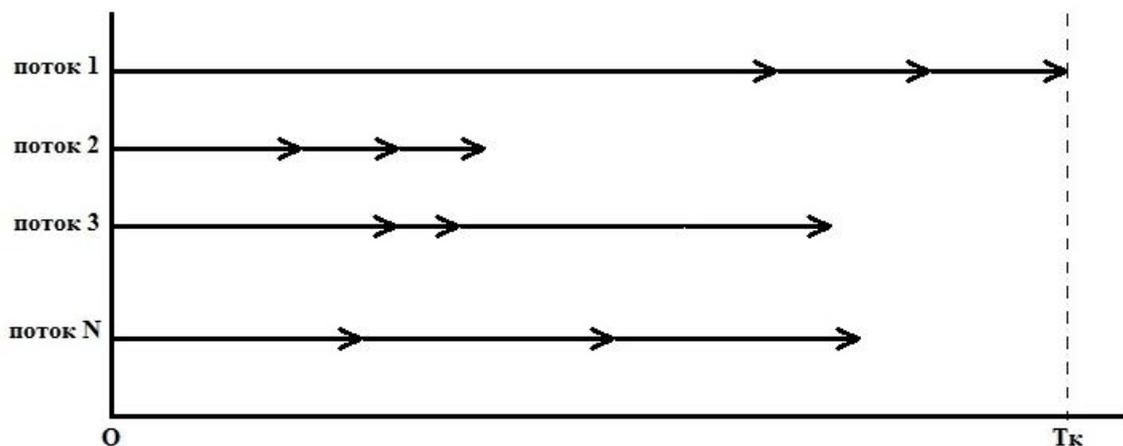


Рис. 1. Графическое представление многопоточной работы приложения

Для случая, отличного от идеального, применяется соотношение:

$$N = t_t * (1 - P) / t_p,$$

где  $P$  – коэффициент загруженности процессора ( $0 < P < 1$ ).

В случае нехватки оперативной памяти используется следующая формула:

$$N = t_t * (1 - P) / (t_p + M * t_s),$$

где  $t_s$  – время перезагрузки данных из оперативной памяти в файл (один полный цикл - загрузка в память перед началом работы и выгрузка из памяти в конце);  $M$  – число перезагрузок за проведение опроса одного устройства, определяющееся из отношения:

$$M = t_p / t_j,$$

где  $t_j$  – время, на которое предоставляется доступ к ресурсу процессора потоку, при передаче ему управления в одной итерации.

Динамический расчет оптимального числа потоков позволит в целях экономии процессорного времени на этапе мониторинга объектов локальной вычислительной сети инициировать создание дополнительных потоков, как представлено на рис. 2.

Как следует из графического представления динамический расчет частично решает проблему снижения нагрузки на серверную составляющую системы мониторинга.

Для более полного решения вопроса использования процессорного времени необходимо отслеживать время выполнения потока исходя из возможности бесконечно долгого выполнения попыток опроса объекта в случае возникновения аппаратных проблем с вычислительной сетью [3,4].

Данная мера позволит исключить из общего набора объектов, подлежащих мониторингу, те, поток опроса параметров которых превышает значение:

$$T_{pr} = k * t_t,$$

где  $k$  – коэффициент задержки длительности потока опроса;  $T_{pr}$  – предельно допустимая длительность потока опроса.

Для случая, отличного от идеального, применяется соотношение:

$$T_{pr} = k * (1 - S) * t_t,$$

где  $S$  – коэффициент загрузки сети ( $0 < S < 1$ ).

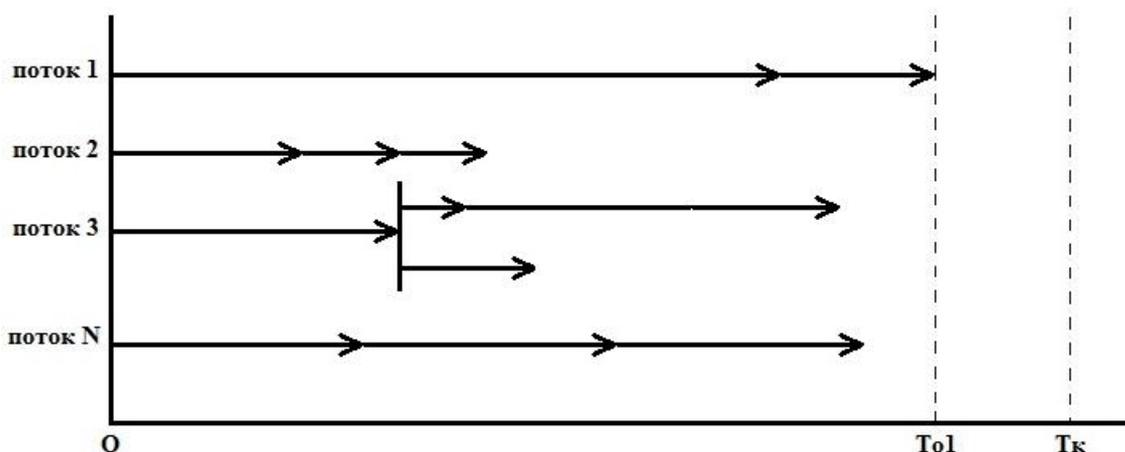


Рис. 2. Графическое представление многопоточной работы приложения с динамическим пересчетом оптимального количества потоков опроса

Таким образом, оптимальное количество потоков будет определяться выражением:

$$N = t_t * (1 - P) / (t_p + M * t_s) \text{ для } \forall t_t \leq T_{pr}, \text{ где } T_{pr} = k * (1 - S) * t_t.$$

При исключении из общего набора мониторинг ресурсов данного объекта будет проводиться на клиентской стороне, согласно принципу распределения нагрузки между отдельными локальными станциями путем замены централизованного опроса всех компьютеров со стороны сервера на частично независимое функционирование клиентских составляющих системы [5]. При этом задача экономии ресурсов сервера будет выполнена в более полном объеме, как представлено на рис. 3, поскольку поток 1, имеющий большую длительность, обрабатывается на стороне клиента.

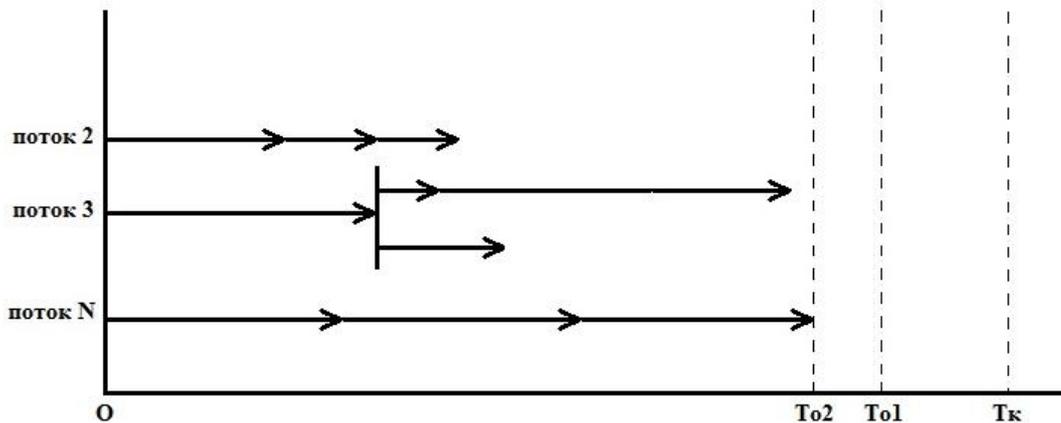


Рис. 3. Графическое представление многопоточной работы приложения с исключением длительных потоков

С учетом описанных особенностей использования многопоточности в серверной составляющей системы мониторинга объектов локальной вычислительной сети предлагается следующий алгоритм опроса объектов мониторинга.

1. Запуск основного потока управления.
2. Определение оптимального числа потоков.
3. Запуск потоков опросов рабочих станций.
4. Фиксирование полученных значений ресурсов объектов мониторинга.
5. Если длительность потока опроса превышает предельно допустимую – переход к пункту 7.
6. Если текущее количество потоков меньше оптимального, – переход к пункту 2. Если нет, – переход к пункту 5.
7. Завершение потока опроса.

В графической форме обобщенный алгоритм многопоточного опроса объектов мониторинга локальной вычислительной сети представлен на рис. 4.

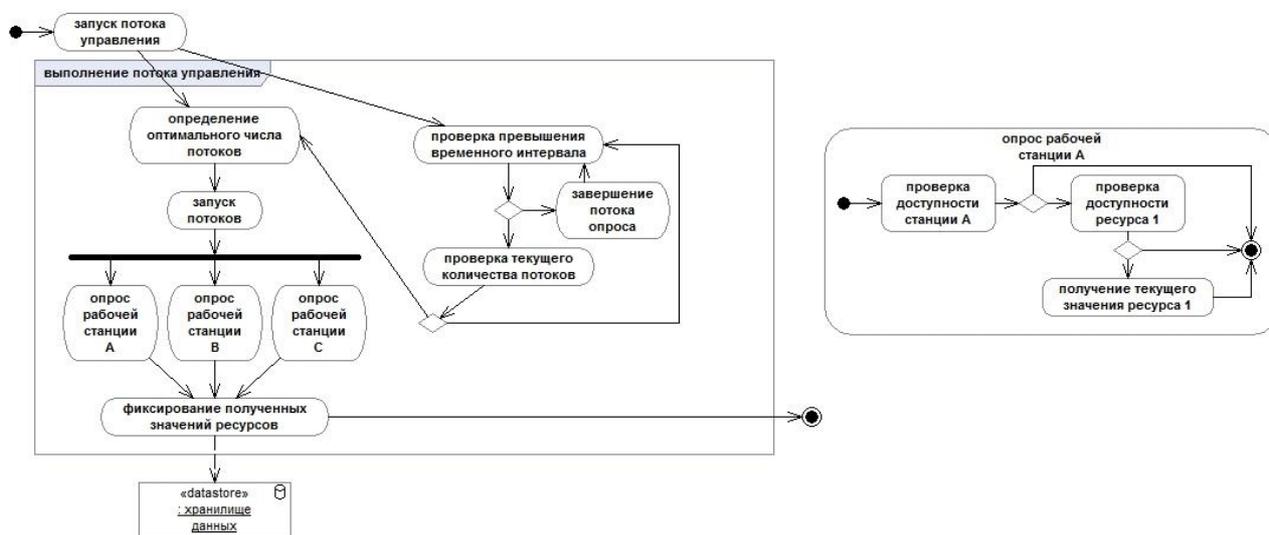


Рис. 4. Возможная реализация обобщенного алгоритма многопоточного опроса объектов мониторинга локальной вычислительной сети

Представленный алгоритм и метод расчета оптимального числа потоков при многопоточной организации опроса позволяют реализовать мониторинг локальной вычислительной сети при существенной минимизации затрат аппаратных ресурсов сервера в целом и процессорного времени (как ресурса) в частности.

## Библиографический список

1. Таненбаум Э. Современные операционные системы. 2-е изд. СПб.: Питер, 2002. С.97-98.
2. Сагитов М.Р. Разработка системы мониторинга компьютерной сети: Материалы II международной заочной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной информатики». -Коломна: МГОСГИ, 2012. С.45-47.
3. Роберт С.Мартин. Чистый код: создание, анализ, рефакторинг. Библиотека программиста. СПб.: Питер, 2010. С.210-215.
4. Столлинг В. Операционные системы. 4-е изд. М.: Вильямс, 2002. С.245-250.
5. Веденяпин И.А., Холопов С.И. Кроссплатформенная система мониторинга локальной вычислительной сети/ Материалы I научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ, 2015. С.13-14.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.19

## ВОПРОСЫ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СТРОГО БИНАРНЫХ ДЕРЕВЬЕВ И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА

Н.Н. Астахова, Л.А. Демидова

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, asnadya@yandex.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются аспекты разработки моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев при решении задач индивидуального и группового прогнозирования. Для учета двух показателей качества моделей прогнозирования предложено использовать принципы, заложенные в многоцелевые эволюционные алгоритмы оптимизации.

*Ключевые слова.* Модель прогнозирования, строго бинарное дерево, модифицированный алгоритм клонального отбора, Парето-доминирование, расстояние скученности.

## ASPECTS OF THE MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION IN THE PROBLEMS OF THE INDIVIDUAL AND GROUP FORECASTING OF THE TIME SERIES WITH THE APPLICATION OF THE FORECASTING MODELS ON THE BASE OF THE STRICTLY BINARY TREES AND THE MODIFIED SELECTION ALGORITHM

N.N. Astakhova, L.A. Demidova

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, asnadya@yandex.ru*

*Abstract.* Aspects of the development of the forecasting models on the base of the strictly binary trees at the problems' solution of the individual and group forecasting have been considered. For the accounting of two quality indicators of the forecasting models it is offered to use the principles underlain into the multiobjective evolutionary optimization algorithms.

*Keywords.* Forecasting model, strictly binary tree, modified clonal selection algorithm selection, Pareto-dominance, crowding distance.

Важную роль в решении задачи индивидуального и группового прогнозирования временных рядов (ВР) играет этап выбора адекватной модели прогнозирования. Использование технологий искусственного интеллекта предоставляет разработчику передовой инструментарий, позволяющий варьировать и подбирать настраиваемые параметры моделей прогнозирования, благодаря чему удается получить искомую модель прогнозирования при приемлемых временных затратах.

В частности, при использовании модели прогнозирования на основе строго бинарных деревьев (СБД) и модифицированного алгоритма клонального отбора (МАКО) [1 – 3, 5] модель представляется в виде закодированной с помощью случайно выбранных символов (выбираемых из трех алфавитов) последовательности – антитела, которое преобразуется в аналитическую зависимость, представляющую собой некоторую функцию, применяемую для получения прогнозных значений ВР. Поиск искомой модели прогнозирования осуществляется в процессе итерационных вычислений. При этом на каждом шаге этого

процесса выявляются лучшие модели прогнозирования, которые на следующем шаге становятся моделями-родителями для нового поколения моделей-клонов [1 – 9]. Очевидно, что правильный выбор лучших антител является залогом эффективного применения МАКО, а также его сходимости.

Традиционный подход, эффективно используемый при разработке моделей прогнозирования ВР, заключается в оценивании качества моделей прогнозирования с учетом, в частности, величины средней относительной ошибки прогнозирования, полученной на обучающей выборке. При этом средняя относительная ошибка прогнозирования должна быть минимизирована [1 – 3, 5, 7 – 9].

Однако использование средней относительной ошибки прогнозирования в качестве показателя качества модели прогнозирования далеко не всегда является достаточным для получения действительно лучшей модели прогнозирования. Зачастую требуется учитывать дополнительные показатели качества модели прогнозирования, например показатель соответствия сезонным тенденциям, показатель соответствия тренду временного ряда и т.п. [6]. Обычно не представляется возможным выбрать единственный показатель качества модели прогнозирования, который бы в целом мог учесть все поведенческие особенности анализируемого ВР. В связи с этим актуальной является проблема разработки подходов к созданию моделей прогнозирования, обеспечивающих учет нескольких показателей качества при отборе лучшей модели прогнозирования.

Так, для оценки качества моделей прогнозирования целесообразно дополнительно (наряду со средней относительной ошибкой прогнозирования [4, 6]) использовать показатель качества, который позволяет оценить общую тенденцию изменения значений известных элементов ВР (например, показатель несовпадения тенденций ВР).

Средняя относительная ошибка прогнозирования (Average Forecasting Error Rate) *AFER* [1 – 3, 5], называемая в контексте работы с МАКО показателем аффинитета (affinity) *Aff* и используемая в роли одного из показателей качества модели прогнозирования, может быть вычислена как:

$$AFER = \frac{\sum_{j=r+1}^n |(f^j - d^j)/d^j|}{n - r} 100\%, \quad (1)$$

где  $d^j$  и  $f^j$  – соответственно реальное и предсказанное значения для  $j$ -го элемента ВР (для  $j$ -го отсчета времени);  $r$  – порядок модели;  $n$  – количество элементов ВР (количество отсчетов времени).

Показатель несовпадения тенденций ВР, применяемый в роли еще одного показателя качества модели прогнозирования, может быть вычислен как:

$$Tendency = \frac{h}{n - r - 1}, \quad (2)$$

где  $h$  – количество отрицательных произведений  $(f^{j-1} - f^j) \cdot (d^{j-1} - d^j)$  при  $j = \overline{r+2, n}$ ;  $f^j$  и  $d^j$  – предсказанное и реальное значения ВР для  $j$ -го отсчета времени;  $n$  – количество значений ВР (количество отсчетов времени);  $r$  – порядок модели;  $n - r - 1$  – общее количество произведений  $(f^{j-1} - f^j) \cdot (d^{j-1} - d^j)$ .

Показатели (1) и (2) позволяют проанализировать сходство прогнозных значений известных элементов анализируемого ВР с реальными, но с использованием разных принципов оценивания. Если показатель аффинитета *Aff* используется при реализации МАКО для оценки «приспособляемости» (качества) антитела *Ab* (и соответствующей ему модели прогнозирования), то показатель несовпадения тенденций *Tendency* позволяет оценить качество антитела *Ab* (и соответствующей ему модели прогнозирования) с учетом совпадения с трендом анализируемого ВР. При этом оба показателя должны быть минимизированы.

Таким образом, при разработке моделей прогнозирования на основе СБД и МАКО очевидна целесообразность реализации одновременного учета при оценке качества моделей наряду со значением показателя аффинитета  $Aff(1)$  (средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$ ) значения показателя несовпадения тенденций  $Tendency(2)$ .

Следует отметить, что данная задача является актуальной как при разработке моделей индивидуального прогнозирования ВР, так и при создании моделей группового прогнозирования с применением технологий кластерного анализа [7-9]. При этом во втором случае более точное построение обобщающих моделей прогнозирования – ВР-центроидов должно обеспечить и более точное разбиение ВР на кластеры и, следовательно, в итоге – более точные результаты.

Для решения задачи одновременного учета двух показателей качества при разработке модели прогнозирования могут быть применены различные хорошо зарекомендовавшие себя подходы [13]. При этом особо следует выделить подход, предполагающий использование тех или иных алгоритмов многоцелевой оптимизации, в том числе, эволюционных алгоритмов, обеспечивающих решение проблемы учета нескольких целевых функций (критериев, показателей качества) при решении различных прикладных задач.

В настоящее время наибольшее развитие получили многоцелевые генетические оптимизационные алгоритмы и многоцелевые алгоритмы клонального отбора, первые прототипы которых появились соответственно в начале 1990-х и 2000-х годов. Разработчики таких алгоритмов применяли различные приемы с целью обеспечения поставленной перед ними задачи. Однако на данный момент времени развитие данных алгоритмов происходит, базируясь на принципах Парето-доминирования. При этом все последние алгоритмические разработки используют те или иные процедуры, обеспечивающие реализацию принципов элитизма решений. Кроме того, большое внимание в этих алгоритмах уделяется вопросам поддержания разнообразия популяции решений.

Многоцелевые алгоритмы клонального отбора менее проработаны и в своем большинстве заимствуют принципы многоцелевой оптимизации, заложенные в генетические алгоритмы. Возможность данного заимствования может быть объяснена многими сходными механизмами реализации эволюционного процесса в генетических алгоритмах и алгоритмах клонального отбора.

По результатам всестороннего анализа возможностей многоцелевых эволюционных оптимизационных алгоритмов, их достоинств и недостатков было принято решение о целесообразности использования идей, заложенных в алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) [10]. Данный алгоритм реализует быструю недоминируемую сортировку решений на основе Парето-доминирования с учетом принципов элитизма, при этом для поддержания разнообразия популяции решений применяет так называемое расстояние скученности [10].

В базовом МАКО принципы элитизма были реализованы изначально, поэтому разработка многоцелевого МАКО велась посредством введения дополнительной процедуры недоминируемой сортировки решений на основе Парето-доминирования. Кроме того, процесс отбора лучших решений для переноса в новое поколение популяции решений осуществлялся с учетом значений расстояния скученности для решений и их рангов.

В контексте реализации МАКО под решением понималась модель прогнозирования, а под целевой функцией – один из показателей качества модели прогнозирования [(1) или (2)].

Следует отметить, что модели (и соответствующие антитела) в процессе реализации многоцелевого МАКО дважды подвергаются процедуре отбора, обеспечивающей поддержание разнообразия в популяции: сначала при выполнении супрессии антител (на основе сходства их кодировок), а затем – при одновременном анализе значений рангов и значений расстояний скученности.

Анализ эффективности применения многоцелевого МАКО при разработке моделей прогнозирования на основе СБД был выполнен с применением ВР, описывающих значения макроэкономических показателей Российской Федерации, взятых с сайта World DataBank за

период с 1999 г. по 2014 г. (<http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx?isshared=true#>). Полученные значения относительных ошибок прогнозирования на 1 – 5 шагов вперед свидетельствуют о том, что предлагаемый подход к отбору моделей прогнозирования на основе СБД, основанный на применении многоцелевого МАКО, является более эффективным как для решения задач краткосрочного прогнозирования (на 1 – 3 шага вперед), так и для решения задач среднесрочного прогнозирования (на 4, 5 шагов вперед). Использование дополнительного показателя качества модели прогнозирования (показателя *Tendency*) позволило осуществить поиск модели прогнозирования в нужном (правильном) направлении. В результате этого для всех рассмотренных ВР за небольшое количество поколений многоцелевого МАКО удалось получить меньшие значения показателя аффинитета *Aff* (1) и в большинстве случаев – ошибок прогнозирования на 1 – 5 шагов вперед.

Работа поддержана грантом РФФИ, номер заявки 16-08-00771.

### Библиографический список

1. Демидова Л.А., Корячко А.В., Скворцова Т.С. Модифицированный алгоритм клонального отбора для анализа временных рядов с короткой длиной актуальной части // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т. 42. № 4.1. С. 131-136.
2. Демидова Л.А. Модели прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью на основе модифицированного алгоритма клонального отбора // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-2. С. 64-71.
3. Астахова Н.Н., Демидова Л.А. Использование почти полных строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора при разработке моделей прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 4-2 (46). С. 89-96.
4. Демидова Л.А. Оценка качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора // Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 2. С. 202-222.
5. Demidova L.A. Time Series Forecasting Models On The Base Of Modified Clonal Selection Algorithm // В сборнике: 2014 International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA) Editor: E. I. Veremey. Санкт-Петербургский государственный университет; IEEE (IEEE Catalog number CFP14BDA-USB). 2014. С. 33-34.
6. Демидова Л.А. Подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора // Бизнес-информатика. 2015. № 1. С. 58-68.
7. Astakhova N.N., Demidova L.A., Nikulchev E.V. Forecasting Of Time Series' Groups With Application Of Fuzzy C-Mean Algorithm // Contemporary Engineering Sciences. 2015. Т. 8. № 35. С. 1659-1677.
8. Astakhova N.N., Demidova L.A., Nikulchev E.V. Forecasting Method For Grouped Time Series With The Use Of K-Means Algorithm // Applied Mathematical Sciences. 2015. Т. 9. № 97. С. 4813-4830.
9. Astakhova N., Demidova L., Konev V. The Description Problem Of The Clusters' Centroids // В сборнике: 2015 International Conference «Stability and Control Processes» in Memory of V.I. Zubov (SCP) 2015. С. 448-451.
10. Deb K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Chichester. UK: Wiley. 2001. pp. 221–232.
11. Deb K., Jain H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based non-dominated sorting approach, Part I: Solving problems with box constraints. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2014. Vol. 18(4). pp. 577-601.

## СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ»

УДК 681.325.5; ГРНТИ 50.09.37

### СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ЧАСТОТНЫМИ ДАТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНОЙ СЕТИ

**К. Бакари, С.В. Челебаев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, mbkaba@mail.ru*

*Аннотация.* Предложена структура системы преобразования частоты в код с использованием частотных датчиков. Обоснован выбор структуры нейросетевого преобразователя частоты в код на основе радиально-базисной сети. Осуществлено ее обучение на реализацию задачи нелинейного преобразования.

*Ключевые слова.* Нейросетевой преобразователь, частота, цифровой код, вторичный преобразователь, радиально-базисная сеть.

### CONVERSION SYSTEM WITH THE FREQUENCY SENSORS ON THE RADIAL-BASED NETWORK BASIS

**K. Bakary, S.V. Chelebaev**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, mbkaba@mail.ru*

*Abstract.* The system structure of frequency conversion to a code with use of the frequency sensors is offered. The choice of neural network structure of the frequency converter in a code on the radial-based network is proved. Its training on implementation of the non-linear conversion task is realized.

*Keywords.* Neural network converter, frequency, digital code, secondary converter, radial-based network.

В настоящее время актуальной задачей является разработка системы преобразования для измерения неэлектрических параметров с использованием частотных датчиков на основе применения технологии искусственных нейронных сетей (ИНС).

Кардинальным направлением повышения точности и универсальности систем преобразования является создание измерительных подсистем, существенно расширяющих возможности системы как средства сбора и обработки данных, характеризующих контролируемые технологические процессы. С появлением схем с программируемой структурой, в том числе программируемых логических (ПЛИС) и аналоговых (ПАИС) интегральных схем, а также систем на кристалле, появились все необходимые предпосылки для дальнейшего улучшения технико-экономических характеристик датчиков уровня, параметры которых могут быть оперативно реконфигурированы на решение новой задачи измерения и контроля.

В качестве возможного эффективного направления построения систем преобразования является применение математического аппарата искусственных нейронных сетей [1, 2].

Радиально-базисные сети применяются в задачах аппроксимации, распознавания, классификации, прогнозирования [3, 4]. В связи с этим является целесообразным построение структур функциональных преобразователей формы представления информации на базе радиально-базисных сетей. Эти сети позволяют совмещать процесс преобразования с вычислением функциональных зависимостей.

Нейрон с радиально-базисной функцией делит пространство входных параметров на две части, в котором разделяющей поверхностью является гиперсфера. Для точек пространства, лежащих внутри гиперсферы, выход нейрона положителен, а для точек, лежащих снаружи гиперсферы, он равен нулю.

С помощью радиально-базисных нейронов легче построить поверхность, обеспечивающую разделение входных параметров на классы [1]. Поэтому в радиально-базисных сетях отсутствует необходимость использования большого числа скрытых слоев. Радиально-базисная сеть имеет один скрытый слой, где синаптические веса нейронов

скрытого слоя равны единице, а нейроны выходного слоя имеют линейные активационные функции.

Работа сети (рисунок 1) описывается зависимостью:

$$u = \sum_{k=1}^n w_k \varphi_k(x),$$

где  $\varphi_k(x) = e^{-\frac{r_k^2}{a_k^2}}$ ,

$x$  – преобразуемая частота следования импульсов;

$w_k$  – вес, связывающий выходной нейрон с  $k$ -м нейроном первого слоя;

$r_k = \sqrt{C_k}$  – радиус  $k$ -го нейрона;

$c_k$  – ширина  $k$ -го нейрона;

$a_k$  – центр  $k$ -го нейрона;

$m$  – число нейронов 1-го слоя;

$u$  – цифровой код вида:

$$y_N^* = \beta_s \beta_{s-1} \dots \beta_1 = \sum_{i=1}^s \beta_i(x) \cdot 2^{i-1},$$

где  $s$  – количество разрядов.

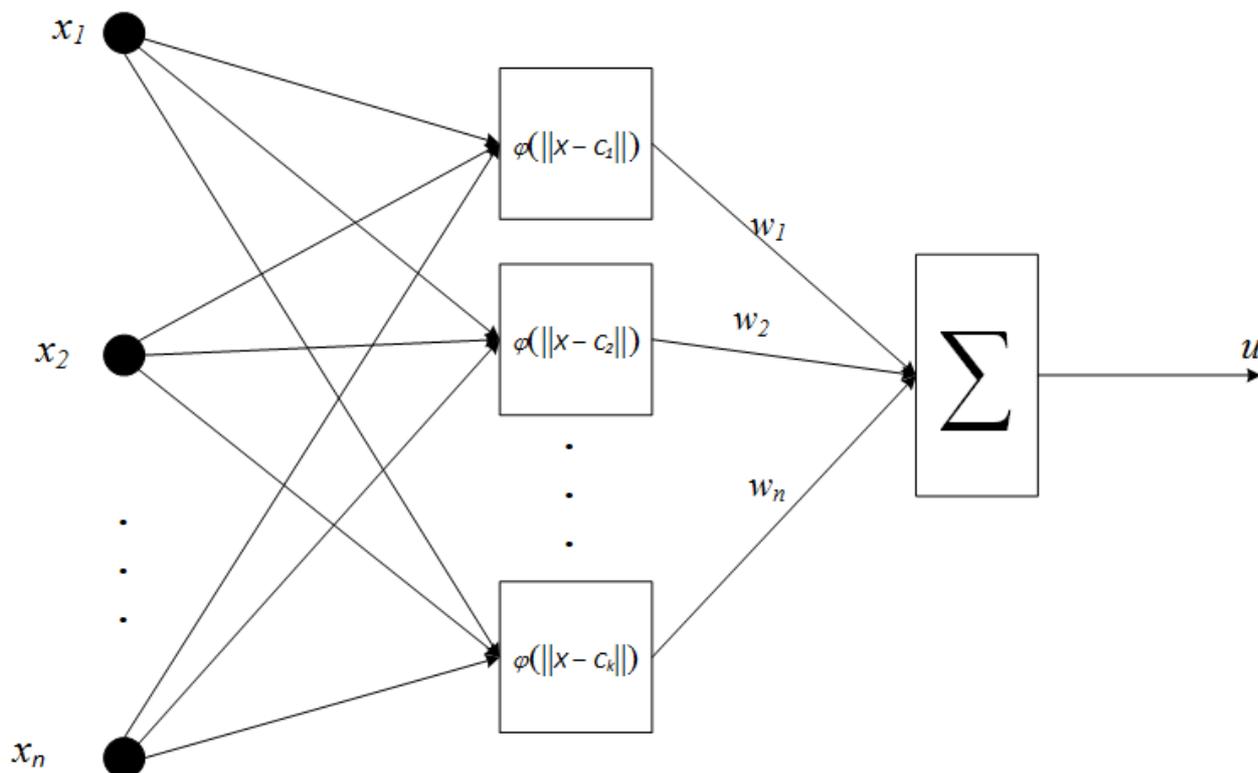


Рис. 1. Преобразователь частоты в код на основе радиально-базисной сети

Разработан алгоритм настройки преобразователя (рисунок 2). Он базируется на алгоритме обучения радиально- базисной нейронной сети.

Весовые коэффициенты  $w_j$  между скрытым и выходным слоями радиально-базисной сети определяются из условия минимума квадратичной ошибки сети [1]:

$$\varepsilon = \sum_{q=1}^Q \left[ \sum_{j=1}^J w_j^{(2)} \varphi(\|X_q - C_j\| - d_q) \right]^2,$$

где  $Q$  – емкость обучающей выборки;

$d_q$  – ожидаемые значения нейрона сети.

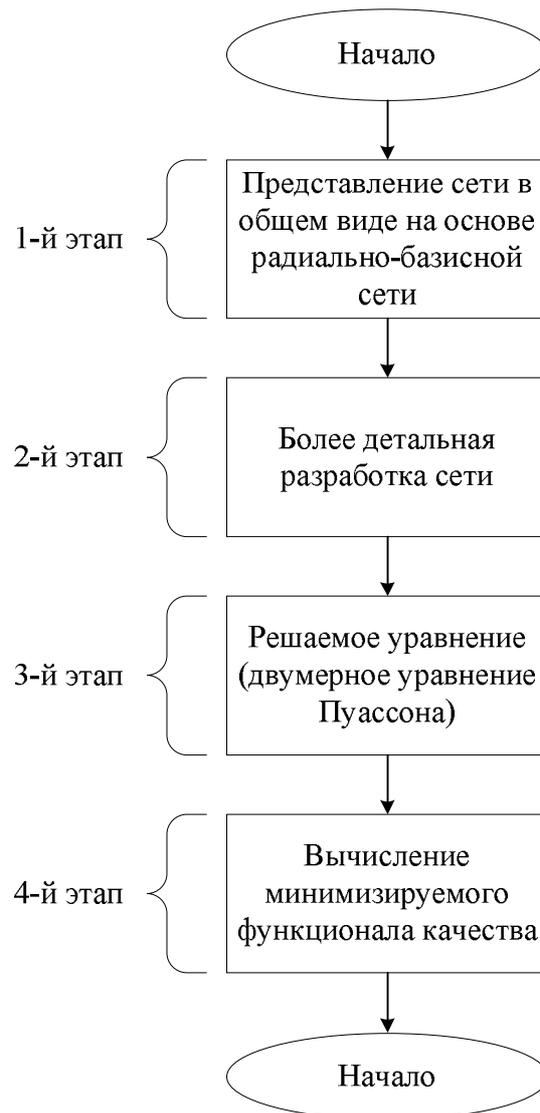


Рис. 2. Алгоритм настройки преобразователя

На основе алгоритма (см. рисунок 2) осуществлено обучение сети преобразователя на реализацию задачи нелинейного преобразования.

Предложенная структура преобразователя частотно-временных параметров сигналов в цифровой код двух позволит понизить погрешность преобразования.

#### Библиографический список

1. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия–Телеком, 2010. – 496 с.
2. Локтюхин В.Н., Челебаев С.В. Нейросетевые преобразователи импульсно-аналоговой информации: организация, синтез, реализация / под общей редакцией А.И. Галушкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 144 с.
3. Болтунов Е.В. Нейросетевой метод расширения динамического диапазона АЦП в системах контроля технического состояния машинного оборудования // Народное хозяйство. Вопросы инновационного развития. 2012. № 5. С. 54-62.
4. Локтюхин В.Н., Челебаев С.В., Антоненко А.В. Алгоритмы настройки перцептронных сетей на преобразование частотно-временных параметров сигналов в код // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2009. № 30. С. 27-35.

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ УГРОЗЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**П.Ю. Мясин**

*Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин»,  
Россия, Пенза, mysinpetr@mail.ru*

*Аннотация.* В статье рассмотрены некоторые информационные угрозы автоматизированных систем управления военного назначения, их жизненный цикл. Рассматриваются элементы и комплексы средств защиты информации, а также альтернативный способ представления уязвимостей программного обеспечения.

*Ключевые слова.* Автоматизированная система управления военного назначения, информационные системы, уязвимость программного обеспечения, системы управления информационной безопасностью центров обработки данных, информационно-управляющая система военного назначения.

## **AUTOMATED CONTROL MILITARY SYSTEMS INFORMATIONAL THREATS**

**P.Y. Myasin**

*Joint stock company "Research and Production Enterprise "RUBIN",  
Russia, Penza, mysinpetr@mail.ru*

*Resume.* This article reviewed some automated control military systems informational threats and their operational lifetime. Informational security facilities elements and complexes, as well as software vulnerability representation alternative method are also examined in this article.

*Key words.* Automated control military system, informational systems, software vulnerability, informational security management system, data processing centre, information management military system.

Эффективная деятельность любых структур военного назначения невозможна без использования современных информационных технологий, что предъявляет ряд требований к обеспечению информационной безопасности.

При использовании современных информационных технологий (ИТ) в автоматизированных системах управления (АСУ) военного назначения, таких, например, как компьютерные сети и базы данных, ценность информации (с точки зрения решения задач ведения боевых действий) увеличивается, поскольку она дает возможность повысить степень осведомленности, улучшить взаимодействие между командованиями различного уровня, органами военного управления и разведки и, тем самым, реализовать свое информационное превосходство [1]. Сравнивая требования информационной безопасности, применяемые в структурах военного назначения стран НАТО, одним из ключевых элементов информационного противоборства является киберкомандования родов вооруженных сил.

Например, комитет начальников штабов вооруженных сил США утвердил документ «Информационные операции», в котором излагались взгляды американского военного руководства на их подготовку и проведение, уточнены цели, задачи, основные принципы информационного противоборства, а также обязанности должностных лиц по подготовке и проведению таких операций в мирное и военное время[2].

Как следовало из документа, информационные операции представляют собой комплекс мероприятий по воздействию на людские и материальные ресурсы противника для того, чтобы затруднить или сделать невозможным принятие верного решения с одновременной защитой своих информационно - коммуникационных сетей и компьютерных систем. Такие операции включали в себя пять основных составляющих:

- радиоэлектронную борьбу (electronic warfare);
- психологические операции (psychological operations);
- операции в информационно - коммуникационных сетях (computer network operations);
- военную дезинформацию (military deception);

Рассмотрим одну из информационных угроз - уязвимость программного обеспечения (ПО). Уязвимость (информационных систем); брешь – свойство информационной системы (ИС), обуславливающее возможность реализации угроз безопасности обрабатываемой в ней информации [3].

В ряде случаев удобно рассматривать уязвимость с точки зрения недетерминированных автоматов[4]; в этом случае под уязвимостью понимают такую последовательность переходов, которая переводит систему из допустимого состояния в недопустимое, преодолевая некий механизм защиты (рисунок 1).

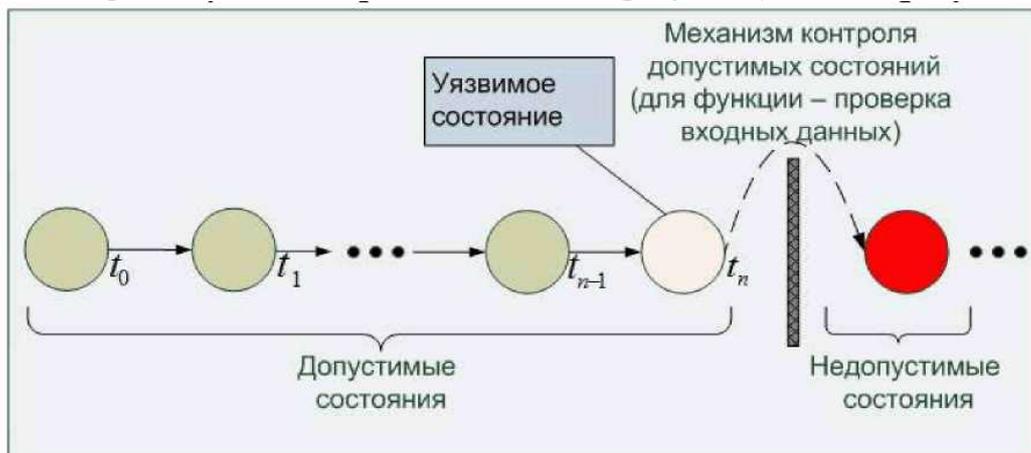


Рис. 1. Представление уязвимостей ПО

Наличие в ИС уязвимостей позволяет злоумышленникам проводить деструктивные воздействия на нее, которые реализуются с помощью эксплоитов определённой последовательности команд целевого процессора, которые используют уязвимость ИС. Процесс применения разработанного эксплойта называют атакой.

Типовой жизненный цикл уязвимости ПО [5] приведен на рисунке 2.

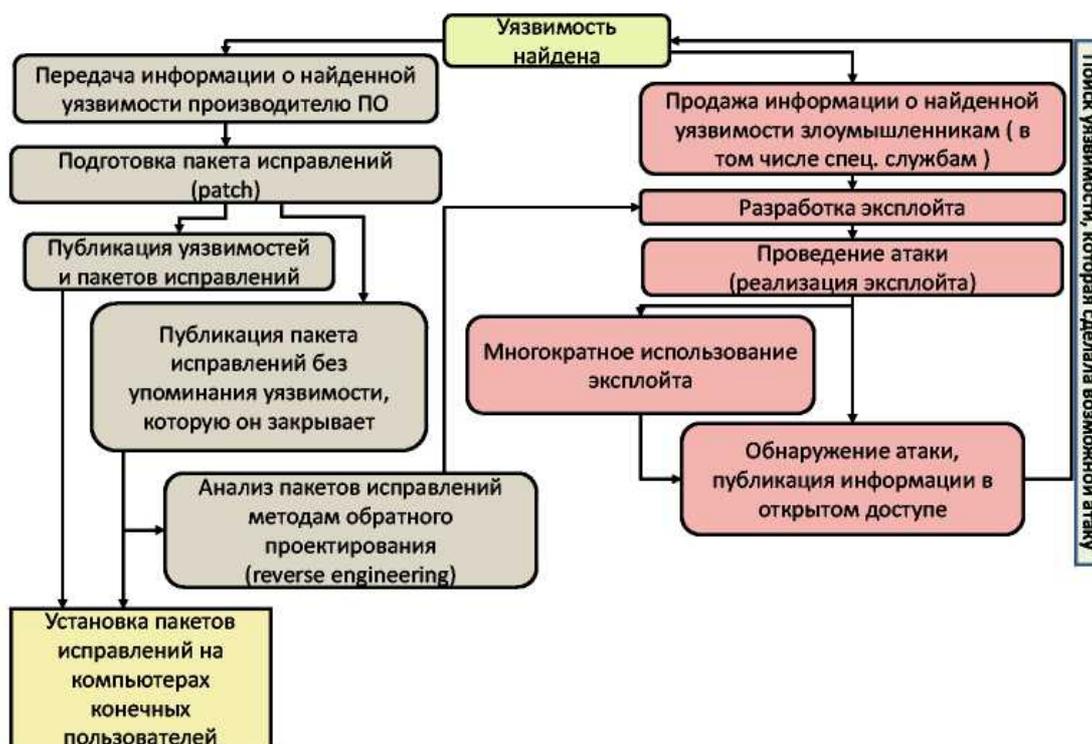


Рис. 2. Типовой жизненный цикл уязвимости ПО

Одним из выходов предотвращения информационных угроз является создание централизованной системы управления военного назначения.

Централизованная система управления военного назначения должна охватывать как унаследованные, хорошо себя зарекомендовавшие в условиях реальной эксплуатации,

технические решения, так и перспективные, разрабатываемые в настоящее время элементы и комплексы средств защиты информации.

В качестве некоторых элементов и комплексов средств защиты информации рассмотрим:

унифицированные аппаратно-программные модули доверенной загрузки с функциями управления по сети информационно-управляющей системы военного назначения (ИУС ВН), обеспечения доверенной виртуализации и контроля отчуждаемых носителей информации;

программно-аппаратные комплексы защиты информации от информационно-технического воздействия;

комплексы защиты информации технологии «тонкий клиент» и средств виртуализации;

высокопроизводительные криптографические средства защиты информации, включая криптографические пулы;

программные комплексы централизованного управления средствами защиты информации взаимодействующих ИУС ВН в рамках одной мультиплатформенной системы управления информационной безопасностью (СУИБ);

средства защиты от НСД к вычислительным ресурсам центров обработки данных (ЦОД) и средства оперативной миграции виртуальных машин и серверов;

автоматизированные средства построения ложных объектов;

средства взаимодействия с несколькими удостоверяющими центрами;

средства централизованной биометрической идентификации и аутентификации.

Современные тенденции развития ИУС ВН требуют при создании АСУ ВН учитывать следующие перспективные направления развития систем комплексной защиты информации[6]:

разработку средств защиты информации распределённых вычислений и услуг ЦОД («облачные вычисления»);

реализацию криптографических сервисов для распределённых вычислений[7];

обеспечение централизованного управления инфраструктурой электронной подписи с учетом построения доверенного пространства многоуровневой системы удостоверяющих центров;

реализацию технологии интеграции АС, основанной на интеграции сервисов с предоставлением возможностей виртуализации выносных рабочих мест, серверных компонентов и электронного документооборота, включающего обработку потоков документов, заданий, индексацию и поиск информации (Интеграционный комплекс информационно-сетевых сервисов (ИКИСС));

реализацию автоматизированных средств (сервисов) оценки эффективности защиты взаимодействующих ИУС ВН;

защиту информации, обрабатываемой средствами виртуализации, в том числе с использованием виртуальных средств организации взаимодействия между сегментами АСУ (виртуальная сетевая инфраструктура, рабочие места и вычислительные комплексы);

централизованное управление персональными биометрическими данными для доступа к ресурсам АС, а также на объекты охраны;

реализацию возможностей централизованного управления гетерогенными СЗИ взаимодействующих ИУС ВН в рамках единой СУИБ;

построение системы компетенций СЗИ и системы взаимного доверия сервисов взаимодействующих ИУС ВН;

криптографическую защиту информации при передаче по беспроводным каналам связи, включая мобильные устройства и оконечные исполнительные устройства;

внедрение перспективных средств идентификации абонентов и носителей ключевой информации и др.

Таким образом, только на основе реализации комплексного подхода в обеспечении отражения информационных угроз на основе перечисленных технологий и механизмов

защиты может быть достигнут требуемый высокий уровень информационной безопасности, надежности и функциональной устойчивости АСУ ВН в условиях современного информационного противоборства.

### **Библиографический список**

1. Зубарев И.В., Жидков И.В., Кадушкин И.В. Кибер безопасность автоматизированных системы управления военного назначения// Вопросы кибербезопасности. 2013. №1.
2. Information Operations Primer: Fundamentals of Information Operations. U.S. Army War College, 2011. 204 p.
3. ГОСТР 50922-2006 «Защита информации. Основные термины и определения».
4. Вашкевич Н.П. Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки (гриф УМО). - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 280 с.
5. Марков А. С., Фадич А.А. Систематика уязвимостей и дефектов безопасности программных ресурсов//Защита информации. INSIDE. №3. 2013 г.
6. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Бутусов И.В. Предложения в межведомственную концепцию создания доверенной аппаратно программной среды для автоматизированных систем органов управления // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 3. № 2. С. 15 22.
7. Бородакий Ю.В., Добродеев А.Ю., Свиридюк Ю.П., Нащёкин П.А. Основные задачи и проблемы создания криптографической подсистемы защиты распределённых автоматизированных систем управления и связи специального назначения // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2005. № 4. С. 176-178.

УДК 004.9; ГРНТИ 20.53.17

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЯЦИОННЫХ И ОБЪЕКТНЫХ СУБД В ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

**А.А. Кашицына**

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н. Г. Столетовых,  
Россия, Владимир, oid@vlsu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки программного обеспечения для хранения и обработки данными разных типов. Рассматривается возможность эффективного использования различных моделей СУБД в функциональном проектировании и в процессе эксплуатации программного обеспечения.

*Ключевые слова.* Реляционные СУБД, объектные СУБД, функциональное проектирование, программное обеспечение, базы данных.

## **RESEARCH EFFICIENCY RELATIONAL AND OBJECT DATABASE IN FUNCTIONAL DESIGN SOFTWARE**

**A.A. Kashitsyna**

*Vladimir State University after Alexander G. and Nicholas G. Stoletovs,  
Vladimir, Russia, oid@vlsu.ru*

*Abstract.* The theoretical and practical aspects of the development of soft ware cookies to store and process data of different types. The possibility of the effective use of various database models in a functional design and in-service software.

*Keywords.* Relational databases , object databases , functional design , software , databases.

Для разработки программного обеспечения (ПО), используемого при работе с базами данных, важно обеспечить требуемую скорость обработки данных, а также доступность данных для работы. Под доступностью понимается возможность получать данные из базы данных с определенными параметрами выбора.

Современные системы хранения данных и системы управления базами данных наиболее широко представлены двумя основными моделями. Объектная база данных (БД) и система управления базой данных (СУБД) представляют собой хранения данных в виде объекта, аналогичного объекту реального мира. Реляционная БД и СУБД представляют собой таблицы, в которых данные хранятся в соответствии с основными законами реляционной алгебры.

В информационных системах хранения используются обе приведенные выше модели. Реляционные базы данных наиболее известны и широко представлены на рынке. По данным исследований компании IDC за 2009 использование не реляционных БД составляет 7% от

общего числа крупных проектов, использующих СУБД для разработки информационных систем.

При работе с объектно-ориентированными языками программирования, такими как C++, C#, Java, F#, Python и т.д., разработка и администрирование программного обеспечения, использующего в своей работе реляционные СУБД (РСУБД), требует использования дополнительных компонентов для осуществления объектно-реляционных преобразований. Что требует привлечения дополнительных ресурсов компьютера и может повлечь увеличение времени работы программы. Такой подход нельзя считать оптимальным.

При проектировании программных комплексов для работы с данными достаточно сложно грамотно выбрать модель БД. Это связано, в первую очередь, с отсутствием чётких критериев оценки эффективности работы информационной системы с БД разных типов.

Определение критериев и выявление их значений в процессе проведения эксперимента позволяет дать необходимые рекомендации по возможности и необходимости использования реляционной или объектной модели данных. А также позволяет выявить ограничения при различных режимах работы программного обеспечения с БД.

Для оценки эффективности используются следующие основные критерии:

- объем кода;
- сложность модели данных;
- масштабируемость;
- возможность изменять логику в режиме реального времени;
- описание процессов и бизнес-правил;
- кэширование (на стороне Application-сервера);
- перенесение части нагрузки на сервер БД;
- денормализация.

Исследование проводится на БД Northwind, предоставляемой компанией Microsoft в комплекте с ранними версиями SQL Server, как тестовая база данных. Для проведения эксперимента необходимо изменить структуру имеющейся модели, написанной на SQL и имеющую реляционную структуру, представить в виде объектной модели. Преобразование моделей выполняются при помощи библиотеки EntityFramework для .Net.

Тестовая база представляет возможность работы с данными разных типов. Целочисленные данные, строки, символы, изображения (представленные в растровом виде) и прочие. Структура содержит связи и различные ограничения, что позволяет наиболее полно рассмотреть все возможные варианты работы с разнородными данными.

Диаграмма базы данных в реляционном виде представлена на рис. 1

Вышеперечисленные критерии оценки следует разделить на 2 категории. Это исчисляемые, которые можно измерить в процессе работы, и не исчисляемые, которым можно лишь дать оценку. Рассмотрим оценочные критерии.

С точки зрения удобства работы и объёму кода при написании запросов лидирует объектно-ориентированная СУБД (ОСУБД). Она содержит меньший объём кода по сравнению с РСУБД, при записи в ООБД и РБД соответственно. При перекрёстной записи, т.е. при использовании объектно-реляционных преобразований количество вспомогательного кода возрастает. С точки зрения сложности организации модели данных РБД формально следует считать более простой. Так как она чётко структурирована. Однако структура ООБД, несмотря на отсутствие чёткого структурирования, имеет более привычную человеческому восприятию организацию. Ввиду этого структуру объектной БД, с точки зрения автора, следует считать более простой. Масштабируемость – это способность увеличивать производительность пропорционально дополняемым ресурсам. Как правило, масштабируемость информационной системы рассматривается при увеличении количества аппаратных средств. В данном случае серверов база данных. В этом случае, по множествам исследований, обе БД являются масштабируемыми. Простота масштабируемости ООБД обуславливается слабой структурированностью данных и свободной семантикой их организации. Способом организации структуры является метод ключ-значение (key-value

store). РБД также являются масштабируемыми и при необходимости увеличения нагрузки позволяют добавить в систему несколько серверов. В Facebook используется MySQL РБД и поддержка масштабируемости выполняется вполне успешно. ООБД благодаря своей структуре позволяет добиться масштабируемости значительно быстрее и проще. Следовательно, с точки зрения масштабируемости обе БД, по мнению автора, являются эквивалентными. Логику структуры БД также возможно изменять в обоих моделях БД в режиме реального времени, но только для ОБД это доступно лишь при соблюдении ряда ограничений. К ним относятся соответствие вносимых изменений требованию базы. Так же при необходимости следует снять ряд ограничений, накладываемых на таблицы. Приложения для реляционных и нереляционных систем по возможности конфигурирования практически идентичны. Организация хранения в нереляционной данных может значительно снижать эффективность поиска объекта при организации поиска по описанию кода объекта. Чего не наблюдается в реляционной модели. Это происходит ввиду возможности повторного использования функциональности системы. То есть после выгрузки данных в оперативную память запросы с повторным использованием выполняются быстро и эффективно. Кэширование реляционных систем ведется в разы эффективнее объектных моделей.

Рациональная, интуитивно понятная система хранения в нереляционных моделях, позволяет значительно ускорить процесс написания (формирования) запросов к БД, сократить время описания модели и тем самым обеспечивают удобство работы с данными. Такая организация системы запросов позволяет распределить множественные запросы внутри распределенной системы БД таким образом, чтобы не допустить её «краха». Описания бизнес логики, GIS систем, систем прогнозирования экономических рисков и других ресурсоёмких приложений позволяет считать ООБД перспективными в применении в описанных отраслях.

При построении баз данных используют следующие основные подходы распределения вычислительной нагрузки системы: сервер-центрированная, клиент-центрированная и балансированная клиент-серверная архитектуры, балансированная клиент-серверная архитектура подразумевает, что часть вычислительных затрат по хранению, выборке и некоторой обработке берет на себя сервер, а часть - клиент. Такая архитектура и применяется в ОСУБД, где клиент помимо отображения данных и формирования запросов контролирует построение и отображение объектов, внедренных объектов, массивов внедренных объектов и др. На сервер ОСУБД, в отличие от сервера РСУБД, при этом не возлагается обязанность по "разнесению" данных на различные таблицы, а ограничивается только необходимостью сохранения их в хранилище. При этом, если клиент задает запрос на условную выборку данных, разбором объектов (их индексов) уже занимается сервер ОСУБД [1]. При использовании РБД часть нагрузки переносится на сервер БД, что снимает нагрузку с компьютера пользователя, позволяя ему выполнять другую работу и уменьшая требования, предъявляемые к мощности компьютера [2]. Таким образом, перенос нагрузки на сервер выполняется в обоих моделях БД.

В РБД традиционно поддерживается концепция нормализации данных и денормализация ей не свойственна. В то время как в ООБД денормализация является скорее плюсом чем минусом, ввиду применяемых способов обработки.

Исследования и сравнения времени работы проводились с использованием процессора Intel® Core™ i5-3210M CPU 2.50 ГГц, 4ГБ ОЗУ. Для исключения дополнительных шумов были по максимуму отключены все возможные дополнительные процессы, которые в процессе работы могли бы помешать получению достоверных данных. В результате работы тестовой программы были измерены следующие данные. Время чтения и запись данных в ООБД и РБД в приведенной выше организованной структуре БД. Размер тестовых значений 10, 100, 1000, 10000, 100000 записей. Запись представляет из себя строку таблицы в РБД или объект в ООБД. Результаты тестирования трёх тестовых запусков сведены в таблицу 1. Данные в таблице 1 приведены в секундах.

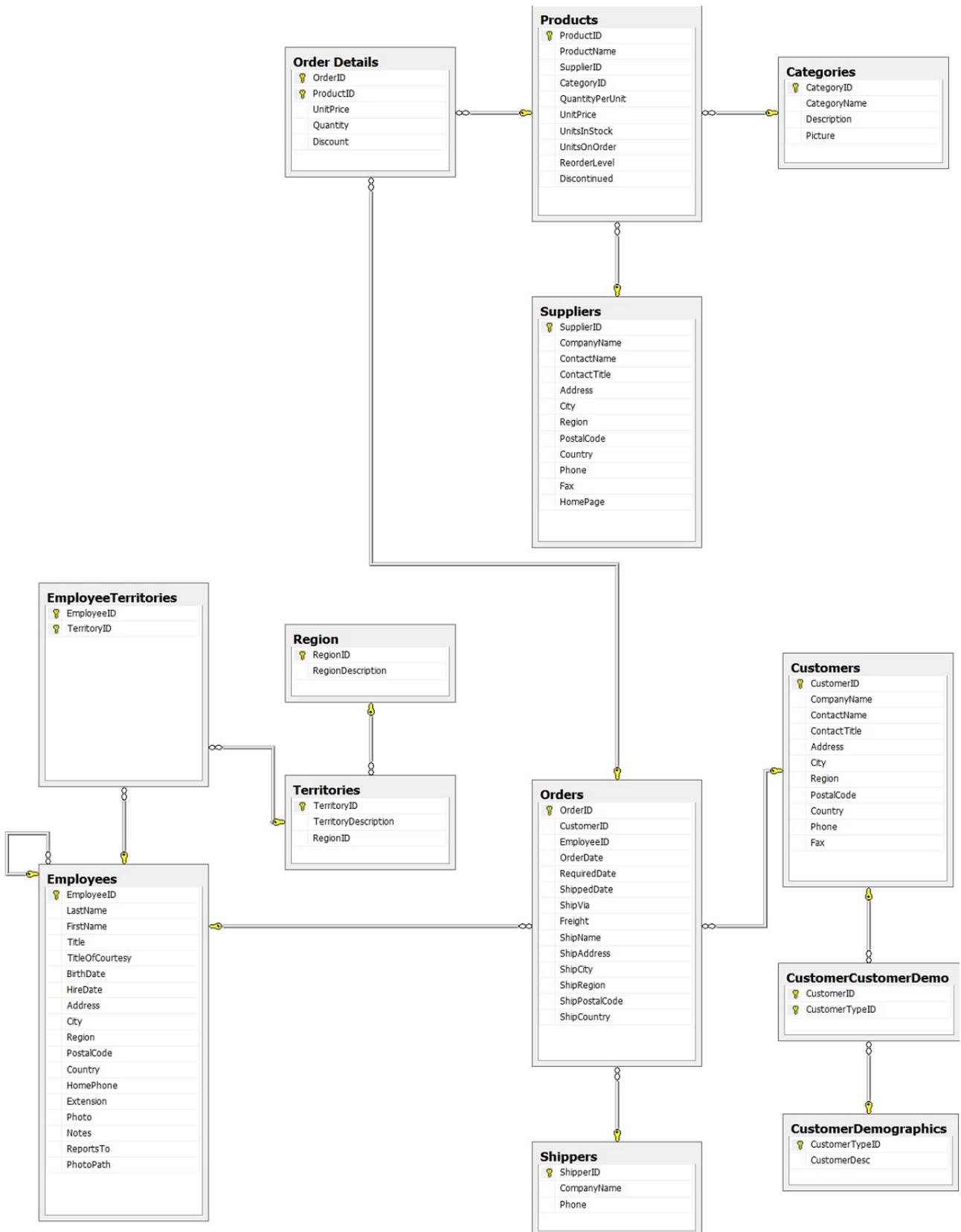


Рис. 1. Диаграмма тестовой базы данных

Программа написана на языке C#. Используется ООБД - db4o, распространяемая под свободной лицензией, РБД – Microsoft SQL Server 2005. Генерация объектов производится программным образом при помощи генерации случайных значений, соответствующих выбранным типам данных. Работа с объектной базой ведется при помощи стандартных средств db4o. Работа с Microsoft SQL Server 2005 ведется из приложения, написанного на

языке C# с применением объектно-реляционных преобразований (ORM) библиотеки Entity Framework .Net и LINQ (Language-Integrated Query).

По результатам экспериментов видно, что ООБД выигрывает по скорости чтения данных начиная со значения 1000 записей. Причём выигрыш значительный, в сравнении со скоростью чтения с РБД. По скорости записи данных ООБД выигрывает при всех тестовых значениях.

Таким образом, исследование подтверждает эффективность использования ООБД для работы с информационными системами при функциональном проектировании программного обеспечения. По большинству критериев оценки эффективности ОСУБД выигрывает у РСУБД.

Разработанная программа обеспечивает решение следующих задач: генерация данных для заполнения объектной и реляционной баз данных; редактирование исходных данных, занесенных в таблицы РБД и ООБД; организацию записи сгенерированных данных; организацию чтения всех данных из БД; организацию выборки данных из БД; возможность измерения времени чтения и записи данных в РБД и ООБД; возможность измерения времени генерации данных для записи; возможность измерения времени объектно-реляционных преобразований .

Таблица 1– Результаты тестирования по времени выполнения

Номер эксперимента	Параметр измерения времени, с	Количество записей в базе данных, шт			
		10	100	1000	10000
1	Чтение ООБД	0.211	0.348	0.578	3,215
	Чтение РБД	0.027	0.128	9.672	823,480
	Запись ООБД	0.179	0.215	0.653	5,281
	Запись РБД	0.343	1.626	25.442	986,238
2	Чтение ООБД	0.227	0.278	0.490	2,910
	Чтение РБД	0.033	0.135	11.186	806,024
	Запись ООБД	0.179	0.210	0.763	5,371
	Запись РБД	0.199	1.581	26.100	943,650
3	Чтение ООБД	0.214	0.239	0.485	3,519
	Чтение РБД	0.038	0.129	8.348	856,231
	Запись ООБД	0.168	0.197	0.715	5,516
	Запись РБД	0.244	1.571	33.011	1005,685

Программное обеспечение в настоящее время отрабатывается на генерируемых данных в процессе выполнения и данных уже сгенерированных и хранящихся в базах. В дальнейшем предполагается расширение исследований в направлении увеличения количества обрабатываемой информации, скорости обработки данных и проведение экспериментов на более мощном оборудовании, а также с использованием большего числа узлов обработки данных. Так же будут продолжены эксперименты с измерением времени работы с данными всех типов в отдельности.

По проведенным исследованиям использования ООБД, по мнению автора, является обоснованным и эффективным для решения широкого круга задач.

### Библиографический список

1. Андреев А.М., Березкин Д.В., Самарев Р.С. Внутренняя организация ОСУБД на примере Versant, Poet, ODB-Jupiter. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.inteltec.ru/publish/articles/objtech/cordb.shtml> (дата обращения 24.01.2015).
2. Современные компьютерные системы. Сервер баз данных [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sks-vpn.com/?q=node/27> (дата обращения 24.02.2015).

## МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА В LINUX

Ю.М. Кузьмин, А.С. Рыжиков

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, kuzmin\_yurii@mail.ru*

*Аннотация.* В работе рассмотрены механизмы разграничения доступа к данным, применяемые в операционных системах семейства Linux. Указаны основные принципы и сценарии использования этих механизмов, соответствующие модели разграничения доступа.

*Ключевые слова.* Несанкционированный доступ, защита информации, разграничение доступа, Linux.

### PROTECTION FROM UNAUTHORIZED ACCESS LINUX SYSTEM

J.M. Kuzmin, A.S. Ryzhikov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, , kuzmin\_yurii@mail.ru*

*Abstract.* The paper discusses the mechanisms of differentiation of access to the data used in the Linux operating system. Shown basic principles and scenario uses of these mechanisms, appropriate access control model.

*Keywords.* Unauthorized access, information security, access control, Linux.

Защита информации от НСД является одним из основных аспектов защиты информации, поэтому в большинство операционных систем и популярных пакетов программ встроены различные подсистемы защиты от НСД. Все средства защиты от НСД представляют собой механизм контроля доступа субъектов к защищаемым объектам (ресурсам) системы. В работе проведен обзор некоторых наиболее универсальных механизмов защиты от НСД, применяемых в ОС Linux.

– POSIX ACL – POSIX-совместимая реализация концепции разграничения прав доступа к объектам файловой системы на основе их атрибутов. Система (в частности, менеджер файловой системы) считывает атрибуты файла, к которому обращается пользователь (или программа, работающая от имени какого-либо пользователя), и решает предоставлять ли доступ на основе этих атрибутов. При ошибке доступа вызывающей стороне возвращается соответствующий код ошибки.

– sudo – гибкий инструмент, позволяющий настроить права на выполнения административных действий для каждого пользователя отдельно. При вызове команды sudo система получает профиль пользователя из файла /etc/sudoers, и на его основе определяет, какие команды может вызывать пользователь. Так, например, можно разрешать выполнять только определенные команды и только от определенного пользователя. Возможна установка прав для групп пользователей.

– chroot – утилита, ограничивающая доступ процесса к файловой системе путем изменения её корня в контексте процесса. Механизм работы: запускает программу (по умолчанию /bin/sh) с контекстом, в котором переопределен корневым каталог файловой системы. Теперь все обращения вызванной программы не могут выйти за пределы корневого каталога (т.е. программа работает в весьма условной «песочнице»).

– PAM – это набор API для аутентификации пользователей. Механизм PAM объединяет множество низкоуровневых схем аутентификации в API высокого уровня, позволяющий создавать приложения, использующие аутентификацию независимо от применяемой схемы аутентификации. Программы, написанные с использованием PAM, обращаются к его библиотеке, которая уже собственно проводит процедуру аутентификации пользователя. PostgreSQL, Apache, Squid и другие программы (включая написанные вами) могут работать с учетными записями пользователей не через собственные конфигурационные файлы, а обращаться к PAM, тем самым обеспечивая различные варианты аутентификации — Kerberos, eTokens, биометрия и др.

– В SELinux права доступа определяются самой системой при помощи специально определенных политик. Политики работают на уровне системных вызовов и применяются

самим ядром (существует возможность реализовать их и на уровне приложения). Для проверки прав доступа используется LSM-модуль ядра, который проверяет политику безопасности приложения и сверяет его тип с контекстом безопасности используемых файлов (объектов). При ошибке доступа соответствующая запись добавляется в /var/log/audit/audit.log. Пользователь может получить нотификацию об этом через утилиту settroubleshoot.

– AppArmor - система упреждающей защиты, основанная на политиках безопасности (профилях). При запуске приложения система проверяет наличие его профиля. Если профиль существует, полномочия приложения ограничиваются в соответствии с ним. Для проверки прав доступа используется LSM-модуль ядра, который при запуске приложения проверяет наличие его профиля (/etc/apparmor.d), и если профиль существует, то ограничивает выполнение системных вызовов в соответствии с профилем. При ошибке доступа соответствующая запись добавляется в /var/log/audit/audit.log. Пользователь может получить нотификацию об этом через утилиту apparmor-notify. Пример использования: с помощью команды aa-genprof можно создать профиль интересующего приложения, отработав в нем все необходимые use-case-ы. Далее полученный файл профиля можно модифицировать интересующим вас образом, сохранить в /etc/apparmor.d и активировать через aa-enforce.

– PolicyKit является специальной инфраструктурой для приложений, выступающей в качестве посредника между непривилегированными пользователями и привилегированным системным контекстом. При обращении приложения к сервису (любое обращение проходит как action), PolicyKit проверяет права доступа пользователя для данного action-a. В зависимости от политик доступ может быть запрещен, разрешен или требовать аутентификации. Отображение ошибок (или запрос пароля) должно на себя брать клиентское приложение.

Основные характеристики рассмотренных в работе механизмов защиты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики механизмов защиты

Название механизма защиты	Уровень интеграции	Модель разграничения доступа
POSIX ACL	Встроен в ядро системы	Дискреционная
sudo	Отдельный пакет	Дискреционная, мандатная
chroot	Отдельный пакет	Механизм песочницы
PAM	Отдельные пакеты	Аутентификация
SELinux	Встроен в ядро системы	Мандатная
AppArmor	Отдельный пакет, может быть встроен в ядро	Мандатная
PolicyKit	Встроен в ядро системы	Мандатная

### Библиографический список

1. Бэнди Д. Защита и безопасность в сетях Linux. Для профессионалов. – М.: Питер, 2003. – 623 с.
2. Скотт М. Безопасность Linux. Руководство администратора по системе защиты с открытым исходным кодом. – М.: Вильямс, 2003. – 624 с.
3. Питер С. Оптимизация и защита Linux-сервера своими руками. – Киев: Наука и техника, 2006. – 576с.

## **ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЛОКИРОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ АНАЛОГОВЫХ И ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЦИФРОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА**

**А.А. Панченко**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, spac@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматривается способ контроля эффективности работы генератора электромагнитного шума и выявления возможной утечки информации за счет электромагнитных излучений для аналоговых и цифровых радиосигналов.

*Ключевые слова.* Мониторинг, генератор шума, контроль эффективности, электромагнитные излучения, утечка информации.

## **ESTIMATING THE EFFICIENCY OF THE ELECTROMAGNETIC NOISE GENERATOR FOR BLOCKING NARROWBAND ANALOG AND WIDEBAND DIGITAL EMANATIONS**

**A.A. Panchenko**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, spac@mail.ru*

*Abstract.* Detection of presence of potentially malicious electromagnetic emanations, estimation of the efficiency of the electromagnetic noise generator which is used to block such emissions.

*Keywords.* Monitoring, noise generator, masking efficiency, analog and digital emanations.

Компьютерные сети современных предприятий, в которых обрабатывается конфиденциальная информация, имеющая реальную коммерческую ценность, являются потенциальной мишенью для злоумышленников. В случае если такая сеть подключена к другим сетям, в частности, к сети Интернет, что часто требуется для эффективной работы, проникновение в такую сеть и организация утечки информации из нее в наши дни является лишь вопросом времени при соответствующей квалификации злоумышленника. Естественным решением в таком случае становится полное отключение от всех сетей и создание изолированной системы (так называемый «воздушный зазор», англ. air gap). Однако даже такой радикальный способ не является гарантией полного предотвращения возможности утечки информации.

В 2014 году на 9-й международной конференции IEEE MALCON 2014 исследователи из израильского университета имени Бен-Гуриона показали работающий комплекс программ, позволяющих в типовых условиях получить информацию из изолированной компьютерной системы с использованием побочных электромагнитных излучений (ПЭМИ), генерируемых различными типами видеоинтерфейсов [1]. Источником излучений служили широко используемые сейчас интерфейсы VGA, DVI и HDMI, а в качестве приемника применялся штатный приемник FM-радио из состава смартфона.

Проникновение специально созданной вредоносной программы, выполняющей генерацию требуемых ПЭМИ, в изолированную систему осуществляется со съемных носителей информации (USB Flash накопители) с использованием вновь выявленных уязвимостей операционной системы (ОС) и иного программного обеспечения (ПО). Несмотря на то, что этот способ является сложным, его успешная реализация все же возможна (примерами являются программы семейства StuxNet, проникшие в сети промышленных объектов Ирана и России, а также их последователи). Заражение смартфона, практически всегда имеющего подключение к Интернет, выполнить гораздо проще.

Для блокирования возможности утечки информации за счет ПЭМИ на объектах информатизации (ОИ) применяются широкополосные генераторы электромагнитного шума (ГШ), маскирующие радиосигналы от средств вычислительной техники. Такие ГШ являются сложными устройствами, работающими в продолжительном или даже круглосуточном режиме, и вследствие изменения условий окружающей среды, а также неизбежного «старения» электронных компонентов, параметры генерируемого шумового сигнала могут

выходить за допустимые пределы, что создает условия для приема ПЭМИ злоумышленником.

Для оценки эффективности блокирования ПЭМИ с помощью ГШ создается программно-определяемая радиосистема (ПОР, англ. Software Defined Radio, SDR), состоящая из аппаратного модуля, представляющего собой ТВ-тюнер стоимостью менее \$12 на основе чипа RTL2832U с радиомодулем Rafael Micro R820T, внешний вид и внутреннее устройство которого представлены на рис. 1, и программной компоненты, разработанной с использованием свободно распространяемого ПО с открытым исходным кодом.

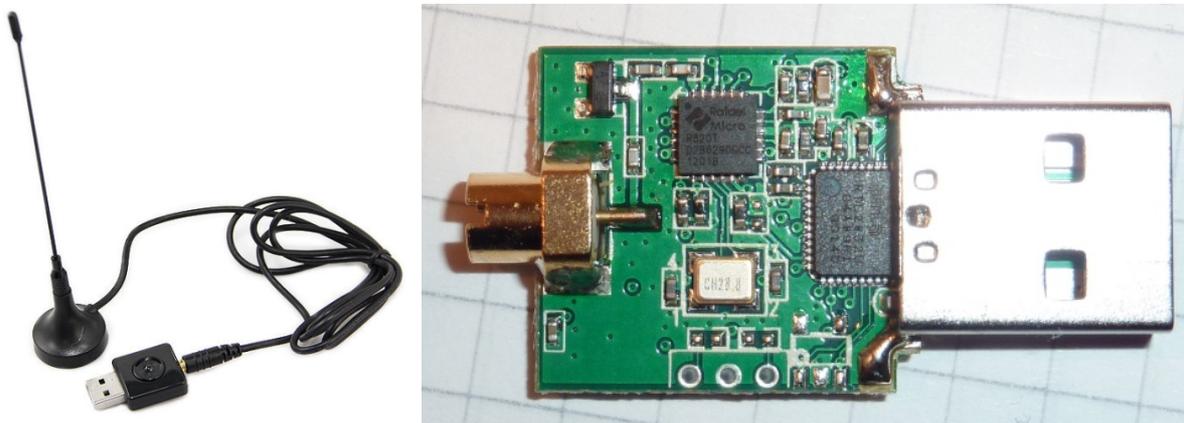


Рис. 1. Внешний вид и внутреннее устройство ТВ-тюнера на основе чипа RTL2832U с радиомодулем Rafael Micro R820T

Программная компонента разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) создана с использованием следующего свободно распространяемого ПО с открытым исходным кодом:

- ОС Arch Linux (64-х разрядная);
- интегрированная среда разработки QT Creator 3.4 совместно с библиотекой QT 5.4;
- компилятор C++ из состава GCC 4.8;
- библиотека поддержки работы с ТВ-тюнером rtl-sdr версии 0.5.3;
- библиотека быстрого преобразования Фурье FFTW версии 3;
- библиотека отображения технической графики Qwt версии 6.1.2.

Для заданной несущей (центральной) частоты радиомодуля  $f_0$ , которая может находиться в диапазоне от 24 МГц до 1766 МГц, ТВ-тюнер выдает сэмплы в виде синфазной  $I(t)$  и квадратурной  $Q(t)$  составляющих с максимальной частотой дискретизации  $F_{АЦП}$  до 2,4 МГц [2]. После выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) с числом точек  $N$  от 256 до 4096 формируется участок спектра в диапазоне частот

$$\left[ f_0 - \frac{F_{АЦП}}{2}, f_0 + \frac{F_{АЦП}}{2} \right]$$

с разрешающей способностью

$$\Delta f = \frac{F_{АЦП}}{N}.$$

На каждой частоте  $f_0$  выполняется серия из  $M$  циклов захвата по  $N$  сэмплов в каждом. В результате для каждой частотной компоненты спектра формируется выборка из  $M$  значений амплитуды  $A_i, i = \overline{1, M}$ .

Для каждой полученной выборки определяются значения выборочного среднего  $\bar{A}$  и выборочной дисперсии  $S^2$  в соответствии с выражениями

$$\bar{A} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_i, \quad S^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (A_i - \bar{A})^2.$$

При увеличении объема выборки выборочное среднее стремится к значению математического ожидания  $\mu$ , а выборочная дисперсия – к значению дисперсии  $\sigma^2$

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \bar{A} = \mu \quad \lim_{M \rightarrow \infty} S^2 = \sigma^2,$$

и эти значения используются для построения теоретической функции плотности распределения амплитуд сигнала для нормального закона

$$f(A) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

Для каждой частотной компоненты разработанный АПК производит анализ как амплитуды сигнала, так и соответствия распределения амплитуд сигнала нормальному закону распределения, характерному для идеального шумового сигнала [3].

Окно программы, отображающее графики, полученные с помощью разработанного АПК, при анализе участка спектра в диапазоне частот от 94 МГц до 98 МГц при выключенном ГШ представлено на рис. 2 слева, а при работающем ГШ – на рис. 2 справа.

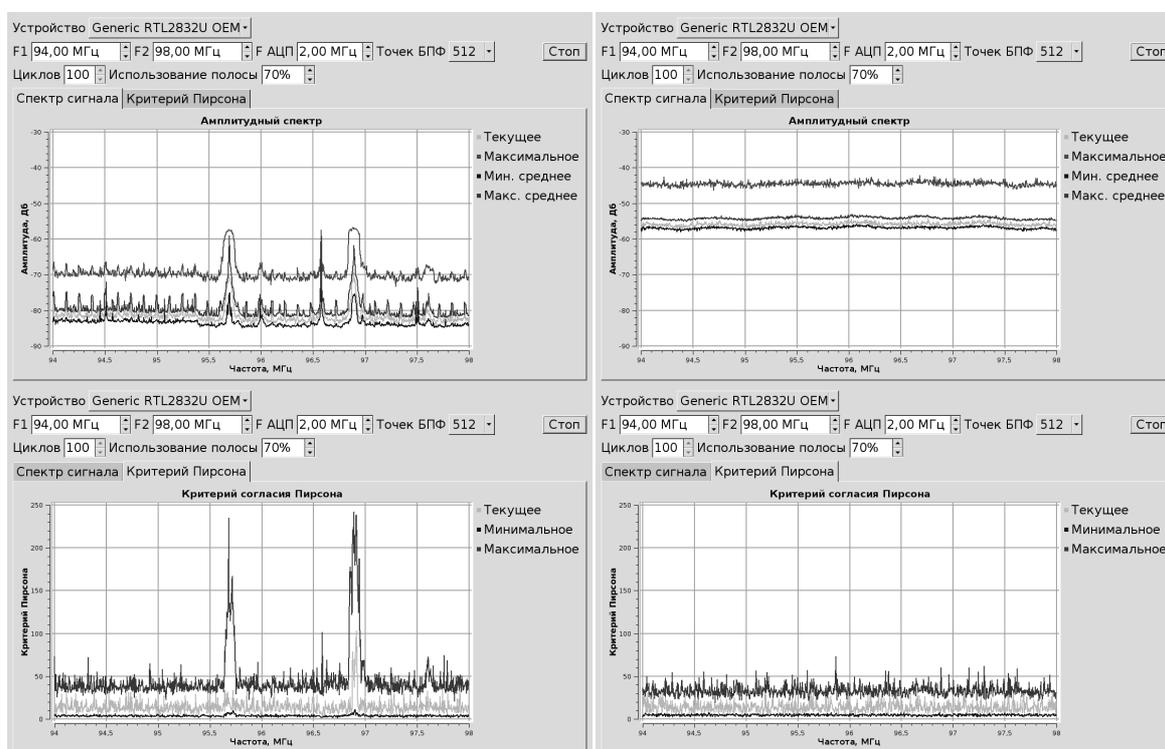


Рис. 2. Анализ диапазона частот от 94 МГц до 98 МГц при выключенном ГШ (слева) и работающем ГШ (справа)

В случае если амплитуда сигнала для каждой из частотных компонент при работающем ГШ становится выше соответствующей амплитуды при выключенном ГШ (рис. 2 сверху), и значение статистического критерия согласия Пирсона (рис. 2 снизу), определяющего степень соответствия распределения амплитуд сигнала нормальному закону, не превышает некоторого значения для всех частотных компонент при работающем ГШ, делается вывод о том, что шумовой сигнал превалирует во всем анализируемом диапазоне частот и ГШ эффективно выполняет маскирование сигнала ПЭМИ.

Рассмотренный выше способ выявления наличия возможной утечки информации за счет электромагнитных излучений из изолированной компьютерной системы хорошо работает для случая простых (аналоговых) видов модуляции радиосигнала, в том числе создаваемых способами, представленными в [1].

Однако возможно внедренные на объект специально созданные устройства негласного съема информации (закладочные устройства) могут реализовывать более сложные цифровые виды модуляции сигнала, спектр которых является достаточно

равномерным на протяжении всего используемого частотного диапазона. Сам радиосигнал в этом случае обычно является шумоподобным, что делает невозможным его выявление на основе ранее рассмотренного вычисления несоответствия распределения амплитуд сигнала нормальному закону.

На рис. 3 сверху представлен спектр подобного сигнала, присутствующего в диапазоне частот 646-654 МГц, а снизу на том же рисунке приведены соответствующие значения критерия согласия Пирсона для того же диапазона частот.

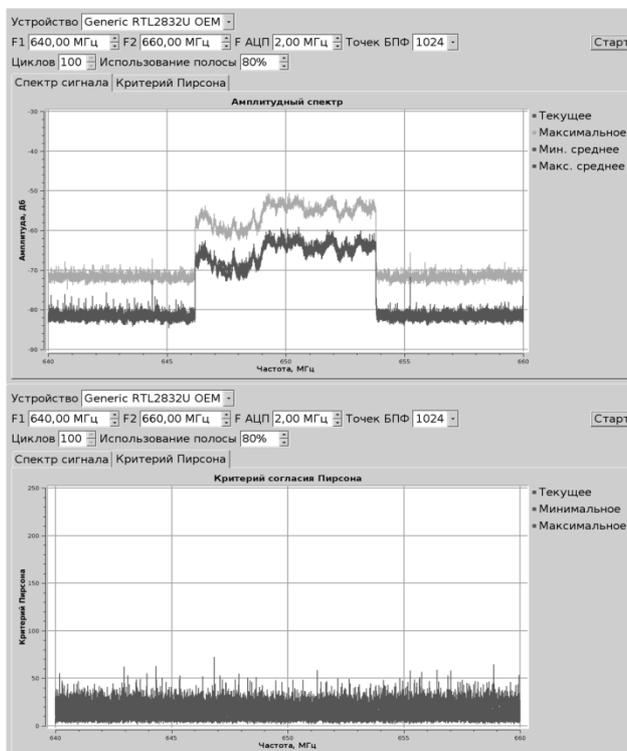


Рис. 3. Результаты анализа диапазона частот от 640 МГц до 660 МГц при наличии цифрового шумоподобного сигнала в полосе частот 646-654 МГц

Как видно из рис. 3, в случае шумоподобного цифрового сигнала вместо анализа распределения его амплитуд потребуются применение других методов, в частности, предполагается построение и анализ компонентов соответствующих сигнальных созвездий.

### Библиографический список

1. M. Guri, G. Kedma, A. Kachlon and Y. Elovici, «AirHopper: Bridging the Air-Gap between Isolated Networks and Mobile Phones using Radio Frequencies», in 9th IEEE International Conference on Malicious and Unwanted Software (MALCON 2014), Puerto Rico, Fajardo, 2014.
2. Панченко А.А. Оценка возможностей мониторинга радиозфира с помощью программно-определяемой радиосистемы на основе чипа RTL2832U // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 50-1. С. 132-135.
3. Панченко А.А. Мониторинг работы генератора электромагнитного шума с помощью программно-определяемой радиосистемы под управлением ОС Astra Linux // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 22-28.

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОЛОСА В СИСТЕМАХ ГОЛОСОВОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ДИКТОРОВ

А.С. Овчинникова, В.Н. Пржегорлинский

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань

*Аннотация.* Рассматриваются современные способы математического описания индивидуальных свойств речи диктора, используемые при опознавании диктора по голосу.

*Ключевые слова.* Голосовая аутентификация, распознавание дикторов.

## METHODS OF INDIVIDUAL VOICE COEFFICIENTS CALCULATING IN VOICE AUTHENTICATION AND SPEAKER RECOGNITION SYSTEMS

A.S. Ovchinnikova, V.N. Przhegorlinsky

Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia

*Abstract.* Theoretical methods of mathematical individual voice description in speaker recognition processes.

*Keywords.* Voice authentication, speaker recognition.

Голосовая аутентификация относится к направлениям биометрии, которые начали разрабатываться недавно (по сравнению с биометрией отпечатков пальцев). Опознавание человека по его голосовым особенностям имеет много преимуществ: возможность удаленного действия по телефонному или иному каналу связи, низкие требования к пользователю – нет необходимости запоминать пароль. Однако голос, как и большинство биометрических характеристик человека, подвержен возрастным и эмоциональным изменениям, поэтому для повышения надежности применения данного метода аутентификации его обычно используют в составе комбинированных систем.

В системах голосовой аутентификации в общем случае осуществляется сравнение звукового сигнала, поступившего извне (опознаваемый голос), с известным системе образцом. При этом более надёжной будет система, которая не использует заранее записанную парольную фразу, а анализирует поступивший сигнал как отражение индивидуальных свойств его источника, то есть человека, вне зависимости от произнесенных при проверке слов. Для осуществления такой аутентификации необходимо выделить акустические параметры сравнения, которые достаточны для однозначного описания речевых особенностей человека. Рассмотрим основные способы математического представления индивидуальных акустических особенностей речи.

Одним из вариантов получения параметров сравнения является вычисление мел-частотных кепстральных коэффициентов (Mell-Frequency Cepstral Coefficients, MFCC). MFCC составляют некоторый вектор свойств, позволяющий в компактном виде сохранить данные о распределении энергии сигнала по его частотному спектру, поскольку он хорошо иллюстрирует индивидуальные свойства говорящего.

Поступивший сигнал нормализуется по амплитуде для уменьшения влияния шумов и произвольных скачков амплитуды. Нормализованный сигнал делится на фреймы («кадры»). Длительность фрейма зависит от вычислительных возможностей системы, часто несколько десятков миллисекунд. Спектр каждого кадра получается с помощью дискретного преобразования Фурье ( $N$  – количество дискретных измерений,  $x_n$  – амплитуда  $n$ -ого измерения):  $X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi i kn}{N}}$ . К полученным коэффициентам применяется система треугольных фильтров, равномерно расположенных на мел-шкале (на частотной шкале они располагаются неравномерно согласно логарифмической зависимости мел от частоты:  $m(f) = 1127,01048 \ln(1 + \frac{f}{700})$ ). Каждый фильтр образует «окно» на графике зависимости амплитуды от высоты звука в мел. Границы фильтров и центральные точки можно рассчитать по формулам:

$$m_{begin}^i = m(f_{min}) + i \frac{m(f_{max}) - m(f_{min})}{M-1};$$

$$m_{end}^i = m(f_{min}) + (i + 2) \frac{m(f_{max}) - m(f_{min})}{M-1},$$

где  $i=1, \dots, M$  – номер фильтра. Значение  $m_{center}^i$  центральной точки фильтра (вершина «окна») вычисляется как среднее арифметическое  $m_{begin}^i$  и  $m_{end}^i$ .

Для каждого фильтра рассчитывается проходящая через него энергия. К полученным значениям вновь применяется преобразование Фурье, в результате чего получаем спектр дискретной функции исходного спектра (кепстр). На выходе имеем для каждого фрейма свой набор MFCC, который может использоваться как вектор, описывающий свойства опознаваемого сигнала.

Так как при получении MFCC используется распределение энергии по частоте, набор коэффициентов может охарактеризовать индивидуальные особенности такого распределения у конкретного человека. Для сравнения в системе аутентификации тогда используются фреймы, относящиеся к фонемам, несущим достаточное количество информации о речевых особенностях говорящего (гласные, сонорные согласные) [1]. При этом MFCC подвержены искажениям при постоянном шумовом фоне, влияние которого останется и после нормализации входного сигнала. Обычно для того, чтобы частично их компенсировать, значения нормализуют (Spectral Variance Normalization, CVN), используя среднеквадратичные отклонения  $\sigma S_i$  коэффициентов  $S_i(t)$ :  $S_i(t) = \frac{S_i(t)}{\sigma S_i}$ . Одновременно с MFCC используют LFCC (Linear Frequency Cepstral Coefficients), отличающиеся распределением по линейной частотной шкале для усреднения их значений [2].

Коэффициенты линейного предсказания (Linear Prediction Coefficients, LPC) также используются для выявления параметров анализа сигнала при распознавании голоса диктора. Линейное предсказание позволяет представить текущий отсчет сигнала в виде линейной комбинации предшествующих отсчетов:  $\hat{s}(t) = \sum_{k=1}^N \alpha_k s(t-k)$ , где  $s(t-k)$  – предшествующий  $s(t)$  сигнал. Таким образом, с помощью коэффициентов  $\alpha_k$  значение сигнала в настоящий момент может быть получено аппроксимацией предыдущих. Очевидно, что  $\alpha_k$  должны быть вычислены так, чтобы ошибка предсказания (разность реального и предсказанного значений) была минимальной:  $E = \sum_{t=1}^N e_t^2$ ,  $e_t = s_t - \hat{s}_t$ , где  $E$  – суммарная ошибка предсказания. После подстановки  $\hat{s}(t)$  и решения системы уравнений относительно коэффициентов  $\alpha_k$  получаем искомые LPC. При достаточно малом значении ошибки предсказания полученные коэффициенты помогают сохранить информацию об индивидуальных характеристиках говорящего, а именно получить закономерности в изменениях амплитудно-частотных характеристик диктора. Недостатком является приближенное вычисление  $\alpha_k$  ввиду того, что значение общей ошибки предсказания в общем случае будет больше нуля.

Акустические признаки, представленные перцепционными коэффициентами линейного предсказания (Perceptual Linear Predictive, PLP) [3], перед вычислением LPC представляют сигнал диктора в вектор коэффициентов, характеризующий распределение энергии сигнала по барк-частотной шкале. Использование подготовительных преобразований позволяет приблизить метод PLP-коэффициентов к человеческому восприятию звуков за счет барк-шкалы [4].

Аналогично первым этапам вычисления MFCC, применяется нормализация сигнала и дискретное разложение Фурье. Затем создается набор фильтров для частотного диапазона сигнала от наименьшей частоты  $f_{min}$  до наибольшей  $f_{max}$ . Для вычисления границ фильтров значения частот переводятся в барк [5]:

$$b(f) = 8,96 \ln \left( 0,978 + 5 \ln \left( 0,994 + \left( \frac{f + 75,4}{2173} \right)^{1,347} \right) \right)$$

Граничные значения для  $i$ -ого фильтра получают как:

$$b_{begin}^i = b(f_{min}) + i \frac{b(f_{max}) - b(f_{min})}{M-1};$$

$$b_{end}^i = b(f_{min}) + (i + 2) \frac{b(f_{max}) - b(f_{min})}{M-1},$$

где  $i=1, \dots, M$ . Значение  $b_{center}^i$  центральной точки фильтра (вершина «окна») вычисляется как среднее арифметическое  $b$  и  $b_{end}^i$ . Для каждого окна рассчитывается проходящая через него энергия. Применяется степенной закон интенсивности восприятия Стивенса [6], согласно которому зависимость интенсивности восприятия звукового сигнала от звуковой интенсивности не линейна:  $\Phi_i^{Bark} = (E_i^{Bark})^{0.23}$ . К полученным значениям  $\Phi_i^{Bark}$  применяется метод LPC.

Метод коэффициентов PLP менее чувствителен к шуму, чем MFCC и LPC, однако не устойчив полностью. Обычно в системах голосовой аутентификации и распознавания диктора сбор акустических характеристик голоса осуществляется с вычислением нескольких видов коэффициентов их описания, чтобы уменьшить зависимость от качества записи образцов и распознаваемого сигнала.

Таким образом, рассмотрены наиболее распространенные современные методы расчета акустических признаков речи диктора, которые используются в системах распознавания диктора и системах голосовой аутентификации. При интенсивном развитии данного направления в последние несколько десятилетий существующие системы сильно зависят от качества поступающих речевых сигналов, что приводит к ошибкам из-за невозможности провести корректный анализ поступившего материала. Важнейшим направлением развития систем распознавания диктора сегодня является снижение чувствительности к помехам и шумам, а также разработка систем, рассчитанных на стабильную работу с каналами получения данных различного качества.

### Библиографический список

1. Атал Б. Автоматическое опознавание дикторов по голосам // ТИИЭР. 1976. т. 64, №4. С: 48 – 66.
2. Белых И.Н., Капустин А.И., Козлов А.В., Лоханова А.И., Матвеев Ю.Н., Пеховский Т.С., Симончик К.К., Шулила А.К. Система идентификации дикторов по голосу для конкурса NIST RSE 2010 // Информатика и ее применения. 2012. №6. С: 91 – 98.
3. Hermansky H. Perceptual linear predictive (PLP) analysis of speech // the Journal of Acoustical Society of America. 1990. Vol. 2. No. 4. P: 578 – 589.
4. Кудашев О.Е. Система разделения дикторов на основе вероятностного линейного дискриминантного анализа // СПб, СПбНИУ ИТМО. 2014. С: 22 – 24.
5. Ковальчук А.Н. Формула перехода из области частот к шкале барков и обратно // Информатика. 2011. №4. С: 71 – 81.
6. Stevens S.S. On the psychological law // Psychological Review. 1957. №3. P: 153 – 181.

УДК 656.142; ГРНТИ 73.43.81

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ КУЛЬТУРНО-МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Т.А. Искаков

*Московский государственный университет путей сообщения,  
Россия, Москва, tiskakov@yandex.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются основные теоретические и практические вопросы моделирования транспортных процессов и пешеходных потоков при проведении культурно-массовых мероприятий на примере футбольного матча на стадионе «Открытие Арена».

*Ключевые слова.* Имитационное моделирование, массовые мероприятия, транспортные бизнес-процессы, пешеходные потоки.

## THE USE OF INFORMATION SYSTEMS IN MASS CULTURAL EVENTS ORGANIZATION

T.A. Iskakov

*Moscow State University of Railway Engineering,  
Moscow, Russia, tiskakov@yandex.ru*

*Abstract.* Theoretical and practical issues of transportation business processes and pedestrian flows modeling during mass cultural events on the example of a football match at the «Otkritie Arena» stadium.

*Keywords.* Imitation modeling, mass cultural events, transportation business processes, pedestrian flows.

В условиях современной жизни требования к безопасности при проведении культурно-массовых и спортивных мероприятий возрастают с каждым днем. Организаторы сталкиваются с большим количеством групп людей, при взаимодействии с которыми возникают задачи оперативного управления и их обслуживания. Поэтому уже на этапе планирования следует уделить особое внимание прибытию зрителей к месту проведения мероприятия и организации безопасного прохода на территорию объекта. Исследуя транспортные процессы, необходимо проанализировать распределение пассажиропотока, спрогнозировать его рост и определить пропускную способность транспорта. При организации передвижения людей на объекте и вблизи него требуется идентифицировать ограничители движения (препятствия) [1], которые направляют и регулируют пешеходные потоки.

Однако отсутствие опыта организации конкретного мероприятия или проведение его на новом объекте многократно усложняет обеспечение безопасности, поскольку у организатора нет возможности изучить прошлый опыт или провести эксперименты на реальном объекте. В этом случае основным методом при подготовке культурно-массового мероприятия является имитационное моделирование. Процессы, связанные с обслуживанием людей, наиболее полно рассматривает теория массового обслуживания (ТМО). При этом посетителей мероприятия рассматривают как «заявки» на обслуживание, а препятствия, такие как турникеты и рамки-металлоискатели, как «каналы обслуживания» [2]. В случае если следующая заявка поступает раньше завершения обработки предыдущей, возникает «очередь», которая оказывает влияние на остальные элементы системы. Время очереди и ее размеры определяются скоростью обработки «заявки» через «канал обслуживания» и своевременным исключением «заявки» из данной «очереди». Следовательно, основными параметрами, вносящими элементы случайности в построенные модели, являются поток «заявок» и продолжительность их «обслуживания».

При моделировании транспортных процессов следует обратить внимание на объекты, направляющие и регулирующие пешеходные потоки. В случае прибытия зрителей к месту проведения мероприятия на поездах метрополитена к ним относятся, в частности: эскалаторы, лестницы, турникеты, двери выхода и планировка станции. Размер пассажиропотока и, соответственно, интенсивность движения транспорта зависят от спроса на данное конкретное событие.

Рассматривая движение людей в непосредственной близости от места проведения культурно-массового мероприятия, следует обратить внимание на прохождения потоков людей через другие ограничители движения: турникеты, места личного досмотра, рамки-металлоискатели, барьеры безопасности.

Посетителей следует рассматривать в качестве интеллектуальных агентов [1] с определенным набором атрибутов: размер, скорость движения, наличие билета, способ прибытия на мероприятие. Эти параметры определяют модель поведения агента и его маршрут.

Примером такой задачи может являться проведение футбольного матча. Для построения модели были выбраны стадион «Открытие Арена», прилегающие к нему территории и станция Московского метрополитена «Спартак», находящаяся в непосредственной близости.

Исходя из вышесказанного маршрут от вагона метро до места на стадионе можно рассмотреть с точки зрения ТМО. Тогда весь комплекс стадиона и станции метрополитена можно рассмотреть как систему массового обслуживания (СМО). СМО понимается как набор устройств, на которые поступает случайный входящий поток массовых заявок на выполнение. Эти «каналы обслуживания» с различной скоростью (в зависимости от типа устройства) обрабатывают заявки, то есть удовлетворяют поступившие запросы. СМО на стадионах и в метрополитене следует отнести к классу «с ожиданием».

На сегодняшний день выделяют следующие модели пешеходных потоков [3], где поведение всех агентов рассматривают в единой системе: модель притягивающихся сил, теория очередей, клеточные автоматы, газокINETическая модель, модель социальных сил и расчетная модель. Каждая из этих моделей обладает определенными преимуществами, но

наиболее достоверной считается модель социальных сил. При определении направления движения человека к цели в данном подходе рассматриваются действия различных сил:  $F_1$  – движущая сила,  $F_2$  – сила отталкивания от стен,  $F_3$  – сила отталкивания от других пешеходов (социальная дистанция),  $F_4$  – влечение к посторонним объектам (аттракторы). В результате преобразования сил  $F_1 - F_4$ , появляется конечная результирующая сила  $F_x$ , определяющая конечный вектор движения агента. Алгоритм работы модели представлен на рис. 1.

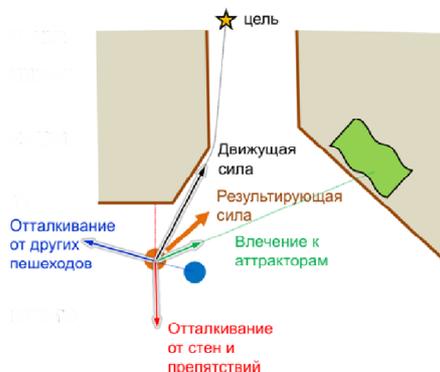


Рис. 1. Алгоритм работы модели социальных сил

В качестве средства разработки для имитационного моделирования выбран программный комплекс AnyLogic 7, язык программирования Java, язык графического описания для объектного моделирования UML и библиотека моделирования движения пешеходов в физическом пространстве Pedestrian library.

Функциональная диаграмма процесса, описывающего маршрут движения агента, представлена на рис. 2.

Разработанная модель отражает движение посетителей футбольного матча на станции метрополитена «Спартак» и к стадиону «Открытие Арена». Комплекс станции и стадиона – сложная система, включающая дискретное множество пассажиров, перемещающихся в дискретном пространстве в дискретные моменты времени, где каждый пассажир может автономно, независимо от действий других пассажиров, принимать решение о необходимости определенных действий. Зрители начинают прибывать за 2 часа до начала мероприятия, большинство (до 75%) используя метрополитен. Агенты появляются в модели согласно заданной интенсивности прибытия (эквивалентной экспоненциально распределенному времени между прибытиями со средним значением, равным  $1/\text{интенсивность}$ ). Интервалы между прибытиями поездов варьируются от 90 до 180 секунд. Задается комфортная скорость движения посетителя (в модели – 0,4-0,7 м/с) и его физический размер (в модели – 0,4-0,5 м). Модельное время составляет 1 час. Случайные процессы и отклонения моделируются законами распределения (равномерный, Пуассона и др.).

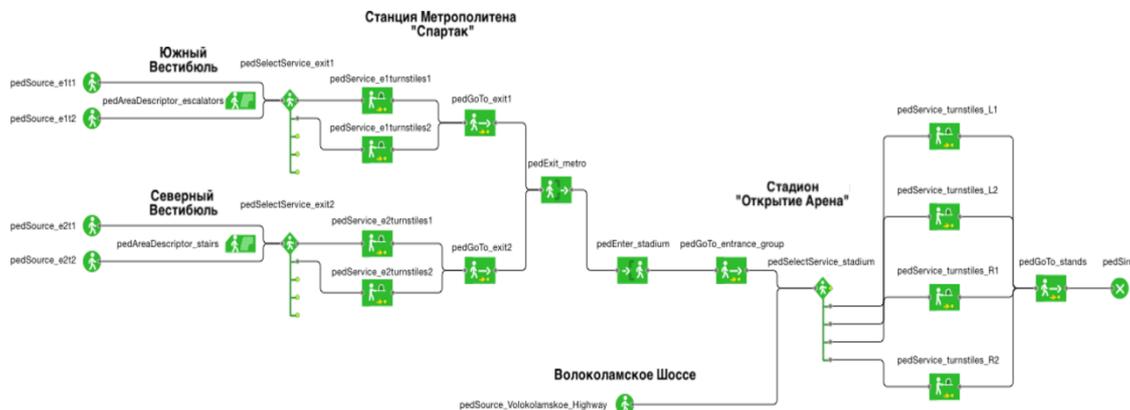


Рис. 2. UML-диаграмма общего процесса движения агента

Предполагается, что на своем пути агент столкнется с 4 видами «каналов обслуживания», ограничивающих его движение: эскалатор, лестница, турникеты

метрополитена, двери выхода, барьеры безопасности, рамки-металлоискатели, турникеты стадиона. Для каждого ограничителя задается закон распределения времени на обработку заявки, время задержки на восстановление, допускается вариация его параметров. Так, например, нормированное время подъема на эскалаторе – 45 секунд, пропускная способность турникета метрополитена – 20 чел/мин, время прохождения через рамку-металлоискатель составляет 3-7 секунд и др.

В зависимости от маршрута посетители следуют к одному из выходов с станции, поднимаются на эскалаторе или лестнице, проходят через турникеты либо проходят на территорию со стороны Волоколамского шоссе. На площади у стадиона потоки объединяются и посетители двигаются по направлению к турникетам, проходя через рамки-металлоискатели, далее внутрь стадиона. Фрагмент симуляции модели представлен на рис. 3.

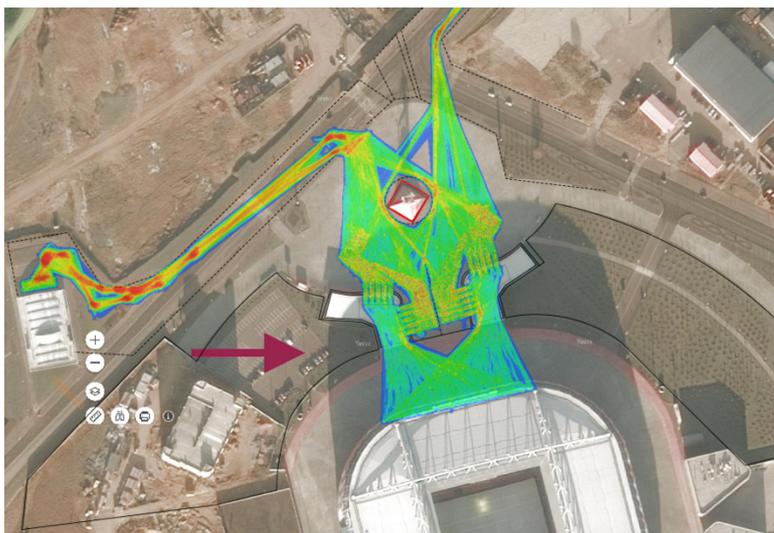


Рис. 3. Фрагмент симуляции модели стадиона

Все объекты инфраструктуры (станция метрополитена и входные группы стадиона) уменьшены относительно их реального размера, посетители матча представляются в виде кружков разных цветов. Разработанная модель является динамической (может работать как в реальном, так и в модельном времени), позволяет описывать пешеходные потоки, следующие на массовое спортивное мероприятие, возникновение очередей и внештатных ситуаций в зависимости от работы транспорта, характеристик «каналов обслуживания» и спроса на мероприятие.

В модели реализован ряд событий, которые имитируют поломки турникетов и эскалаторов, проведение мероприятия повышенного внимания и различную интенсивность движения поездов метрополитена. По результатам экспериментов определена длина интервалов между прибытиями поездов на станцию в зависимости от пассажиропотока, подготовлены рекомендации по организации очередей к входным группам, движения потоков людей, коридоров доступа, выявлены критические режимы работы объектов инфраструктуры.

Разработанная имитационная модель оценивает функционирование стадиона и транспортной инфраструктуры во время проведения культурно-массового мероприятия. Данные, полученные в результате имитационных экспериментов, позволили оптимизировать работу комплекса и составить список рекомендаций, позволяющих безопасно проводить мероприятия любого масштаба.

#### **Библиографический список**

1. Абросимов В.К., Лебидько В.В. Имитационное моделирование организации массовых мероприятий (на примере XXII зимних Олимпийских игр 2014) // Бизнес-информатика. 2013. № 1(23). С: 19–27.
2. Максимова Н.Н., Сергамасова О.И. Теория систем массового обслуживания и ее приложения // Вестник Амурского государственного университета. 2012. № 59. С: 17-25.
3. Астапенко А.В., Швецов В.Л., Осетрин Н.Н., Беспалов Д.А. Моделирование пешеходных потоков // Сборник "Градостроительство и территориальное планирование". 2011. № 41. С: 23-30.

## **РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

**В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.М. Нужный**  
*Воронежский государственный технический университет,  
Россия, Воронеж, bvf@list.ru*

*Аннотация.* Предлагается методика построения универсальной автоматизированной информационной системы (АИС), базовым при ее создании является принцип многокомпонентности. Особенностью современной универсальной графической АИС является возможность ее применения на базе различных платформ операционных систем.

*Ключевые слова.* Принцип многокомпонентности, графическое ядро системы, графическая база данных, язык Java.

## **THE GRAPHIC DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL AUTOMATED INFORMATION SYSTEM**

**V. F. Barabanov, N. I. Grebennikov, A. M. Nuzhnyy**  
*Voronezh State Technical University,  
Russia, Voronezh, bvf@list.ru*

*Abstract.* The technique of creation of the universal automated information system (AIS), a base at its creation is the principle of complexity. A universal feature of modern graphical AIS is the possibility of its application in different platforms of operating systems.

*Keywords.* Principle of complexity, graphical kernel system, graphic database, Java language.

Сами по себе средства вычислительной техники не могут осуществить преобразование информации, для этого необходимо наличие прикладного информационного и программного обеспечения, реализующего функции информационной или информационно-управляющей системы (ИУС). ИУС представляет собой совокупность элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих определенную целостность, единство и предназначенных для осуществления целенаправленного процесса преобразования и хранения информации [1].

Развитие промышленных предприятий, увеличение числа филиалов, рост количества клиентов, необходимость повышения качества обслуживания предъявляют к автоматизированным системам новые требования [2]. Новый подход к проектированию автоматизированных информационных систем (АИС) заключается в сбалансированном сочетании гибкости настроек системы и ее универсальности. Достоинством системы является многокомпонентная структура, которая предъявляет определенные требования к интегрируемым модулям: они не должны зависеть от графического ядра системы и сохранять полностью свою функциональность при его замене на какую-либо другую САД систему (см. рис. 1).

Достоинство принципа многокомпонентности, являющегося базовым при создании универсальной АИС, состоит в возможности поэтапного внедрения разрабатываемых модулей системы [3]. На первом этапе внедрения устанавливаются (или заменяются уже устаревшие) компоненты системы на те рабочие места, которые нуждаются в обновлении программного обеспечения. На втором этапе происходит развитие системы с подсоединением новых компонентов и отработкой межкомпонентных связей. Возможность применения такой методики внедрения обеспечивает ее достаточно простое тиражирование и адаптацию к местным условиям. Таким образом, универсальная графическая автоматизированная информационная система - это многокомпонентная система с графической базой данных и графическим ядром.

Еще одной особенностью современной универсальной графической АИС является возможность ее применения на базе различных платформ операционных систем. Это достигается за счет того, что все модули системы написаны на языке высокого уровня JAVA, который является кроссплатформенным. Модули, написанные на языке Java, транслируются в байт-код, выполняемый на виртуальной java-машине (JVM) — программе, обрабатывающей

байтовый код и передающей инструкции оборудованию, как интерпретатор, но с тем отличием, что байтовый код в отличие от текста обрабатывается значительно быстрее [4].

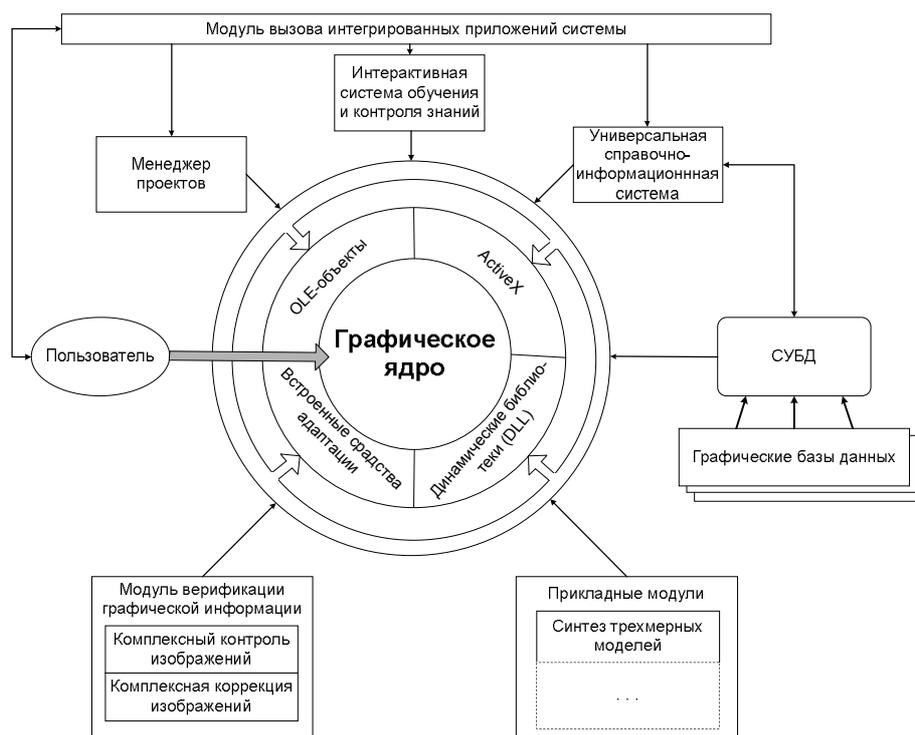


Рис.1. Структурная схема универсальной графической автоматизированной информационной системы

Достоинство подобного способа выполнения программ — в полной независимости байт-кода от операционной системы и оборудования, что позволяет выполнять Java приложения на любом устройстве, которое поддерживает виртуальную машину. Другой важной особенностью технологии Java является гибкая система безопасности, благодаря тому, что исполнение программы полностью контролируется виртуальной машиной. Любые операции, которые превышают установленные полномочия программы (например, попытка несанкционированного доступа к данным или соединения с другим компьютером), вызывают немедленное прерывание. Это позволяет пользователям загружать программы, написанные на Java, на их компьютеры или другие устройства из неизвестных источников, при этом не опасаясь заражения вирусами, пропажи ценной информации, и т. п.

В качестве графического ядра системы можно использовать графические редакторы компании Autodesk: AutoCAD, Autodesk Inventor или аналогичные графические системы. Главное требование, предъявляемое к средствам графического проектирования, это обеспечение в системе свойства открытости, то есть предоставление доступа к объектной модели графических данных средствами API. Это свойство, естественно, желательно для любого программного продукта, но для графических систем проектирования просто необходимо, поскольку, для интеграции графического ядра системы и разрабатываемых модулей требуется наличие у первого открытых и стандартизированных интерфейсов программирования.

Большую роль в универсальной графической АИС играют графические базы данных, которые представляют собой совокупность библиотек графических файлов, сгруппированных по определенным критериям и импортированных в базу данных. Для управления графическими базами данных используются системы управления базами данных (СУБД), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с хранением данных в открытом виде в файловой системе [5].

- Оптимизированный многопользовательский режим работы с развитой системой транзакционной обработки, что обеспечивает многочисленным пользователям возможность работы с базой данных, не мешая друг другу.

- Надежные средства защиты информации (учитывая стандартную трехзвенную архитектуру защиты на уровне сети - на уровне сервера баз данных - на уровне клиентской операционной системы).
- Эффективные инструменты для разграничения доступа к базе данных.
- Поддержка широкого диапазона аппаратно - программных платформ.
- Реализация распределенной обработки данных.
- Возможность построения гетерогенных и распределенных сетей.
- Развитые средства управления, контроля, мониторинга и администрирования сервера баз данных.
- Поддержка таких эффективных инструментариев, как: словари данных, функции, процедуры, пакеты и т.п.

Всеми выше перечисленными характеристиками на сегодняшний день обладают такие профессиональные СУБД, как Oracle, Informix, Sybase, но данные системы являются коммерческими продуктами и обладают большой стоимостью. Но параллельно с коммерческими СУБД развиваются бесплатные системы управления базами данных, которые по своим характеристикам ничуть не уступают коммерческим СУБД, а даже имеют ряд преимуществ. Примером бесплатной СУБД может служить MySQL – это совершенно бесплатная СУБД с открытым кодом, каждый желающий может внести изменение в код программы и скомпилировать собственную СУБД, отвечающую его требованиям.

Выбор в качестве графического ядра Autodesk и интегрирование СУБД в автоматизированную информационную систему должен быть произведен не случайным, а системным образом в рамках единого проекта, учитывающего как существующие наработки по решению поставленных задач, так и возможность дальнейшего расширения системы. Универсальность в этом случае будет достигаться за счет возможности интеграции разрабатываемого комплекса программ с различными графическими системами в качестве ядра, применения данной системы на различных платформах операционных систем, а также увеличения её функциональных способностей и области применения.

Анализ рынка показывает, что на сегодня современная АИС должна представлять собой интегрированный комплекс аппаратно-программных средств, реализующих мультипредметную информационную систему, работающую на большинстве современных платформ операционных систем, обеспечивающую современные финансовые, управленческие, проектирующие, производственные и сбытовые технологии в режиме реального времени при транзакционной обработке данных.

### **Библиографический список**

1. Киселев Д.В. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем. [Текст] : учебное пособие / Д. В. Киселев, Е. Л. Федотова, Л. Г. Гагарина.- М. : Форум, 2007. - 384 с.
2. Емельянова Н.З. Основы построения автоматизированных информационных систем [Текст] / Н.З. Емельянова. - М. : Форум, 2005. - 416 с.
3. Принципы построения системы интерактивного проектирования технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, А.Д. Поваляев, Н.И. Гребенникова, А.В. Ачкасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 10-13.
4. Сафронов В.В. Модульное построение распределённой информационной системы машиностроительного предприятия [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 4. - С. 44-50.
5. Барабанов В.Ф. Организация графических баз данных для интерактивного проектирования технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 30-33.

## ОЦЕНКА УГРОЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**В.О. Волосенков\*, О.Н. Андреева\*\***

*\*ВА ВПВО ВС РФ,*

*Россия, Смоленск, vvolosenkov@yandex.ru,*

*\*\* Московский технологический университет (МИРЭА),*

*Россия, Москва, andreeva\_olia@mail.ru*

*Аннотация.* В статье рассматривается проблема информационной безопасности распределённых вычислительных систем. Предложен способ экспертной оценки, позволяющий определить значимость угроз информационной безопасности распределённых вычислительных систем с целью формирования обоснованных требований к защите информации.

*Ключевые слова.* Угроза информационной безопасности, распределённая вычислительная система, защита информации, целостность информации.

## INFORMATION SECURITY THREATS AUTOMATED DATA PROCESSING

**V.O. Volosenkov\*, O.N. Andreeva\*\***

*\*Russia, Smolensk, VA VPVO, vvolosenkov@yandex.ru*

*\*\*Russia, Moscow, andreeva\_olia@mail.ru*

*Abstract.* The article considers the problem of information security distributed computing systems. The method of expert evaluation, which allows to determine the significance of threats to information security distributed computing systems with the aim of forming reasonable requirements to protect the information.

*Keywords.* The threat of information security, distributed computing system, information security, information integrity.

Современная распределённая вычислительная система представляет собой сложную систему, состоящую из большого числа компонентов различной степени автономности, которые связаны между собой и обмениваются данными. Обеспечение эффективного противодействия различным угрозам информационной безопасности распределённых вычислительных систем, в том числе от несанкционированного доступа нарушителем, является актуальной задачей.

Организация обеспечения безопасности информации распределённых вычислительных систем предполагает оценку значимости угроз. Угроза (действие) – это возможная опасность (потенциальная или реально существующая) совершения какого-либо деяния (действия или бездействия), направленного против объекта защиты (информационных ресурсов), наносящего ущерб собственнику, владельцу или пользователю, проявляющегося в опасности искажения и потери информации [1].

Источник угрозы – это причины, приводящие к нарушению безопасности информации на конкретном объекте из-за недостатков свойств архитектуры распределённой вычислительной системы, протоколов обмена и интерфейсов, применяемого программного обеспечения и аппаратной платформы, условий эксплуатации [2].

Все источники угроз информационной безопасности можно разделить на три основные группы [3]:

источники угроз, обусловленные действиями субъекта (антропогенные источники угроз);

источники угроз, обусловленные техническими средствами (техногенные источники угрозы);

источники угроз, обусловленные стихийными источниками.

Полное устранение перечисленных угроз безопасности функционирования вычислительных систем принципиально невозможно. Проблема оценки угроз информационной безопасности распределённых вычислительных систем состоит в выявлении факторов, от которых они зависят, в создании методов и средств уменьшения их влияния на безопасность функционирования распределённых вычислительных систем [4].

Предлагается способ экспертной оценки угроз информационной безопасности распределённых вычислительных систем. Будем считать, что все источники угроз имеют

разную степень опасности  $(K_{on})_i$ , которую можно количественно оценить, проведя их ранжирование. При этом оценка степени опасности проводится по следующим показателям:

коэффициенту доступности к защищаемому объекту  $(K_1)_i$ , который определяет степень доступности к защищаемому объекту (для антропогенных источников), удаленность от защищаемого объекта (для техногенных источников) или особенности обстановки (для случайных источников);

коэффициент готовности источника  $(K_2)_i$ , который определяет степень квалификации и привлекательность совершения деяний со стороны источника угрозы (для антропогенных источников) или наличие необходимых условий (для техногенных и стихийных источников);

коэффициент фатальности  $(K_3)_i$ , который определяет степень неустранимости последствий реализации угрозы.

Перечисленные показатели предлагается определять путём экспертной оценки, основанной на суждении специалистов по информационной безопасности распределённых вычислительных систем. Каждый показатель оценивается экспертом по пятибалльной шкале. Единица соответствует самой минимальной степени влияния оцениваемого показателя на опасность использования источника, а пять – максимальной.

Коэффициент угрозы информационной безопасности  $(K_{on})_i$  для отдельного объекта распределённой вычислительной системы можно определить как отношение произведения полученных значений выше приведенных показателей к их максимальному значению:

$$(K_{on})_i = \frac{(K_1)_i (K_2)_i (K_3)_i}{5 \cdot 5 \cdot 5} = \frac{(K_1)_i (K_2)_i (K_3)_i}{125}.$$

Коэффициент доступности к защищаемому объекту может быть определён по следующей шкале:

высокая степень доступности – антропогенный источник угроз имеет полный доступ к техническим и программным средствам обработки защищаемой информации (характерно для внутренних антропогенных источников, наделенных максимальными правами доступа, например, представители служб безопасности информации, администраторы);

первая средняя степень доступности – антропогенный источник угроз имеет возможность опосредованного, не определенного функциональными обязанностями (за счет побочных каналов утечки информации, использования возможности доступа к привилегированным рабочим местам) доступа к техническим и программным средствам обработки защищаемой информации (характерно для внутренних антропогенных источников);

вторая средняя степень доступности – антропогенный источник угроз имеет ограниченную возможность доступа к программным средствам в силу введенных ограничений использования технических средств, функциональных обязанностей или по роду своей деятельности (характерно для внутренних антропогенных источников с обычными правами доступа, например, пользователи, или внешних антропогенных источников, имеющих право доступа к средствам обработки и передачи защищаемой информации);

низкая степень доступности – антропогенный источник угроз имеет очень ограниченную возможность доступа к техническим средствам и программам, обрабатывающим защищаемую информацию (характерно для внешних антропогенных источников);

отсутствие доступности – антропогенный источник угроз не имеет доступа к техническим средствам и программам, обрабатывающим защищаемую информацию.

Оценка антропогенных источников играет важную роль в определении их возможностей для совершения противоправных деяний. Предлагается следующее

распределение уровней возможности взаимодействия с распределённой вычислительной системой:

нулевой уровень, определяется отсутствием возможности какого-либо использования программ;

первый уровень, ограничивается возможностью запуска программ из фиксированного набора, предназначенного для обработки защищаемой информации (уровень неквалифицированного пользователя);

второй уровень, учитывает возможность создания и запуска пользователем собственных программ с новыми функциями обработки информации (уровень квалифицированного пользователя, программиста);

третий уровень, определяется возможностью управления распределённой вычислительной системой, т. е. воздействием на базовое программное обеспечение, ее состав и конфигурацию (уровень системного администратора);

четвертый уровень, определяется всем объемом возможностей субъектов, проектирующих и ремонтирующих технические средства, вплоть до включения в состав сети собственных технических средств с новыми функциями по обработке информации (уровень разработчика и администратора).

Нулевой уровень является самым низким уровнем возможностей ведения диалога источника угроз с защищаемой распределённой вычислительной системой. При оценке возможностей антропогенных источников предполагается, что субъект, совершающий противоправные действия, либо обладает, либо может воспользоваться правами соответствующего уровня.

Привлекательность совершения деяния со стороны источника угроз устанавливается следующим образом:

особо привлекательный уровень – защищаемые информационные ресурсы содержат информацию, которая может нанести непоправимый урон;

привлекательный уровень – защищаемые информационные ресурсы содержат информацию, которая может быть использована для получения выгоды в пользу источника угрозы или третьих лиц;

умеренно привлекательный уровень – защищаемые информационные ресурсы содержат информацию, разглашение которой может нанести незначительный ущерб;

слабо привлекательный уровень – защищаемые информационные ресурсы содержат информацию, которая при ее накоплении и обобщении в течение определенного периода может причинить ущерб организации, осуществляющей защиту;

непривлекательный уровень – информация не представляет интереса для источника угрозы.

Степень неустраимости последствий проявления угрозы (фатальность) предлагается оценивать по следующей шкале:

неустраимые последствия, результаты проявления угрозы могут привести к полному разрушению (уничтожению, потере) объекта защиты, как следствие, к невозможным потерям и исключению возможности доступа к защищаемым информационным ресурсам;

практически неустраимые последствия, результаты проявления угрозы могут привести к разрушению (уничтожению, потере) объекта и к значительным затратам (материальным, временным и пр.) на восстановление последствий, сопоставимых с затратами на создание нового объекта и существенному ограничению времени доступа к защищаемым ресурсам;

частично устранимые последствия, результаты проявления угрозы могут привести к частичному разрушению объекта защиты и, как следствие, к значительным затратам на восстановление, ограничению времени доступа к защищаемым ресурсам;

устраимые последствия, результаты проявления угрозы могут привести к частичному разрушению (уничтожению, потере) объекта защиты, не требующих больших

затрат на его восстановление и практически не влияющих на ограничение времени доступа к защищаемым информационным ресурсам;

отсутствие последствий, результаты проявления угрозы не могут повлиять на деятельность объекта защиты.

Результаты ранжирования конкретного объекта защиты хранятся в таблице для последующего анализа и выявления наиболее опасных источников угроз.

При выборе допустимого уровня источника угроз предполагается, что источники угроз, имеющие коэффициент  $(K_{on})_i < (0,1-0,2)$ , могут в дальнейшем не учитываться, как маловероятные.

Определение наиболее опасных угроз информационной безопасности осуществляется на основе анализа расположения объектов защиты и структуры построения распределённой вычислительной системы, а также информационных ресурсов, подлежащих защите.

Предлагаемый способ экспертной оценки позволяет определить значимость угроз информационной безопасности распределённых вычислительных систем с целью формирования обоснованных требований к защите информации.

Применение способа оценки угроз информационной безопасности на практике позволит формировать обоснованные требования к системе защиты распределённой вычислительной системы, способной противодействовать существующим или возможным угрозам.

#### **Библиографический список**

1. Гаврилов А.Д., Волосенков В.О. Угрозы информационной безопасности автоматизированной системы обработки данных // Проблемы безопасности российского общества, 2013. № 4. С. 85-92.
2. Гаврилов А.Д., Волосенков В.О. Классификация моделей обеспечения информационной безопасности распределённых вычислительных систем // Проблемы безопасности российского общества, 2013. № 4. С. 72-84.
3. Волосенков В.О., Гаврилов А.Д. Анализ уязвимостей компонентов распределённой вычислительной системы и методов её защиты // Проблемы безопасности российского общества, 2014. № 2. С. 171-176.
4. Волосенков В.О., Лупорев С.Н. Анализ угроз информационной безопасности для пользователей веб-приложений // Проблемы безопасности российского общества, 2015. № 3. С. 103-109.

УДК 004.056.53; ГРНТИ 81.93.29

## **ШИФРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ БЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ И ПОЛНОДИСКОВОЕ ШИФРОВАНИЕ В СЕМЕЙСТВЕ ОС GNU/LINUX С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DM-CRYPT**

**Г. О. Майоров**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, gmaiorov@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются практические вопросы и подходы обеспечения конфиденциальности хранимых данных с использованием криптографических средств операционных систем GNU/Linux.

*Ключевые слова.* Полнодисковое шифрование, конфиденциальность хранимых данных, шифрование блочных устройств.

## **BLOCK DEVICE ENCRYPTION AND FULL DISK ENCRYPTION IN GNU/LINUX OPERATING SYSTEM USING DM-CRYPT**

**G. O. Mayorov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, gmaiorov@gmail.com*

*Abstract.* Practical issues and methods of data at rest confidentiality provisioning using GNU/Linux operating systems cryptographic system are considered.

*Keywords.* Full disk encryption, data at rest confidentiality, block device encryption.

В настоящее время крайне актуальной становится тема защиты информации при возможности непосредственного физического доступа злоумышленника к носителю защищаемой информации. Подобный доступ может быть возможен в разнообразных ситуациях, таких как кража носителя, его потеря его собственником или пользователем

информации. Такая ситуация возможна в случае отторгаемых носителей информации либо в случае, если автоматизированная система, использующая данный носитель, представляет собой мобильное АРМ. Для защиты от данной угрозы используется метод шифрования защищаемого носителя. Кроме того, шифрование носителя может быть использовано для обеспечения невозможности доступа к информации, хранимой на данном носителе, после окончания эксплуатации носителя.

Существует достаточно большое количество программных, аппаратных и программно-аппаратных средств криптографической защиты информации (далее - СКЗИ), позволяющих осуществить шифрование носителей информации. Однако большая часть данных СКЗИ в процессе работы обеспечивает зашифрование лишь того носителя, на котором хранится защищаемая информация, и данные СКЗИ не могут защитить информацию от утечки на другие, нешифруемые носители информации. Подобная утечка может быть вызвана, к примеру, созданием программным обеспечением, обрабатывающим информацию, временных файлов на незашифрованных носителях, присоединенных к системе, а также на незашифрованных областях основного носителя системы. Для избежания данной утечки следует зашифровывать не только носитель, содержащий непосредственно обрабатываемую информацию, но и все носители системы, предотвращая таким образом возможность утечки информации через незашифрованные носители. Данный подход и является основной идеей полnodискового шифрования.

Кроме соображений безопасности защищаемой полnodисковым шифрованием информации, требования к аппаратным и программным СКЗИ для полnodискового шифрования предъявляют нормативно-правовые акты, методические документы и иные механизмы правового регулирования использования криптографических средств защиты информации, действующие в Российской Федерации. В числе данных требований – использование симметричных криптографических алгоритмов, стандартизованных ГОСТ Р 34.12-2015 , и сертификация реализаций данных алгоритмов в системе сертификации РОСС RU.0001.030001 . Выполнение требований необходимо при использовании СКЗИ для полnodискового шифрования в случае защиты ими информации в автоматизированных системах организаций, обрабатывающих персональные данные, либо сведения, составляющие государственную тайну, либо государственных организаций, либо организаций, работающих со служебной информацией государственных органов. В остальных случаях допускается использование средств защиты информации, не имеющих действующего сертификата ФСТЭК или (в случае СКЗИ) ФСБ России.

В данной работе в качестве СКЗИ, позволяющего осуществлять полnodисковое шифрование, предлагается использовать **dm-crypt** — свободное программное обеспечение под лицензией GNU GPLv3, являющееся частью подсистемы виртуальных блочных устройств ядра Linux. Данное СКЗИ является программным и позволяет осуществлять прозрачное шифрование блочных устройств в семействе систем GNU/Linux. Ввиду того, что данное СКЗИ не обладает действующим сертификатом ФСБ России и не реализует криптографических алгоритмов, устанавливаемых ГОСТ Р 34.12-2015 , его применение возможно организациями в отношении коммерческой тайны и иных видов информации ограниченного доступа, степень конфиденциальности которой определяется непосредственно собственником информации, а также физическими лицами в отношении информации, собственниками которой данные физические лица являются.

СКЗИ обладает следующими преимуществами:

Открытый исходный код и возможность свободной его модификации. Данное СКЗИ позволяет любому оператору автоматизированной системы, использующей его, свободно изучать, верифицировать, модифицировать, распространять или продавать оригинальное или модифицированное СКЗИ. Однако лицензия требует распространения модифицированного исходного кода вместе с модифицированной версией данного СКЗИ;

Оригинальная версия СКЗИ dm-crypt распространяется свободно и бесплатно, что существенно снижает затраты на обеспечение защиты конфиденциальности хранимой

информации;

Использование СКЗИ dm-crypt с блочным шифром AES обладает крайне высокой производительностью ввиду поддержки аппаратных криптоускорителей AES, встраиваемых в большинство современных ЦПУ;

Высокая модульность и открытый исходных код СКЗИ dm-crypt позволяют с крайне малыми затратами реализовать российские криптоалгоритмы, устанавливаемые ГОСТ Р 34.12-2015. Для этого необходимо лишь реализовать блочный шифр, включить его в исходный код ядра GNU/Linux, скомпилировать его, а также модифицировать прикладное программное обеспечение dm-crypt уровня пользователя, внедрив в него поддержку нового криптоалгоритма. После этих шагов, организация, обладающая лицензией ФСБ России на осуществление разработки, производства, распространения шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств, выполнения работ, оказания услуг в области шифрования информации, технического обслуживания шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств (за исключением случая, если техническое обслуживание шифровальных (криптографических) средств, информационных систем и телекоммуникационных систем, защищенных с использованием шифровальных (криптографических) средств, осуществляется для обеспечения собственных нужд юридического лица или индивидуального предпринимателя), сможет произвести сертификацию модифицированной версии СКЗИ dm-crypt и её последующую реализацию (при условии распространения исходных кодов модифицированной версии вместе с поставляемым продуктом согласно требованиям лицензии GNU GPLv3).

СКЗИ dm-crypt на настоящий поддерживает следующие блочные шифры:

- AES;
- Serpent;
- Twofish;
- Cast5;
- Cast6.

СКЗИ dm-crypt на настоящий поддерживает следующие режимы включения описанных выше блочных шифров:

1. ECB;
2. CBC-PLAIN;
3. CBC-ESSIV (с хеш-функциями RIPEMD160 и семейства SHA);
4. XTS-PLAIN64.

Параметры шифрования, используемые для зашифрования конкретного носителя, задаются пользователем заранее. Особенность описываемого криптосредства состоит в том, что по умолчанию оно хранит данные параметры в заголовке создаваемого на носителе раздела, называемого криптоконтейнером LUKS (Linux Unified Key), что позволяет при работе с dm-crypt прозрачно и без необходимости использования каких-либо конфигурационных файлов подключать криптоконтейнеры, задавая в качестве входных параметров только лишь ключ, на котором осуществляется зашифрование носителя. Это позволяет обеспечить подключение криптоконтейнеров на этапе загрузки GNU/Linux, когда корень файловой системы еще не смонтирован, а все утилиты находятся в InitramFS, причем нет необходимости в пересоздании InitramFS при изменении конфигурации шифруемых носителей. Структура заголовка криптоконтейнера представлена на рис. 1:

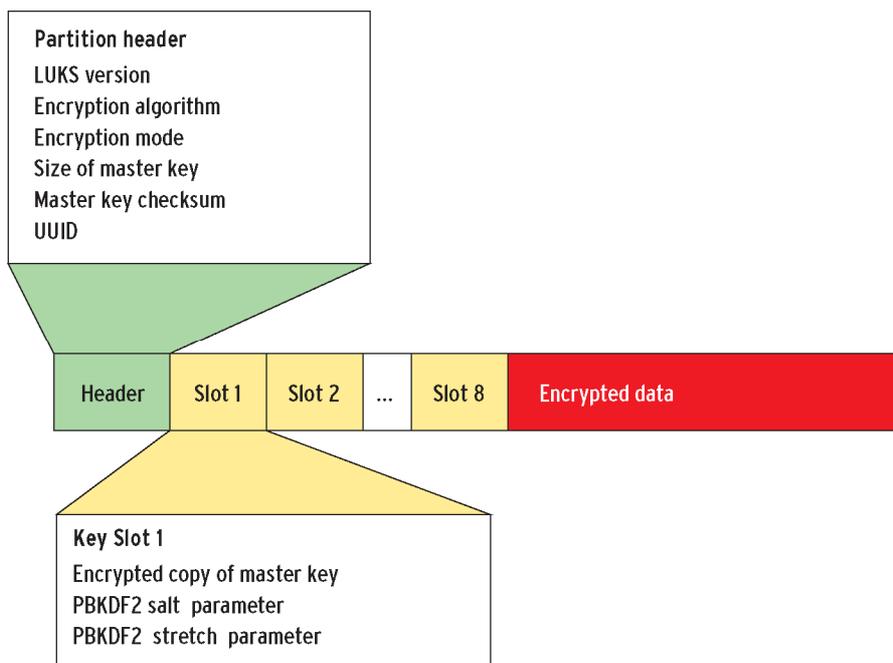


Рис. 1. Структура заголовка криптоконтейнера LUKS

После подключения криптоконтейнера с использованием корректного ключа ядро GNU/Linux создает виртуальное блочное устройство, соответствующее расшифрованной области данных подключенного криптоконтейнера. На данном блочном устройстве стандартными средствами операционной системы создается файловая система. Если необходимо осуществлять полнодисковое шифрование и последующую загрузку с зашифрованного раздела, необходимо также вынести файлы ядра GNU/Linux и InitramFS, находящиеся в каталоге /boot на отдельный раздел, не подлежащий зашифрованию, который будет впоследствии смонтирован в названный каталог для сохранения работоспособности системы, после чего операционная система сможет загрузиться и использовать зашифрованный носитель в качестве корня своей файловой системы.

Продemonстрируем процесс настройки СКЗИ dm-crypt на примере зашифрования loop-устройства (псевдоустройства, предоставляющего возможность доступа к файлу как к виртуальному блочному устройству) на рис. 2 и 3:

```

root@ic-notebook:~# dd if=/dev/zero of=/tmp/zerofile.img bs=1024M count=1
1+0 записей получено
1+0 записей отправлено
скопировано 1073741824 байта (1,1 GB), 0,821141 с, 1,3 GB/c
root@ic-notebook:~# losetup /dev/loop0 /tmp/zerofile.img
root@ic-notebook:~# dd if=/dev/urandom of=/tmp/secret.key bs=4K count=1
1+0 записей получено
1+0 записей отправлено
скопировано 4096 байт (4,1 kB), 0,000693558 с, 5,9 MB/c
root@ic-notebook:~# cryptsetup luksFormat --cipher aes-xts-plain64 --key-size 512 --hash sha512 --use-random --key-file /tmp/secret.key /dev/loop0
WARNING!
=====
This will overwrite data on /dev/loop0 irrevocably.
Are you sure? (Type uppercase yes): YES

```

Рис. 2. Создание криптоконтейнера LUKS

```

root@ic-notebook:~# cryptsetup luksOpen --key-file /tmp/secret.key /dev/loop0 loop0_crypt
root@ic-notebook:~# mke2fs -t ext4 -L 'secretfs' -m 0 /dev/mapper/loop0_crypt
mke2fs 1.42.12 (29-Aug-2014)
Creating filesystem with 261632 4k blocks and 65408 inodes
Filesystem UUID: 0f896f97-e484-44cd-9daf-62df3fa222db
Superblock backups stored on blocks:
    32768, 98304, 163840, 229376
Allocating group tables: done
Writing inode tables: done
Creating journal (4096 blocks): done
Writing superblocks and filesystem accounting information: done
root@ic-notebook:~# mkdir /tmp/secretfs
root@ic-notebook:~# mount /dev/mapper/loop0_crypt /tmp/secret
secretfs/ secret.key
root@ic-notebook:~# mount /dev/mapper/loop0_crypt /tmp/secretfs/
root@ic-notebook:~# touch /tmp/secretfs/supersecretfile.txt
root@ic-notebook:~# ls -lAh /tmp/secretfs/
итого 16K
drwx----- 2 root root 16K map 9 01:20 lost+found
-rw-r--r-- 1 root root 0 map 9 01:22 supersecretfile.txt
root@ic-notebook:~# umount /tmp/secretfs
root@ic-notebook:~# cryptsetup luksClose loop0_crypt
root@ic-notebook:~# losetup -d /dev/loop0

```

Рис. 3. Подключение криптоконтейнера LUKS, создание на нем файловой системы, ее монтирование и демонстрация работоспособности

Данные операции производились в дистрибутиве GNU/Linux Debian 8.3 Jessie. Как видно из рис. 2 и 3, СКЗИ dm-crypt позволяет удобно зашифровывать носители в семействе операционных систем, что в сочетании с описанными преимуществами позволяет рекомендовать его для защиты хранимой информации методом полнодискового шифрования в тех ситуациях, когда существует возможность физического доступа злоумышленника к носителю защищаемой информации, и законодательство Российской Федерации не накладывает требований на методы защиты данной информации.

### Библиографический список

1. Мирин А. Ю. Метод и алгоритм гарантированного уничтожения информации, хранимой на магнитных дисках: Дис. ... канд. техн. наук. СПбНИУ ИТМО. СПб., 2005.
2. ГОСТ Р 34.12-2015. Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры. Введ. 01.01.2016.
3. Постановление Правительства РФ N 608 от 26 июня 1995 г. "О сертификации средств защиты информации".

## СЕКЦИЯ «ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

### КОМБИНИРОВАНИЕ МЕТОДОВ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ФАЗЫ ПРИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

**В.А. Ушенкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, foton@rsreu.ru*

*Аннотация.* Рассматривается задача интерферометрической обработки радиолокационной информации от космических систем ДЗЗ на этапе развертывания фазы. Предлагается алгоритм развертывания фазы, основанный на комбинировании существующих методов и выделения областей, в которых наиболее вероятно нарушение условия теоремы Котельникова.

*Ключевые слова.* Интерферометрическая обработка, радиолокационное изображение, интерферограмма, цифровая модель рельефа, развертывание фазы.

### COMBINING OF PHASE UNWRAPPING METHODS IN INTERFEROMETRIC PROCESSING OF SAR INFORMATION

**V.A. Ushenkin**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, foton@rsreu.ru*

*Abstract.* The problem of spaceborne SAR data interferometric processing at the stage of phase unwrapping is considered. The algorithm of phase unwrapping based on combining of existing methods and detecting of regions, in which a violation of Nyquist–Shannon sampling theorem condition is most probable, is proposed.

*Keywords.* Interferometric processing, SAR image, interferogram, DEM, phase unwrapping.

Наиболее нетривиальным этапом интерферометрической обработки радиолокационной информации, позволяющей построить цифровую модель рельефа по паре комплексных радиолокационных изображений, является развертывание фазы интерферограммы. Оно заключается в восстановлении истинных значений фазы по ее свернутым значениям, определяемым главными значениями функции аргумента комплексного сигнала интерферограммы.

В общем случае данная задача имеет бесконечное множество возможных решений, отличающих друг от друга на целое количество периодов в каждом пикселе интерферограммы. Поэтому в существующих методах развертывания фазы используются те или иные предположения, позволяющие на некоторой части всех возможных сюжетов добиться результатов развертывания, близких к истинным значениям фазы.

Основным предположением является гладкость поверхности истинной фазы, т.е. малая величина разности фаз в соседних пикселях интерферограммы, не превышающая по модулю половины периода. Однако для небольшой доли пикселей реальных интерферограмм это предположение оказывается несправедливым, поэтому существующие методы развертывания фазы используют различные дополнительные предположения и идеи, которые позволяют правильно разворачивать фазу в определенных случаях.

Скомбинировав основные идеи существующих методов так, чтобы каждая из них применялась только в тех случаях, когда она способна обеспечить правильное развертывание фазы, можно повысить точность развертывания фазы на тех сюжетах, на которых каждый из комбинируемых методов приводит к значительным ошибкам.

Для комбинирования были выбраны три классических метода, каждый из которых работает с градиентом фазы: отсечения ветвей [1], потока минимальной стоимости [2] и наименьших квадратов [3]. Основные идеи методов также дополнены разработанным критерием выделения на интерферограмме областей, в которых наиболее вероятно нарушение условия гладкости поверхности истинной фазы (условия теоремы Котельникова).

Предлагаемый алгоритм развертывания фазы включает следующие шаги.

**Шаг 1.** Оценка градиента фазы  $\tilde{\mathbf{G}}_{rc} = (\tilde{G}_{rcx}, \tilde{G}_{rcy})$  в предположении о гладкости фазовой поверхности:

$$\tilde{G}_{rcx} = \arg e^{j(\tilde{\varphi}_{r,c+1} - \tilde{\varphi}_{rc})}, \quad \tilde{G}_{rcy} = \arg e^{j(\tilde{\varphi}_{r+1,c} - \tilde{\varphi}_{rc})},$$

где  $\tilde{\varphi}_{rc}$  – свернутое значение фазы,  $r$  – номер строки,  $c$  – номер столбца.

**Шаг 2.** Оценка наклона фазовой поверхности, выражаемого отфильтрованным градиентом фазы  $\overline{\mathbf{G}}_{rc} = (\overline{G}_{rcx}, \overline{G}_{rcy})$ :

$$\overline{G}_{rcx} = \text{Me}\{\tilde{G}_{r+p,c+q,x}; p = \overline{-W, W}, q = \overline{-W, W}\},$$

$$\overline{G}_{rcy} = \text{Me}\{\tilde{G}_{r+p,c+q,y}; p = \overline{-W, W}, q = \overline{-W, W}\},$$

где  $\text{Me}$  – медиана,  $(2W + 1) \times (2W + 1)$  – размеры окна фильтрации.

**Шаг 3.** Вычисление длины дуг транспортной сети в соответствии с оцененным наклоном фазовой поверхности.

Длины  $w_{1rcx}$ ,  $w_{2rcx}$ ,  $w_{1rcy}$  и  $w_{2rcy}$  вертикальных и горизонтальных дуг, направленных из  $rc$ -го узла соответственно вниз, вверх, влево и вправо, задаются следующим образом:

$$w_{1rcx} = \begin{cases} 1 + K|\overline{G}_{rcy}|, & \overline{G}_{rcx} \leq 0, \\ (1 + K|\overline{G}_{rcy}|)(1 + K\overline{G}_{rcx}), & \overline{G}_{rcx} > 0; \end{cases} \quad w_{2rcx} = \begin{cases} 1 + K|\overline{G}_{rcy}|, & \overline{G}_{rcx} > 0, \\ (1 + K|\overline{G}_{rcy}|)(1 - K\overline{G}_{rcx}), & \overline{G}_{rcx} \leq 0; \end{cases}$$

$$w_{1rcy} = \begin{cases} 1 + K|\overline{G}_{rcx}|, & \overline{G}_{rcy} \leq 0, \\ (1 + K|\overline{G}_{rcx}|)(1 + K\overline{G}_{rcy}), & \overline{G}_{rcy} > 0; \end{cases} \quad w_{2rcy} = \begin{cases} 1 + K|\overline{G}_{rcx}|, & \overline{G}_{rcy} > 0, \\ (1 + K|\overline{G}_{rcx}|)(1 - K\overline{G}_{rcy}), & \overline{G}_{rcy} \leq 0, \end{cases}$$

где  $K$  – коэффициент чувствительности длин дуг к наклону фазовой поверхности.

В случае, когда  $\overline{G}_{rcx} \leq 0$  и  $\overline{G}_{rcy} \leq 0$ , длины  $w_{1rcd}$ ,  $w_{2rcd}$ ,  $w_{3rcd}$ ,  $w_{4rcd}$  диагональных дуг, направленных из  $rc$ -го узла соответственно влево и вверх, вправо и вверх, вправо и вниз, влево и вниз, задаются следующим образом:

$$w_{1rcd} = w_{2rcd} = w_{3rcd} = \frac{(w_{1rcy} + w_{1rcx}) \max(w_{1rcy}, w_{1rcx})}{\sqrt{2} \min(w_{1rcy}, w_{1rcx})}, \quad w_{4rcd} = \frac{\sqrt{2} \max(w_{1rcy}, w_{1rcx})}{\min(w_{1rcy}, w_{1rcx})}.$$

При  $\overline{G}_{rcx} \leq 0$  и  $\overline{G}_{rcy} > 0$ :

$$w_{1rcd} = w_{2rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{2rcy} + w_{1rcx}) \max(w_{2rcy}, w_{1rcx})}{\sqrt{2} \min(w_{2rcy}, w_{1rcx})}, \quad w_{3rcd} = \frac{\sqrt{2} \max(w_{2rcy}, w_{1rcx})}{\min(w_{2rcy}, w_{1rcx})}.$$

При  $\overline{G}_{rcx} > 0$  и  $\overline{G}_{rcy} \leq 0$ :

$$w_{2rcd} = w_{3rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{1rcy} + w_{2rcx}) \max(w_{1rcy}, w_{2rcx})}{\sqrt{2} \min(w_{1rcy}, w_{2rcx})}, \quad w_{1rcd} = \frac{\sqrt{2} \max(w_{1rcy}, w_{2rcx})}{\min(w_{1rcy}, w_{2rcx})}.$$

При  $\overline{G}_{rcx} > 0$  и  $\overline{G}_{rcy} > 0$ :

$$w_{2rcd} = w_{3rcd} = w_{4rcd} = \frac{(w_{2rcy} + w_{2rcx}) \max(w_{2rcy}, w_{2rcx})}{\sqrt{2} \min(w_{2rcy}, w_{2rcx})}, \quad w_{1rcd} = \frac{\sqrt{2} \max(w_{2rcy}, w_{2rcx})}{\min(w_{2rcy}, w_{2rcx})}.$$

**Шаг 4.** Разбиение сингулярных точек (в которых нарушается условие потенциальности поля градиента  $\tilde{\mathbf{G}}_{rc}$ ) на пары с помощью модификации «жадного» алгоритма, используемого в классическом методе отсечения ветвей [1]. Модификация заключается в том, что однократное сканирование интерферограммы заменяется многократным. При каждом сканировании объединяются в пары только точки, расстояние между которыми не превышает некоторый предел, повышаемый при последующих сканированиях. Под расстоянием между точками понимается кратчайший путь между соответствующими узлами в транспортной сети, построенной на предыдущем этапе.

**Шаг 5.** Проведение потоков для каждой полученной пары сингулярных точек и получение более точной оценки градиента фазы. Единица потока проводится в транспортной сети по кратчайшему пути от источника, соответствующего одной из точек, до стока, соответствующего другой точке. После проведения всех потоков новая оценка градиента фазы определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{G}_{rcx} &= \tilde{G}_{rcx} + 2\pi(k_{1,r-1,cx} - k_{2rcx} + k_{4,r-1,cd} + k_{3,r-1,c-1,d} - k_{2rcd} - k_{1r,c+1,d}), \\ \hat{G}_{rcy} &= \tilde{G}_{rcy} + 2\pi(k_{1rcy} - k_{2r,c-1,y} + k_{4,r-1,c,d} - k_{3r,c-1,d} - k_{2,r+1,c-1,d} + k_{1rcd}),\end{aligned}\quad (8)$$

где  $k_{1rcx}$ ,  $k_{2rcx}$ ,  $k_{1rcy}$ ,  $k_{2rcy}$ ,  $k_{1rcd}$ ,  $k_{2rcd}$ ,  $k_{3rcd}$  и  $k_{4rcd}$  – количество единиц потока в соответствующих дугах транспортной сети.

**Шаг 6.** Выделение областей на интерферограмме, в которых наиболее вероятно нарушение условия гладкости фазовой поверхности, вызванное резкими скачками высоты рельефа, в соответствии с условием  $\tilde{s}_{rc} < \tilde{s}_h$ , где  $\tilde{s}_h$  – некоторый порог,  $\tilde{s}_{rc} = \min\{\tilde{s}(\overline{\mathbf{G}}_{rc}, \overline{\mathbf{G}}_{r+p,c+q}); (q, p) \perp \overline{\mathbf{G}}_{rc}, |q| < W, |p| < W\}$ . Функция  $s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$  вычисляется следующим образом:

$$\tilde{s}(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \begin{cases} s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2), & G > G_B; \\ (s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) - 1) \frac{G - G_H}{G_B - G_H} + 1, & G_H < G \leq G_B; \\ 1, & G \leq G_H, \end{cases}\quad (9)$$

где  $G = \max(|\mathbf{G}_1|, |\mathbf{G}_2|)$ ,  $s(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \mathbf{G}_1 \mathbf{G}_2 / (2G^2) + 0.5$ ,  $G_B$  и  $G_H$  – некоторые пороги.

**Шаг 7.** Назначение весов для восстановления фазовой поверхности по методу наименьших квадратов в соответствии с когерентностью  $\gamma_{rc}$  сигнала на интерферограмме и результатами предыдущего этапа:

$$w_{rc} = \begin{cases} 0, & \tilde{s}_{rc} < \tilde{s}_h \text{ или } \gamma_{rc} < \gamma_h; \\ \frac{\gamma_{rc} - \gamma_h}{\gamma_B - \gamma_h}, & \tilde{s}_{rc} \geq \tilde{s}_{\min} \text{ и } \gamma_h \leq \gamma_{rc} \leq \gamma_B; \\ 1, & \tilde{s}_{rc} \geq \tilde{s}_{\min} \text{ и } \gamma_{rc} > \gamma_B, \end{cases}\quad (10)$$

где  $\gamma_h$  и  $\gamma_B$  – пороги, разделяющие низкую, среднюю и высокую когерентность.

**Шаг 8.** Восстановление фазовой поверхности по методу наименьших квадратов:

$$\sum_{rc} \left( \min(w_{rc}, w_{r,c+1})(G_{rcx} - \hat{G}_{rcx})^2 + \min(w_{rc}, w_{r+1,c})(G_{rcy} - \hat{G}_{rcy})^2 \right) \rightarrow \min.\quad (11)$$

Для иллюстрации улучшения точности развертывания фазы предложенным алгоритмом по сравнению с каждым из классических методов выбрана интерферограмма заповедника Улуру, сформированная по двум изображениям от космического аппарата TerraSAR-X (рис. 1). Результаты развертывания фазы каждым из классических методов в отдельности и предложенным алгоритмом представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что алгоритм обеспечил наибольшую точность развертывания фазы, в то время как каждый из классических методов в отдельности привел к неудовлетворительным результатам. Таким образом, предложенный алгоритм позволяет расширить долю сюжетов, для которых развертывание фазы осуществляется без значительных ошибок.



Рис. 1. Интерферограмма

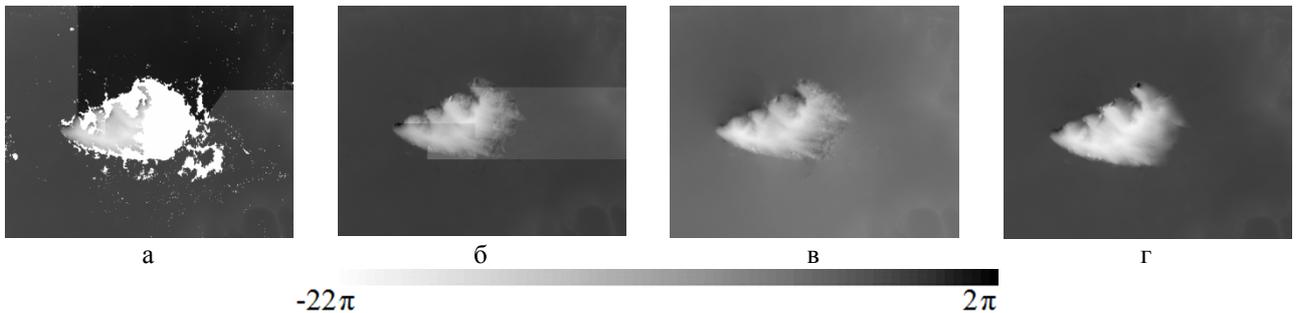


Рис. 2. Результаты развертывания фазы: а – методом отсечения ветвей, б – методом потока минимальной стоимости, в – методом наименьших квадратов, г – предложенным алгоритмом

### Библиографический список

1. Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping // *Radio Science*. 1988. Vol. 23. No. 4. P. 713-720.
2. Constantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998. Vol. 36. No. 3. P. 813-821.
3. Ghiglia D.C., Romero L.A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1994. Vol. 11. No. 1. P. 107-117.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

## ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ОТ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЗЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АПРИОРНЫХ ДАННЫХ

В.А. Ушенкин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, foton@rsreu.ru*

*Аннотация.* Рассматривается задача интерферометрической обработки радиолокационной информации от космических систем ДЗЗ. Исследуются подходы к использованию априорной информации о рельефе для повышения качества результатов интерферометрической обработки. Предлагается использовать в качестве априорной информации глобальные цифровые модели рельефа низкого разрешения, имеющиеся в открытом доступе.

*Ключевые слова.* Интерферометрическая обработка, радиолокационное изображение, интерферограмма, цифровая модель рельефа, когерентность, интерферометрическая база, развертывание фазы.

# INTERFEROMETRIC PROCESSING OF INFORMATION FROM SAR REMOTE SENSING SYSTEMS USING A PRIORY DATA

V.A. Ushenkin

Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, [foton@rsreu.ru](mailto:foton@rsreu.ru)

*Abstract.* The problem of spaceborne SAR data interferometric processing is considered. The approaches to using of a priory information about relief to improve the quality of interferometric processing results are researched. Using of publicly available global low resolution digital elevation models as a priory information is proposed.

*Keywords.* Interferometric processing, SAR image, interferogram, DEM, coherence, interferometric baseline, phase unwrapping.

Интерферометрическая обработка информации от космических систем радиолокационного наблюдения Земли позволяет извлечь данные о высоте точек земной поверхности из разности фаз сигнала двух радиолокационных изображений (РЛИ), полученных с близких орбит. Обработка включает в себя следующие основные этапы:

- 1) определение параметров геометрического соответствия двух РЛИ;
- 2) трансформацию дополнительного РЛИ в координаты основного;
- 3) формирование фазоразностного изображения – интерферограммы;
- 4) расчет интерферометрической базы;
- 5) вычитание из интерферограммы фазы плоского рельефа с учетом интерферометрической базы;
- 6) оценивание когерентности – степени зашумленности фазы на интерферограмме;
- 7) фильтрацию шумов на интерферограмме;
- 8) развертывание фазы – восстановление истинных ее значений из свернутых по модулю  $2\pi$  ;
- 9) пересчет развернутой фазы в высоту с учетом интерферометрической базы;
- 10) трансформацию полученной матрицы высот в заданную картографическую проекцию.

Погрешности промежуточных результатов на выходе каждого этапа приводят к снижению точности конечного продукта или даже к невозможности выполнения дальнейших этапов обработки. Одним из факторов, приводящих к погрешностям, является влияние рельефа, для устранения которого необходимо использование априорной информации.

Влияние рельефа на точность совмещения двух РЛИ представлено на рис. 1. При интерферометрической обработке требуется совмещение исходных изображений с точностью до десятых долей пикселя. В противном случае наблюдается значимое снижение когерентности сигнала на интерферограмме. Из рис. 1 видно, что при больших перепадах высоты в горной местности традиционное совмещение РЛИ полиномиальной моделью приводит к значительным ошибкам даже при малой интерферометрической базе. Следовательно, в полиномиальную модель геометрического соответствия РЛИ необходимо внести поправку, учитывающую реальный рельеф местности. Улучшение когерентности сигнала за счет более точного совмещения РЛИ с учетом рельефа при обработке пары изображений заповедника Улуру (Австралия) проиллюстрировано на рис. 2.

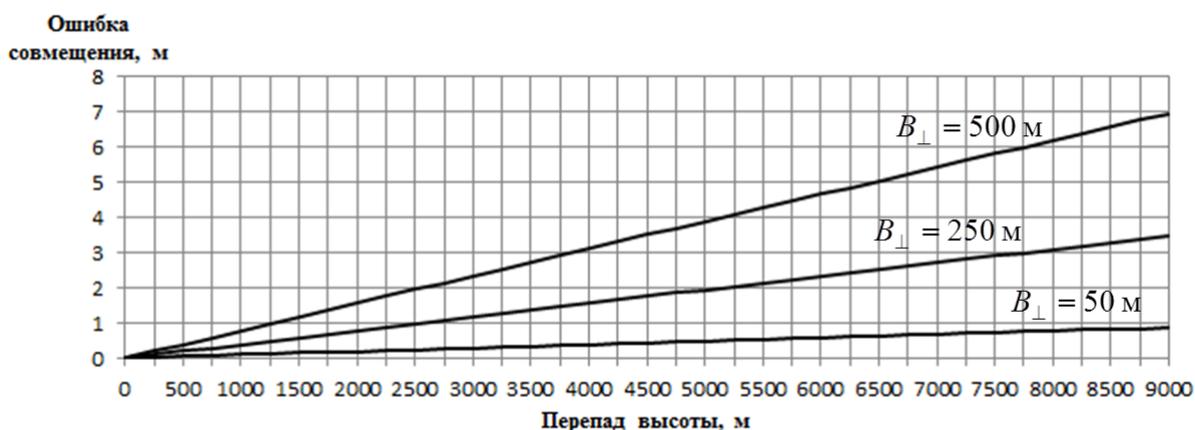


Рис. 1. Зависимость ошибки совмещения РЛИЗ полиномиальной моделью от перепада высоты рельефа при высоте орбиты 500 км, наклонной дальности 700 км и различных значениях перпендикулярной интерферометрической базы  $B_{\perp}$

Влияние рельефа на оценку когерентности представлено на рис. 3. Оно обусловлено тем, что когерентность оценивается в предположении, что в отсутствие шумов амплитуды сигналов на двух совмещенных РЛИ совпадают, а разность фаз сигналов постоянна. При крутом наклоне рельефа предположение о постоянности разности фаз становится некорректным и оценка когерентности получается заниженной. Значительное занижение оценки когерентности приводит к тому, что области на интерферограмме, содержащие высококачественный сигнал, ошибочно признаются сильно зашумленными и игнорируются при дальнейшей обработке. Во избежание этого при оценивании когерентности в случае горной местности необходимо учитывать априорную информацию о наклоне рельефа. Это можно осуществить путем предварительного вычитания из интерферограммы фазы, соответствующей высоте опорного рельефа. Улучшение оценки когерентности за счет учета наклона рельефа при обработке пары изображений заповедника Улуру проиллюстрировано на рис. 4.

Для получения высококачественных результатов при интерферометрической обработке требуется знание величины перпендикулярной интерферометрической базы с дециметровой точностью, которую современные навигационные системы обеспечить не способны. Поэтому требуется уточнение интерферометрической базы, заключающееся в устранении паразитного квазилинейного набега фазы вдоль строки интерферограммы. Чтобы с приемлемой точностью оценить величину этого набега, также необходим учет априорной информации о рельефе.

Вычитание из интерферограммы фазы опорного рельефа, помимо всего прочего, облегчает развертывание фазы и повышает его точность, поскольку формируемая поверхность развернутой фазы становится очень близкой к горизонтальной плоскости. Также появляется возможность определения относительного уровня высот на нескольких участках интерферограммы, изолированных друг от друга областями низкой когерентности.

В качестве априорной информации о рельефе могут использоваться глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) низкого разрешения, имеющиеся в открытом доступе. Примерами таких ЦМР являются SRTM, ASTER GDEM, GMTED2010 и др. Размер проекции пикселя наиболее детальных глобальных ЦМР на сегодняшний день составляет 1 угловую секунду или около 30 м для SRTM и ASTER GDEM. Реальное пространственное разрешение данных ЦМР лежит в диапазоне от 50 до 80 м. Точность по высоте составляет 10–20 м. Наиболее высокой точностью обладает глобальная ЦМР SRTM версии 3, однако она охватывает только территории от 56° ю.ш. до 60° с.ш., т.е. большая часть территории России на ней не представлена. Гораздо большим покрытием обладает ASTER GDEM, однако она получена не по радиолокационным, а по оптическим данным и содержит множество артефактов на водных объектах, ледниках и участках, закрытых облачностью. GMTED2010 составлена из множества различных источников, имеет проекцию пикселя около 250 м, но

реальное пространственное разрешение в отдельных регионах Сибири и Российского Севера может составлять несколько километров. Тем не менее, на отдельных участках GMTED2010 может оказаться точнее, чем ASTER GDEM, из-за артефактов на последней.

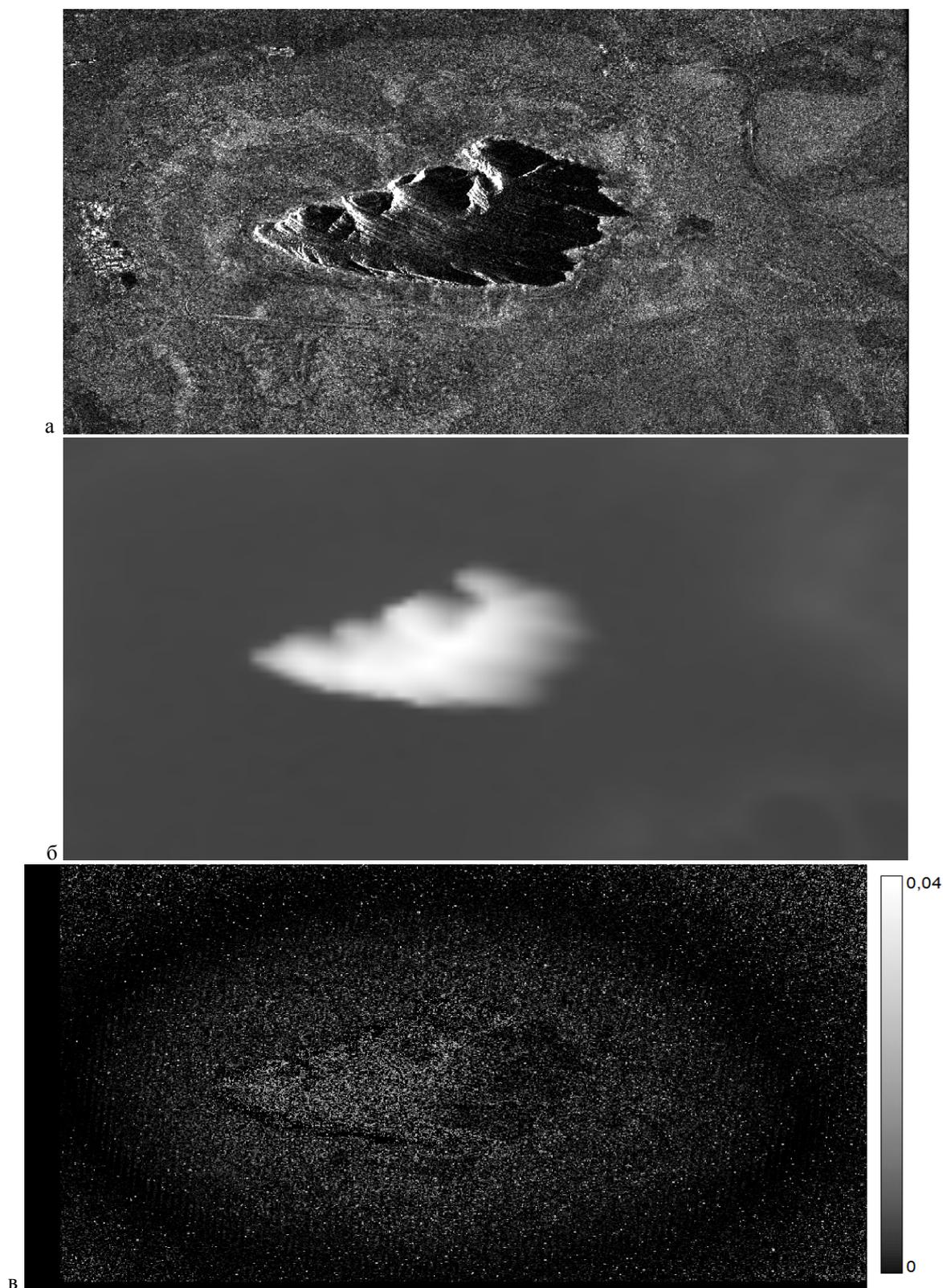


Рис. 2. Основное РЛИ (а), опорный рельеф (б) и улучшение когерентности (в) за счет более точного совмещения

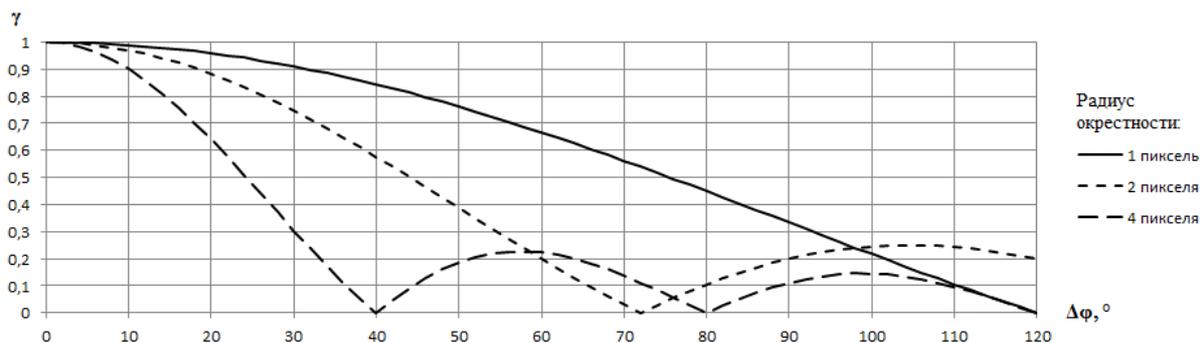


Рис. 3. Снижение оценки когерентности  $\gamma$  из-за наклона рельефа, приводящего к изменению фазы на  $\Delta\varphi$  за один пиксель, при различных радиусах окрестности, в которой производится оценивание

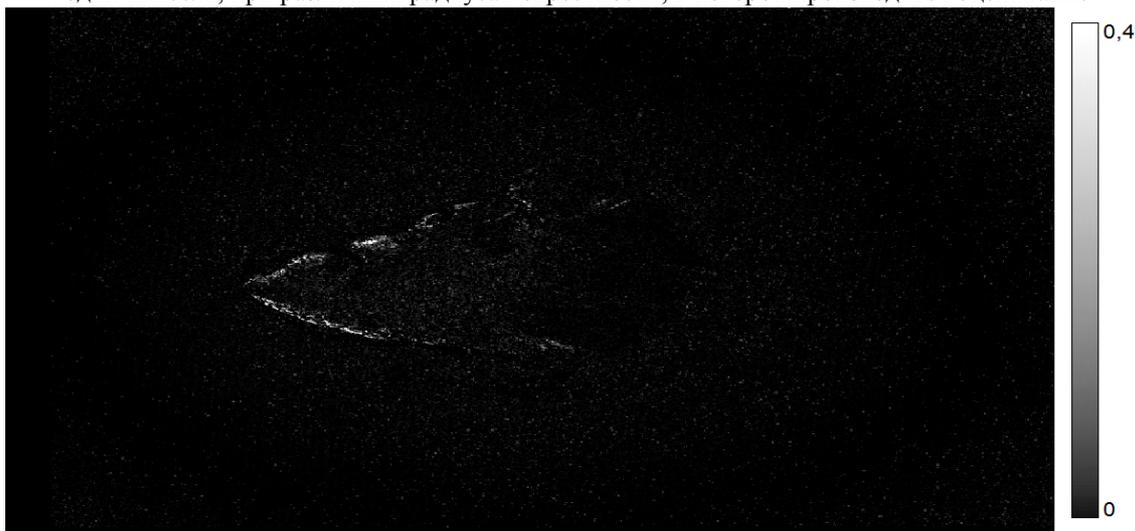


Рис. 4. Улучшение оценки когерентности за счет учета наклона рельефа

Таким образом, в приполярных районах необходимо в качестве априорной информации о рельефе использовать ASTER GDEM или GMTED2010 в зависимости от того, какая из этих ЦМР точнее на интересующем участке земной поверхности, а в средних широтах и вблизи экватора – SRTM.

УДК 004.9: 681.3; ГРНТИ 20.23.27

## МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДАННЫХ В ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.Н. Колесенков, Д.А. Мелкова

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sk62@mail.ru, darya.melkova@gmail.com

*Аннотация.* Рассматриваются наиболее распространенные на сегодняшний день методы кластеризации данных, находящие свое применение в геоинформационных системах. Приводятся результаты теоретических исследований в области применения методов и алгоритмов кластеризации данных в геоинформационных системах.

*Ключевые слова.* Методы кластеризации, метод k-средних, FOREL, метод c-средних, нейронная сеть Кохонена, геоинформационные системы, ГИС.

## METHODS OF DATA CLUSTERING IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

A.N. Kolesenkov, D.A. Melkova

Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, sk62@mail.ru, darya.melkova@gmail.com

*Abstract.* The most common methods of data clustering at the present time, which are applied in geographic information systems are considered. The results of theoretical research in the field of application of methods and algorithms for clustering data in geographic information systems.

*Keywords.* Clustering methods, k-means clustering, FOREL, c-means clustering, Kohonen neural network, Geographic information systems, GIS.

Одним из стремительно развивающихся направлений информатизации общества является создание геоинформационных систем (ГИС). ГИС можно определить как комплекс электронных карт и баз геоданных, объединенных в единую техническую оболочку с приложениями, осуществляющими выполнение запросов к базам данных и отображение результатов на картах. ГИС позволяет объединить стандартные операции над базами данных с возможностями визуализации и пространственного анализа, предоставляемые картами.

Все это позволяет применять ГИС в самом широком спектре задач, связанных с выявлением факторов, влияющих на процессы окружающего мира, а также прогнозированием их последствий и планированием предпринимаемых действий [1, 8].

При наличии большого числа объектов на карте происходит их наложение друг на друга, что значительно затрудняет идентификацию отдельных объектов. Однако точечные объекты, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, могут быть сгруппированы в единый объект. Этот процесс называется кластеризацией [2, 9].

На сегодняшний день существует большое количество методов кластеризации данных, использующих в работе различные меры и метрики.

Выделяют следующие группы методов кластеризации данных.

1. Иерархические методы. Применяются, если целью кластеризации является выявление структуры исходного множества объектов. Делятся на агломеративные и дивизимные.

Агломеративные работают по восходящему принципу. В начале предполагается, что каждый объект исходного множества представляет собой отдельный кластер. В ходе работы соответствующих алгоритмов объекты и их группы объединяются до тех пор, пока все они не будут представлять собой единственный кластер.

Дивизимные предполагают, что исходное множество объектов является одним кластером, который постепенно делится на более мелкие [3].

2. Статистические методы. Наиболее распространенными среди этих методов являются метод  $k$ -средних и FOREL.

Метод  $k$ -средних разделяет множество исходных объектов на заданное число кластеров  $k$ . Основная идея метода заключается в вычислении на каждом шаге центра масс кластера, полученного на предыдущем шаге. Множество объектов снова делится на кластеры на основе того, какой из рассчитанных центров оказался ближайшим. Завершение алгоритма происходит, если на каком-то шаге кластеры перестают изменяться.

Метод FOREL основан на идее объединения объектов в один кластер в областях наибольшего их сгущения.

На каждом шаге из исходного множества случайным образом выбирается объект. Вокруг него, в пределах сферы заданного радиуса  $r$ , выбирается центр тяжести, который становится центром новой сферы. Далее сфера перемещается в сторону сгущения объектов множества. Когда центр сферы стабилизируется, объекты внутри нее помечаются как кластеризованные и убираются. Алгоритм повторяется, пока не будет кластеризовано все множество.

3. Методы, основанные на применении систем искусственного интеллекта. Среди них наиболее известны метод нечеткой кластеризации  $s$ -средних и нейронная сеть Кохонена.

Метод  $s$ -средних является модификацией метода  $k$ -средних. Последний не решает задачу, когда объект принадлежит в равной степени к разным кластерам или же не принадлежит ни одному. Алгоритм  $s$ -средних способен определить вероятность, с которой данный объект принадлежит к тому или иному кластеру [4].

При решении задачи кластеризации методом  $s$ -средних выполняется минимизация целевой функции:

$$E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^c u_{ij} \times \|x_i - c_j\|^2,$$

где  $p$  - количество элементов исходного множества,  $u_{ij}$  – элемент матрицы принадлежности  $U$ , определяющей степень принадлежности  $i$ -го элемента исходного множества объектов  $j$ -му кластеру;  $x_i$  - элемент исходного множества объектов;  $c_j$  - центр  $j$ -го кластера.

Нейронная сеть Кохонена представляет собой двухслойную нейронную сеть, в которой каждый из нейронов входного слоя соединяется с каждым из нейронов выходного слоя. Нейроны выходного слоя называются кластерными элементами, они определяют количество кластеров, на которые система делит данные, поданные на вход. При увеличении числа нейронов второго слоя увеличивается и детализация результатов кластеризации [5].

Сеть Кохонена работает по принципу соревнования  $\square$  наибольший выходной сигнал обращается в единичный, остальные  $\square$  в ноль [6].

Одним из видов сетей Кохонена являются самоорганизующиеся карты Кохонена, которые используются для визуализации и первичной обработки данных. В результате применения карт Кохонена генерируется карта данных, т.е. представление данных на плоскости, на которой можно отобразить несколько слоёв: количество данных, функции и прочее. Такой механизм часто используется в ГИС. Информационные слои отображаются на географических картах.

Карта данных может заменить географическую карту там, где последней не существует. Их отличие заключается в том, что на географической карте близкие объекты имеют близкие координаты, а на карте данных  $\square$  близкие свойства. Способность карт данных заполнять пробелы может использоваться при решении задач прогнозирования [7, 10].

В целом кластеризация является наиболее эффективным способом решения проблемы визуализации и анализа большого количества данных. Она позволяет значительно повлиять на скорость работы геоинформационной системы и, как следствие, уменьшить временные затраты пользователей.

### Библиографический список

1. Что такое ГИС? [Электронный ресурс]. URL: [http://esri-cis.ru/concept\\_arkgisa/press/whatgis.php](http://esri-cis.ru/concept_arkgisa/press/whatgis.php) (дата обращения 12.02.2016)
2. Настройка кластеризации [Электронный ресурс]. URL: <http://doc.arcgis.com/ru/maps-for-sharepoint/esri-maps-web-part/configure-clustering.htm> (дата обращения 12.02.2016)
3. Вятчин Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации: Монография: УП «Технопринт», 2004 – 219 с.
4. Белянушкина М.С. Программно-алгоритмическое обеспечение кластеризации и визуализации многомерных данных сейсморазведки и ГИС. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.
5. Воронцов К.В. Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования. Курс лекций. МГУ, 2007.
6. Колесенков А.Н., Конкин Ю.В. Моделирование нейронных сетей для прогнозирования временных рядов // Динамика сложных систем. - Москва: Радиотехника, 2015. Выпуск № 3, т. 9. С. 10-13.
7. Нейронная сеть Кохонена [Электронный ресурс]. URL: <http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php> (дата обращения 12.02.2016)
8. Колесенков А.Н. Александриков А.В., Наумова М.А., Мелкова Д.А. Информационная поддержка управления водными объектами средствами геоинформационных систем // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28: сборник трудов XXVIII Международной научной конференции. Том 9. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2015. С. 135-138.
9. Колесенков А.Н. Технология поддержки принятия управленческих решений на основе оперативного мониторинга пожарной обстановки // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 157-163.
10. Агафонов А.М., Колесенков А.Н., Сарычев Н.А. Применение метода нечеткой кластеризации элементов аэрокосмических изображений для мониторинга территорий и опасных объектов // Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 14 томах. Том 10. Тамбов: Юком, 2015. С. 16-17.

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ЗАДАЧАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ И ТЕРРИТОРИЙ

А.Н. Колесенков, А.В. Несова

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sk62@mail.ru, arina.nesova@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки новых подходов в математическом моделировании, основанных на генетических алгоритмах для задач экологического мониторинга объектов и территорий.

*Ключевые слова.* Генетические подходы, генетические алгоритмы, экологический мониторинг объектов территорий.

## GENETIC APPROACH FOR ECOLOGICAL MONITORING FACILITIES AND TERRITORIES

A.N. Kolesenkov, A.V. Nesova

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, sk62@mail.ru, arina.nesova@gmail.com*

*Annotation.* The theoretical and practical aspects of the development of new approaches to mathematical modeling based on genetic approaches to problems of environmental monitoring facilities and territories.

*Keywords.* Genetic approaches, genetic algorithms, environmental monitoring facilities territories.

Каждый год на планете Земля происходят различные изменения экологического характера, причинами которых являются несвоевременное обнаружение, предотвращение изменений в экологической среде (нефтяные загрязнения, пожары, изменения в почве и растительном мире, оползни и т.д.). Последствия таких изменений приводят к существенным социальным и экономическим последствиям. Поэтому целесообразным и актуальным является изучение и разработка новых подходов в сфере мониторинга и прогнозирования экологических изменений, основанных на генетике и называемых «генетическими подходами».

Идея создания генетических алгоритмов была предложена Джоном Холландом в конце семидесятых годов XX века. Еще тогда Холланд начал задумываться и интересоваться взаимодействием процессов, протекающих в естественной природе. При разработке генетических алгоритмов используется особенность, заключающаяся в том, что мутируют и изменяются только хромосомы [1].

В основе собственных алгоритмов Джона Холланда лежит обычная последовательность двоичных чисел (рис.1), которые были названы хромосомами, и операторы, отвечающие аналогично процессам, протекающим в естественной природе: приспособленности, мутации, скрещивания, селекции и т.д.

0000 0001 0010 0011 0100 0101 0110 0111  
1000 1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111

Рис. 1. Хромосомы

Благодаря исследованиям и разработкам Холланда, генетические подходы широко применяются в различных сферах науки, технике и экономике [2,6].

В работе предлагается исследовать возможность применения генетических подходов в задачах экологического мониторинга объектов и территорий. В качестве исходных данных будут использованы данные дистанционного зондирования Земли.

В результате проведения теоретических исследований был разработан генетический алгоритм экологического мониторинга объектов и территорий (рис. 1).

В качестве исходных данных берется некоторая экологическая система с определенной местностью и территорией.



Рис. 2. Функциональная схема генетического алгоритма экологического мониторинга

Шаг 1. Формирование функции «инициализации», т.е. создание начальной популяции, состоящей из набора произвольных двоичных чисел, имеющих фиксированную длину. В качестве набора хромосом выступают участки, подвергшиеся экологическим изменениям, например разлив токсичных отходов. Из общего количества участков мы создаем начальную популяцию, выбираем нужные нам участки по определенным признакам [3].

Шаг 2. Выделяем объекты, подвергшиеся загрязнению  $x_i, i = \overline{1, n}$ .

Шаг 3. Находим источники загрязнения, которые оказывают воздействие на экосистему  $y_j$ , где  $j = \overline{1, m}$ .

Шаг 4. Оценка хромосом по критерию «приспособленности» в популяции, при этом поочередно просчитываются все хромосомы. Хромосома считается удовлетворяющей по всем условиям, если значение критерия «приспособленности» больше порогового. Иначе

функция преобразовывается в иную, которая будет отвечать всем требованиям алгоритма. В качестве функции приспособленности применяется степень влияния каждого источника загрязнения на каждый объект экосистемы  $r_{ij}$ , где  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{2, m}$ . Если хромосома не находится, то переходим к шагу 5, иначе – алгоритм завершен.

Условием в нашей задаче выступает оценка влияния источников загрязнения на объекты экосистемы, которая представляет собой суммарное влияние всех источников загрязнения [4]:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^m r_{ij} .$$

Шаг 5. Формирование новой популяции за счет использования операторов селекции, мутации и скрещивания. Переход к шагу 2.

Оператор селекции представляет собой следующее: из набора представленных хромосом выбираются только те, которые будут участвовать в создании нового поколения путем отбора по наивысшим значениям критерия «приспособленности». Для этого используется метод «рулетки», который заключается в том, что все хромосомы обрабатываются поочередно, при этом каждой хромосоме присваивается номер. Чем выше функция приспособленности, тем больше номер [5].

Оператор селекции  $p_s$  рассчитывается по следующей формуле:

$$p_s(ch_i) = \frac{F(ch_i)}{\sum_{i=1}^N F(ch_i)},$$

где  $F(ch_i)$  - значение функции приспособленности хромосомы  $ch_i$ , а  $p_s(ch_i)$  - вероятность селекции хромосомы  $ch_i$ ,  $N$  - длина популяции.

Операторы скрещивания и мутации являются вторичными функциями, которые применяются после использования оператора селекции [7]. И представляют собой две вероятности  $p_c$ -скрещивание и  $p_m$ -мутация.

Скрещивание объединяет новые хромосомы, полученные в результате завершения оператора селекции, в пары, которые наследуют те или иные гены «родителей». Мутация меняет значения набора хромосом на обратное [8].

Разработанный генетический алгоритм удовлетворяет заданным условиям, способен решать задачи экологического мониторинга различной сложности. Использование в качестве исходных данных последовательностей двоичных чисел обеспечит хорошие показатели по скорости вычислений. В качестве задач для дальнейших исследований можно выделить проведение экспериментальных исследований разработанного алгоритма, оценку скорости вычислений и вероятности ложных срабатываний.

### Библиографический список

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л., Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы// М.: Изд-во "Горячая линия – Телеком", 2006. 452 с.
2. John R. Koza., Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection (Complex Adaptive Systems). // MIT Press, 1992. 819 p.
3. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
4. Несова А.В. Технология экологического мониторинга на основе обработки аэрокосмических снимков средствами генетических алгоритмов// Сборник тезисов участников Международного форума "Наука будущего-наука молодых". Том 2. М.: Изд-во "Инконсалт К", 2015. С. 77-79.
5. Колесенков А.Н. Несова А.В. Оценка состояния объектов лесного хозяйства на основе реализации нви-подхода средствами математического моделирования // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28: сборник трудов XXVIII Международной научной конференции. Том 9. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2015. С. 138-141.

6. Колесенков А.Н. Технология поддержки принятия управленческих решений на основе оперативного мониторинга пожарной обстановки // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 157-163.
7. Колесенков А.Н., Несова А.В. Алгоритмы сетевого анализа в геоинформационных системах мониторинга чрезвычайных ситуаций // Вопросы науки: Современные технологии и технический прогресс. (Сборник статей по материалам Международной научно-практической конференции). - Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2015. С. 101-104.
8. Колесенков А.Н., Костров Б.В., Ручкин В.Н. Нейронные сети мониторинга чрезвычайных ситуаций по данным ДЗЗ // Известия ТулГУ. Технические науки. - Тула: ТулГУ, 2014. Вып. 5. С. 220-225.

УДК 004.932.2 ГРНТИ 28.23.15

## ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КАРТОГРАФИИ

А.Э. Касимов, В.А. Суздальцев

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,  
Россия, Казань, aekasimov@kai.ru, svlant@mail.ru*

*Аннотация.* Представлен алгоритм построения трехмерных моделей местности по данным мелкомасштабных карт. Алгоритм использует карты с цветовым кодированием высот.

*Ключевые слова.* Трехмерная модель рельефа местности, географическая карта, карта высот.

## CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL TERRAIN MODEL USING CARTOGRAPHY DATA

A.E. Kasimov, V.A. Suzdaltsev

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,  
Russia, Kazan, aekasimov@kai.ru, svlant@mail.ru*

*Abstract.* An algorithm for constructing three-dimensional terrain models according to small-scale maps. The algorithm uses a color coded map heights.

*Keywords.* Three-dimensional model of the terrain, geographical map, height map.

На всех географических картах присутствует информация о форме рельефа изображенной поверхности в том или ином виде. Различают два основных подхода к изображению рельефа на картах: при помощи изолиний или при помощи цветового кодирования высот

Географические карты хранятся в виде растровых изображений. Алгоритм формирования трехмерных карт местности, использующий растровые изображения географических карт, удобнее всего разбить на несколько последовательных этапов:

1. Загрузка и предварительная обработка изображения карты;
2. Кластеризация цветов карты;
3. Сопоставление значений цвета значениям высоты;
4. Формирование карты высот и сглаживание значений высот;
5. Триангуляция карты высот для создания трехмерной модели.

Под предварительной обработкой понимается устранение артефактов и шумов изображения, которые появляются в процессе его создания.

Объектами кластеризации являются цвета, каждый из которых можно представить в виде точки, имеющей координаты  $(L_i, a_i \text{ и } b_i)$  в цветовом пространстве  $CIE L^*a^*b$  [1]. Цвет в этом пространстве задается при помощи трех компонент:  $L$  – светлота,  $a$  и  $b$  – цветовые составляющие. Центры кластеров так же являются цветами и имеют свои цветовые координаты  $(L_k, a_k, b_k)$ . Задача кластеризации сводится к уменьшению расстояния между цветом центра кластера и цветами, входящими в этот кластер [1]:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sqrt{\alpha(L_{ki} - L_k)^2 + \beta(a_{ki} - a_k)^2 + \gamma(b_{ki} - b_k)^2} \rightarrow \min ,$$

где  $K$  – общее количество кластеров,  $m$  – количество уникальных цветов карты,  $(L_{ki}, a_{ki}, b_{ki})$  – цветовые координаты цвета, принадлежащего кластеру  $k$ ,  $(L_k, a_k, b_k)$  – цветовые координаты центра кластера  $k$ . Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – веса, задающие степень влияния отдельных компонент цветов на результат кластеризации.

В результате выполнения кластеризации должны выполняться следующие условия:

1. Каждому цвету должен быть поставлен в соответствие строго один кластер.
2. Каждому кластеру должен быть поставлен в соответствие как минимум один цвет.

Для разбиения множества цветов изображения на кластеры в таком случае удобно использовать алгоритм кластеризации  $K$ -средних.

В результате выполнения кластеризации каждому цвету из списка цветов карты ставится в соответствие один центр какого-либо кластера. Центр кластера имеет свой цвет, которому ставится в соответствие определенное значение высоты. Таким образом, зная принадлежность точек карты к определенным кластерам, можно определить их высоту.

Карта высот представляет собой матрицу размером  $m \times n$ , в элементах которой хранятся значения высоты в точках поверхности:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}.$$

Каждый элемент матрицы  $a_{ij}$ , где  $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$  можно интерпретировать в виде трехмерной точки в пространстве, так как он несет в себе всю необходимую для этого информацию.

Без дополнительной обработки карта высот содержит точечные шумы, а полученные значения высот являются дискретными, т.е. требуется их сглаживание. В качестве сглаживающего фильтра удобно использовать матрицу свертки [2]. Матрица свертки – это матрица коэффициентов, которая «умножается» на значение элементов карты высот для получения требуемого результата. Для получения сглаженного значения высоты в какой-либо точке карты высот необходимо сложить произведения значений ее соседей и ее значения на коэффициенты матрицы свертки. На рис. 1. продемонстрирован алгоритм получения среднего значения для точки карты высот, имеющей начальное значение равное 84 [2].

Карта высот

12	14	41
43	84	24
2	1	43

Матрица свертки

0,5	0,75	0,5
0,75	1,0	0,75
0,5	0,75	0,5

 $\times \frac{1}{6} = \frac{12 * 0,5 + 14 * 0,75 + 41 * 0,5 + 43 * 0,75 + 84 * 1,0 + 24 * 0,75 + 2 * 0,5 + 1 * 0,75 + 43 * 0,5}{6} = 32,41667$

Рис. 1. Алгоритм получения сглаженного значения высоты точки

На заключительном этапе выполняется триангуляция полученной карты высот и сохранение данных в виде трехмерной модели. Каждый элемент карты высот можно представить в виде точки в трехмерном пространстве (рис. 2). Номер столбца  $i$  интерпретируется как координата  $X$ , номер строки  $j$  – как координата  $Y$ , а значение элемента  $a_{ij}$  – как значение высоты  $Z$ .

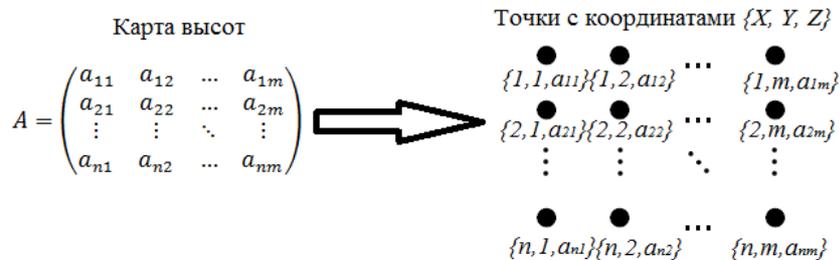


Рис. 2. Представление элементов карты высот в виде точек

Общее количество пространственных точек совпадает с количеством элементов матрицы. Все точки нумеруются (индексируются) последовательно, начиная с единицы. Однако для создания трехмерной модели недостаточно одного лишь набора точек. Необходимо выполнить триангуляцию полученного набора точек, то есть построить

регулярную сетку из множества треугольников. Для этого исходное множество вершин разбивается на группы, состоящие из четырёх ближайших соседних вершин. Каждая такая группа вершин аппроксимируется двумя треугольниками, пример такого разбиения для девяти вершин показан на рис. 3 [3].



Рис. 3. Построение регулярной сетки на множестве вершин (триангуляция)

Таким образом, при помощи описанного алгоритма возможно автоматизировать процесс получения трехмерных моделей рельефа местности по изображениям географических карт.

### Библиографический список

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений – Москва, издательство «Техносфера», 2005. – 1072 с.: ил.
2. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики – Санкт-Петербург, издательство «БХВ-Петербург», 2003. – 560 с.: ил.
3. Edward Angel Interactive Computer Graphics , A Top-Down Approach with OpenGL Second Edition – University of New Mexico, 2001 – 592 p.

УДК 004.932.2; ГРНТИ 20.53.19

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫХ СВАЛОК МУСОРА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Н.В. Акинина\*, М.В. Акинин\*\*, А.И. Таганов\*\*\*

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, \*natalya.akinina@gmail.com, \*\*akinin.m.v@gmail.com, \*\*\*alxtag@yandex.ru*

*Аннотация.* Обоснована важность проведения мониторинга по выявлению несанкционированных свалок мусора посредством использования данных дистанционного зондирования Земли. Описан состав системы искусственного интеллекта, выполняющей обработку спутниковых снимков. Рассмотрен алгоритм детектирования несанкционированных свалок мусора. Приведены результаты функционирования описанного алгоритма.

*Ключевые слова.* Мониторинг, дистанционное зондирование Земли, спутниковые снимки, сегментация, текстурные признаки, распознавание образов, классификация, маска.

## DETECTION OF UNAUTHORIZED LANDFILL SITES BASED ON AN ANALYSIS OF DATA PROCESSING OF REMOTE SOUNDING OF THE EARTH

N.V. Akinina\*, M.V. Akinin\*\*, A.I. Taganov\*\*\*

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Ryazan, Russia, \*natalya.akinina@gmail.com, \*\*akinin.m.v@gmail.com, \*\*\*alxtag@yandex.ru*

*Abstract.* It substantiates the importance of monitoring to detect unauthorized landfills through the use of remote sounding of the Earth. Discloses a system of artificial intelligence, the processing of satellite images. An algorithm for detecting unauthorized landfills. The results of operation of the described algorithm.

*Keywords.* Monitoring, remote sounding of the Earth, satellite pictures, segmentation, textural features, pattern recognition, classification, mask.

Задача выявления, картографирования, мониторинга мест складирования различных видов отходов — одна из наиболее актуальных в сфере охраны окружающей среды. С одной стороны, это связано с серьезным негативным воздействием свалок на все компоненты ландшафта за счет физического, химического, биологического загрязнения, а также

ухудшением качества жизни населения за счет резкого снижения эстетической ценности природных комплексов и возрастания техногенных рисков. С другой стороны, это обусловлено все большей актуальностью проблемы на фоне длительного отсутствия контроля в этой сфере, резкого снижения экологической культуры населения, возросшего уровня производства и потребления, что вместе с бурным развитием композиционных, строительных и упаковочных материалов делает проблему стихийных свалок одной из наиболее острых.

Несанкционированные свалки по своей сути — очень многочисленные, крайне пространственно распределенные и в основном небольшие по площади объекты. Вокруг одного поселка городского типа может располагаться от нескольких десятков до полутора сотен мест несанкционированного размещения твердых отходов. Вокруг городов это число возрастает на порядок. В связи с этим полный наземный контроль связан с огромными финансовыми, временными, человеческими затратами, а во многих ситуациях просто невозможен [1].

Для мониторинга используются космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения (0,5–1 м). К ним относятся данные со спутников WorldView-1,2, GeoEye, Pleiades-1A,1B, QuickBird, Ikonos и ряда других. Детальность и геометрическая точность этих снимков позволяют уверенно дешифровать свалки, проводить измерения (линейные размеры, площадь), определять координаты и типы свалок (бытовые, промышленные, строительные, сельскохозяйственные, лесохозяйственные и др.) [2].

Для свалок характерна неправильная форма, вытянутость вдоль линейных объектов — авто- и железных дорог, склонов речных долин, берегов озер и болот. Содержащиеся в свалках материалы с высокими коэффициентами отражения дают резкое повышение яркости на космических снимках — белые, светло-желтые, светло-голубые оттенки. Исключение составляют менее отражающие сельскохозяйственные, лесохозяйственные и некоторые типы промышленных свалок. Важнейший признак, отображающийся на снимках сверхвысокого разрешения, — мелкозернистая текстура (рисунок 1), образуемая за счет неровностей поверхности свалок, слагаемых различными предметами. Несколько более крупная текстура характерна для промышленных и сельскохозяйственных свалок.



Рис. 1. Разновременные снимки

Для упрощения и ускорения работы по поиску свалок, а также для повышения точности их выявления по снимку на этапе дешифрирования используются знания о возможном расположении свалок по отношению к антропогенным и природным объектам. С использованием космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (рисунок 1) можно визуально определять и картографировать свалки размером от 10 кв. м с очень большой степенью вероятности (до 90–95%).

Для установления фактов сокращения или увеличения площади ранее выявленных свалок, а также для контроля выполнения мероприятий по их рекультивации очень эффективно применение разновременных композитов (рисунок 2) — изображений, сформированных из двух разновременных космических снимков на одну и ту же территорию. На таких результирующих изображениях очень контрастно выделяются именно

изменившиеся в площадном отношении объекты, в том числе и свалки, что гарантирует тотальный, безошибочный и малозатратный мониторинг.

Следует отметить, что кроме измерения площадных характеристик свалок по одиночным космическим снимкам, современные системы ДЗЗ позволяют измерять высоту тела свалки (точность до 1 м), а также рассчитывать объем складированного мусора за счет выполнения съемки в стереоскопическом режиме (по паре космических снимков).

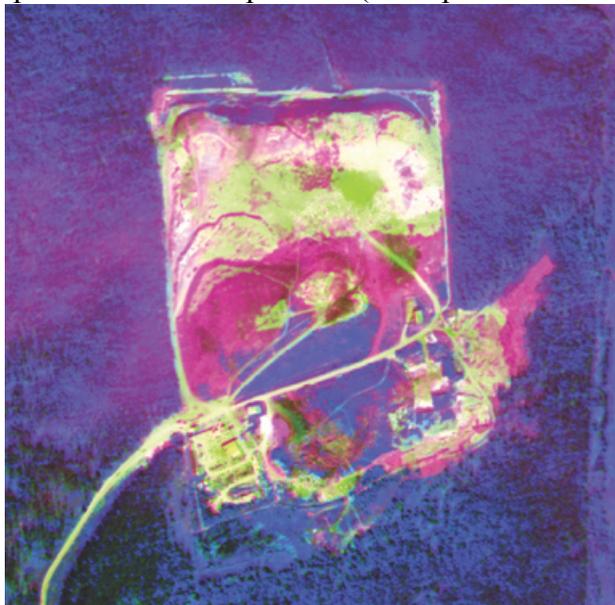


Рис. 2. Мультивременной композит

Данные ДЗЗ (спутниковые снимки), получаемые от сенсоров, можно представить в виде изображения (спутникового снимка)  $B$ :

$$B = \{b_{ij}\};$$

$$b_{ij} = \{b_{ij1}, \dots, b_{ijk}, \dots, b_{ijK}\}; b_{ijk} \in [-1, 1];$$

$$i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J}; k = \overline{1, K};$$

$$I, J, K \in N,$$

где

- $b_{ij}$  - пиксель спутникового снимка  $B$ , находящийся в  $i$ -ой строке пикселей, в  $j$ -м столбце;
- $b_{ijk}$  - спектральная яркость пикселя  $b_{ij}$  в  $k$ -ом спектральном канале;
- $I$  - количество строк пикселей в спутниковом снимке  $B$ ;
- $J$  - количество столбцов пикселей в спутниковом снимке  $B$ ;
- $K$  - количество спектральных каналов в спутниковом снимке  $B$ .

Спектральные яркости  $b_{ijk}$  должны быть масштабированы в диапазон  $[-1; 1]$  для удобства дальнейшей работы с ними. Для масштабирования спектральных яркостей из первоначального диапазона уровней квантования может быть использовано линейное преобразование, которое для  $Q$ -и уровней имеет вид:

$$b_{ijk} = \frac{\hat{b}_{ijk}}{Q/2} - 1;$$

$$\hat{b}_{ijk} \in [0; Q]; \hat{b}_{ijk} \in Z,$$

где  $\hat{b}_{ijk}$  - первоначальное (квантованное) значение спектральной яркости [3].

На вход системы искусственного интеллекта поступает численное представление спутникового снимка  $B$ . Далее функционируют последовательно следующие модули:

- Модуль выделения на спутниковом снимке характерных образов (функция сегментации) — выделяет на спутниковом снимке интересующие объекты и

- формирует из них отдельное множество;
- Модуль выделения характерных признаков на образе (функция расчета текстурных признаков) — описывает образы посредством описания их текстурных признаков (текстурные признаки Харалика, энергетические характеристики Лавса) и на выходе дает совокупность векторов, состоящих из численного представления описанных текстурных признаков [4];
  - Модуль выделения основных признаков образов (функция сокращения размерности векторного пространства) — производит выделение наиболее ценной информации с целью экономии затрачиваемых на обработку ресурсов и сокращения времени обработки;
  - Модуль классификации характерных образов (функция распознавания образов) — распознает по имеющимся векторам текстурных признаков интересующие области (в данном случае — несанкционированные свалки) и делит входную информацию на классы в зависимости от наличия областей с отходами [5];
  - Модуль выделения на образе интересующей области (функция выделения) — выделяет для большей наглядности на изображениях области, заполненные мусором.



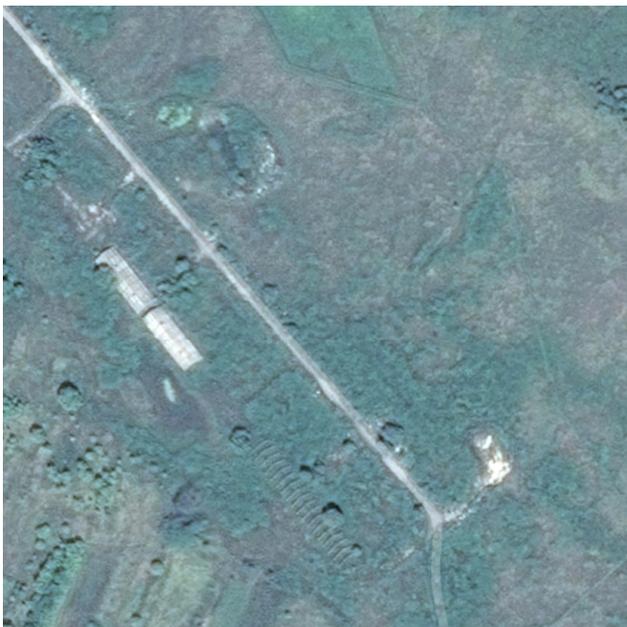
Рис. 3. Алгоритм детектирования несанкционированных свалок мусора

Схема алгоритма детектирования несанкционированных свалок мусора представлена на рисунке. Алгоритм состоит из следующих этапов:

5. выделение на спутниковом снимке характерных образов с использованием многомерной карты Кохонена;
6. описание выделенных образов с использованием текстурных признаков Харалика;
7. понижение размерности пространства признаков с использованием PCA-сети и автоэнкодера;
8. классификация характерных образов при помощи машины опорных векторов;
9. выделение интересующих областей на изображении.

Описанный алгоритм детектирования несанкционированных свалок позволил эффективно выделять места скопления отходов с точностью 92 - 95 % при времени обработки 2,8 — 3,5 секунды на один кадр.

Результат выполнения описанного алгоритма приведен на рисунке 4.



Необработанный спутниковый снимок



Обработанный спутниковый снимок

Рис. 4. Пример спутникового снимка (до и после обработки)

### Библиографический список

1. Раменский региональный экоцентр [Электронный ресурс]: URL: <http://www.rrec.ru>, Дата обращения: 04.02.2016.
2. Издание о высоких технологиях [Электронный ресурс]: URL: <http://www.cnews.ru>, Дата обращения: 08.02.2016.
3. Акинин М.В. Модели и алгоритмы моделирования интеллектуальной системы автоматического совмещения данных дистанционного зондирования Земли и цифровых карт местности (диссертация). Рязань, 2014 г.
4. Гонсалес Р. Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
5. С. Хайкин. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр.: Пер. с англ. М.: ООО .И.Д. Вильямс., 2006.

УДК 004.932; ГРНТИ 20.53.19

## РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС АЛГОРИТМА ПОИСКА КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК НА ИЗОБРАЖЕНИИ

**А.А. Абдухаликов\***, **П.В. Беляков\*\***, **М.Б. Никифоров\*\*\***

\* Научно-производственное объединение программные комплексы реального времени,  
Россия, Москва, [abdukhaliakov.artem@mail.ru](mailto:abdukhaliakov.artem@mail.ru)

\*\* Научно-производственное объединение программные комплексы реального времени,  
Россия, Москва, [pybel@rambler.ru](mailto:pybel@rambler.ru)

\*\*\* Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru](mailto:nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru)

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы реализации на ПЛИС алгоритма поиска ключевых точек на изображении. На основе функции Лапласиана Гауссиана при помощи сингулярного разложения матрицы ядра функции строится аппроксимирующий ее дискретный фильтр, позволяющий для поиска ключевых точек на изображении выполнить на ПЛИС операцию свертки фильтра с изображением в реальном масштабе времени и с приемлемой затратай вычислительных ресурсов ПЛИС.

*Ключевые слова.* Ключевые точки, сингулярное разложение, Лапласиан Гауссиана

## KEY POINTS DETECTION ON THE IMAGE

A.A. Abukhalikov\*, P.V. Belyakov\*\*, M.B. Nikiforov\*\*\*

\* Moscow Institute of Physics and Technology, State University,  
Moscow, Russia, abdukhalikov.artem@mail.ru

\*\* Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, pvbel@rambler.ru

\*\*\* Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, nikiforov.m.b@evm.rsreu.ru

*Abstract.* The questions of key points detection algorithms on the image on FPGA base are considered. Filter kernels of key points detection are computed using singular value decomposition Laplacian of Gaussian function. Such decomposition allow realize filter with image convolution in real time using FPGA.

*Keywords.* Key points, singular value decomposition, Laplacian of Gaussian.

Существует большой класс алгоритмов, предназначенных для детектирования уникальных элементов на изображении, которые локализованы в некоторой области вокруг ключевой точки. Сами ключевые точки имеют свойство инвариантности к геометрическим преобразованиям – к повороту, сдвигу и масштабированию. Т.е. это некоторая локализованная область на изображении, которая не исчезает при преобразовании изображения. Поиск ключевых особенностей необходим, в первую очередь, для уменьшения размера обрабатываемых данных, следовательно, качество выдаваемых результатов может сильно зависеть от размеров и свойств фильтра, предназначенного для обнаружения ключевых точек.

На текущий момент данный класс алгоритмов очень активно развивается и имеются попытки внедрения этих алгоритмов в системы детектирования объектов в реальных условиях и в реальном масштабе времени.

Недостатком данных алгоритмов является высокое требование к вычислительным ресурсам[5]. Поэтому на процессорах общего назначения в приложениях, требующих реального времени исполнения, реализация данных алгоритмов довольно затруднительна. Еще одним недостатком алгоритмов поиска ключевых точек является их нестабильное поведение. Дело в том, что оптимизация процесса вычисления, которая применяется в отношении почти всех алгоритмов детектирования ключевых точек, направлена не только на уменьшение размера изображения, на которых ищется особенность, а также на аппроксимацию цифровыми фильтрами довольно сложных линейных функций, применяемых для поиска ключевых точек на изображении.

В статье проведено исследование функций алгоритма поиска ключевых точек на изображении, с целью его реализации на ПЛИС, как наиболее перспективной вычислительной среды для реализации подобного класса алгоритмов в реальном масштабе времени.

В цифровой обработке изображений для поиска ключевых точек на изображении часто применяется дискретный фильтр на основе функции Лапласиана Гауссиана  $\Delta^2 G(x, y, \sigma) = ((x^2 + y^2)/\sigma^4 - 2/\sigma^4)G(x, y, \sigma)$ , полученной действием оператор Лапласа  $\Delta f = \nabla^2 f = \partial^2 f / \partial x^2 + \partial^2 f / \partial y^2$  на функцию Гаусса  $f(x) = 1/\sigma\sqrt{2\pi} \exp[(x - \mu)^2 / 2\sigma^2]$ .

Выбор реализации дискретного фильтра на основе функции Лапласиана Гауссиана объясняется очень хорошими пространственно – масштабными свойствами этой функции[1].

Вместе с тем, операция вычисления отклика  $\text{resp}_{m,n}$  некоторого дискретного фильтра А размерности  $N \times N$  на изображении I в точке (m,n) определяется как:

$$\text{resp}_{m,n} = \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} I(m+i, n+j)A(i, j). \quad (1)$$

Для данного выражения количество операций умножения очевидно равно  $N^2$ , что создает в силу “дороговизны” использования умножителей существенные препятствия для реализации фильтрации изображения в реальном масштабе времени даже на ПЛИС.

Путь в преодолении данного затруднения лежит в построении такого фильтра, который бы позволил выполнять операцию свертки фильтра с изображением с требуемым

качеством, за приемлемое время и с минимальной затратой ограниченных ресурсов вычислительной системы, в данном случае ПЛИС.

Одним из вариантов решения такой задачи с взаимоисключающими условиями является привлечение класса линейных фильтров, которые называют *сепарабельными*.

Свойство сепарабельности фильтра означает, что матрицу  $A$  ядра линейного преобразования фильтра можно разложить как произведение двух векторов:

$$A_{i,j} = p_i q_j; \quad A = \vec{p} \vec{q}^T. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получаем:

$$\text{resp}_{m,n} = \sum_{i=-N/2}^{N/2} p_i \sum_{j=-N/2}^{N/2} I(m+i, n+j) q_j.$$

Таким образом, для получения отклика фильтра  $\text{resp}_{m,n}$  в точке  $(m,n)$  при сворачивании изображения сначала с вектором  $p$ , а затем с вектором  $q$ , требуемое количество операций умножения уменьшается до  $2N$ .

К сожалению, класс сепарабельных фильтров довольно узкий, но в линейной алгебре существует теорема, согласно которой любая матрица может быть разложена в сумму сепарабельных матриц при помощи *сингулярного разложения*[2].

Сингулярное разложение для матрицы  $A$  имеет вид:  $A = \sum_{i=1}^N \sigma_i \vec{p}_i \vec{q}_i^T$ ,

$$A = (p_1, p_2, \dots, p_n) \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \sigma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1^T \\ q_2^T \\ \vdots \\ q_n^T \end{bmatrix} = p_1 \sigma_1 q_1^T + p_2 \sigma_2 q_2^T + \dots + p_n \sigma_n q_n^T,$$

Где  $p_i$  и  $q_i$  – векторы размерности  $N$ , а  $\sigma_i$  – сингулярные числа, для которых всегда верно соотношение  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_{N-1}$ .

Пример разложения ядра функции Лапласиан Гауссиана (Laplacian of Gaussian, LOG) можно найти в работе [3].

Данное разложение упрощает вычисление оператора свертки изображения  $I$  с линейным фильтром (коэффициенты фильтра есть матрица  $A$ ). Если все числа  $\sigma_i = 0$ , при всех  $i > M$ , то на каждый пиксель необходимо выполнить  $2 * M * N$  операций умножения при подсчете отклика фильтра.

Слагаемое  $p_i \sigma_i q_i^T$  сингулярного разложения ядра фильтра  $A$  с меньшим индексом  $i$  добавляет наибольший вес в аппроксимацию функции и содержит наибольшую информацию о функции. Варьируя количество используемых слагаемых, становится возможным задать качество приближения к исходной функции и влиять на занимаемый размер ресурсов ПЛИС.

Ошибку аппроксимации можно выразить как  $e = 1 - \sum_{i=1}^k \sigma_i / \sum_{i=1}^n \sigma_i$ .

Для хранения ядра  $A$  функции требуется  $n^2$  элементов, вместе с тем векторы  $p$  и  $q$  требуют  $n^2$  элементов каждый, а диагональная матрица  $\sigma$  требует  $n$  элементов. Для хранения всего сингулярного разложения требуется  $2n^2 + n$  элементов, однако для хранения одного слагаемого сингулярного разложения, которое применяется для аппроксимации функции Лапласиан Гауссиана, требуется всего лишь  $2n + 1$  элементов.

Т.о. предложенный дискретный фильтр, полученный с помощью сингулярного разложения функции Лапласиан Гауссиана, позволяет реализовать его на ПЛИС с заданной точностью, быстродействием и учетом имеющихся ресурсов ПЛИС.

Для того чтобы распознавать объекты на изображении различных размеров, необходимо построить многомасштабную модель обработки изображений[4], которая состоит из фильтров различных размеров, работающих одновременно на данном изображении. Каждый фильтр выдает на своем выходе отфильтрованное изображение, которое затем нормируется исходя из среднего значения отклика данного фильтра по всему изображению. Нормированный отклик каждого фильтра далее поступает на алгоритм поиска

локальных максимумов. Все точки на данном нормированном отфильтрованном изображении, которые являются локальными максимумами по определенным критериям, являются точками интереса и передаются далее для дополнительной обработки. Области интереса вокруг каждой найденной ключевой точки снабжаются так называемыми дескрипторами, вычисленными определенным образом, которые подвергаются дальнейшей обработке, как правило, уже во временном пространстве. Данная работа предполагает дальнейшее развитие на основе приведенных выше идей.

### **Библиографический список**

1. Witkin A., Terzopoluos D., M.Kass Signal matching through scale. //International Journal of Computer Vision, 1987, pp 133-144
2. Gostman C., Constant-time filtering by singular value decomposition. // Computer Graphics Forum, Volume 13, 1994, pp. 153-163.
3. Convolution with separable masks for early image processing. //Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 31, № 3, 1985, p. 399. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI: учеб. пос. М. : Изд-во МГУ, 2004. 71 с.
4. Елесина С.И., Никифоров М.Б., Логинов А.А., Костяшкин Л.Н. Монография под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. М.: Радиотехника, 2015. 208 с.
5. Новиков А.И., Муратов Е.Р., Логинов А.А., Никифоров М.Б. Сокращение вычислительной сложности совмещения изображений в авиационных системах технического зрения // Международный междисциплинарный научный журнал Динамика сложных систем. №1, т.9, 2015. С. 33-40.

## СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

УДК: 621.385; ГРНТИ: 47.29.37

### КАТОДНЫЕ УЗЛЫ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

В.А. Смирнов, П.И. Акимов, В.В. Антонов, Д.А. Гладышев, А.В. Грызлов, Ю.А. Потапов, В.Н. Сигалаев,  
А.С. Симонов, Ю.С. Судаков, В.Г. Чудин

Научно-производственное предприятие «Торий»,  
Россия, Москва, torlab144@mail.ru

*Аннотация.* Рассматриваются несколько типов КПУ с металлопористыми эмиттерами и повышенной эмиссионной долговечностью для ускорителей электронов.

*Ключевые слова.* Ускорители электронов, катодные узлы, металлопористый катод, плазменная технология изготовления эмиттера, долговечность.

### CATHODE ASSEMBLIES FOR ELECTRON ACCELERATOR

V.A. Smirnov, P.I. Akimov, V.V. Antonov, D.A. Gladyshev, A.V. Gryzlov, Y.A. Potapov, V.N. Sigalaev, A.S. Simonov, Y.S. Sudakov, V.G. Chudin

NPP "Toriy",  
Moscow, Russia, torlab144@mail.ru

*Abstract.* The article explores the several metal porous cathodes with long lifetime for electron accelerator.

*Keywords.* Electron accelerator, cathode assemblies, metal porous cathodes, plasma emitter fabrication technology, long lifetime.

Ускорители электронов, рассматриваемые в данной работе, применяются для дефектоскопии, в досмотровой технике и в многофункциональных станциях электронной обработки. Основные требования, предъявляемые к катоду, это виброустойчивость, т.к. ускорители могут быть закреплены на конструкциях, движущихся в процессе работы, и долговечность, связанная с высокой стоимостью приборов. Необходимую долговечность не менее 10000 часов предполагается получить за счет использования плазменной технологии формирования вольфрамовой матрицы эмиттера [1, 2].

Например, для проверки качества сварных труб при толщине шва 300 мм используется ускоритель с КПУ-1. Пушка данного ускорителя выполнена в виде триодной системы, включающей катод, управляющий электрод (с положительным потенциалом  $U_{упр} = 4,5$  кВ относительно катода) и анод, ускоряющий электроны пучка до энергии 40 кэВ. Пушка работает в импульсном режиме с  $\tau_{имп} = 5$  мкс, ток  $I_{имп} = 400$  мА, на частоте 200 Гц ÷ 400 Гц. На рисунке 1 изображена схема КПУ-1 (а) и его внешний вид (б).

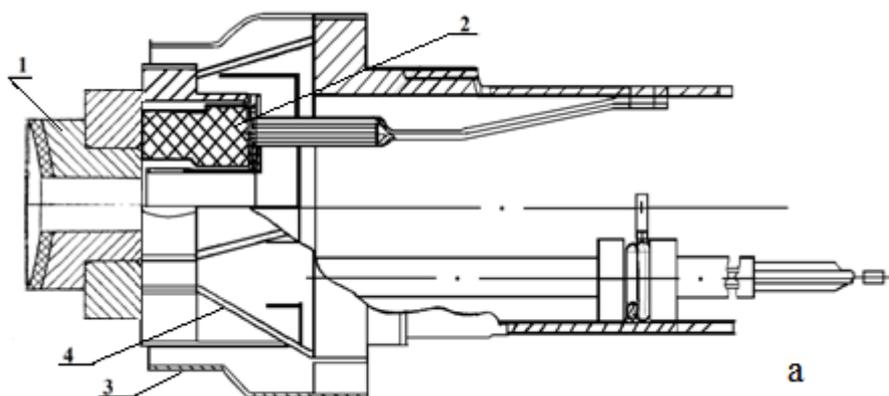


Рис. 1. КПУ-1: а – схема КПУ-1: 1 – эмиттер, 2 – подогреватель, 3 – блок экранов, 4 – стержневые тепловые развязки, б – внешний вид КПУ-1

Поток электронов с катода ускоряется в электродинамической структуре резонаторов и при попадании на вольфрамовую мишень обеспечивает рентгеновское излучение на выходе при энергии электронов  $U_{\text{вых}}=6-8$  МэВ и диаметре пучка 1 мм. Большие напряжения ускоряющей структуры приводят к бомбардировке катода ионами остаточных газов. Для предотвращения разрушения катода в его центре сделано отверстие диаметром 1,2 мм, через которое ионы попадают на обратный коллектор под нулевым потенциалом и рассеивают свою энергию в тепло.

На рисунке 2 представлена схема эмиттера. Основание (1) изготавливается по традиционной технологии металлопористых катодов, а поверхностная вольфрамовая матрица толщиной 100 мкм (2) – по плазменной [2]. Плазменное напыление снижает скорость испарения (рис. 3) [3] и увеличивает однородность эмиссии, что, наряду с малой плотностью тока, позволяет понизить рабочую температуру. Выбор металлопористых катодов обусловлен также необходимостью обеспечения высокой электропрочности.

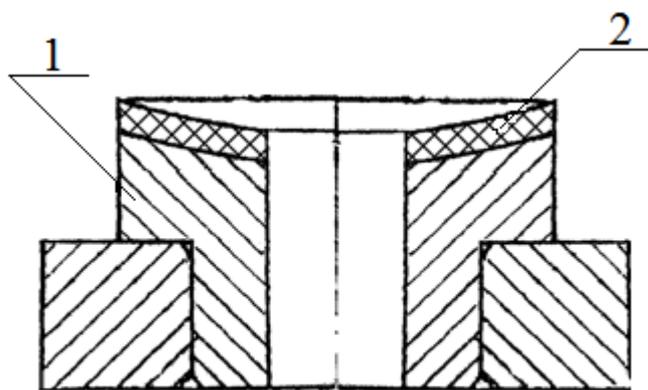


Рис. 2. Схема эмиттера с плазменным покрытием, 1 – основание, изготовленное по традиционной технологии, 2 – плазменное покрытие

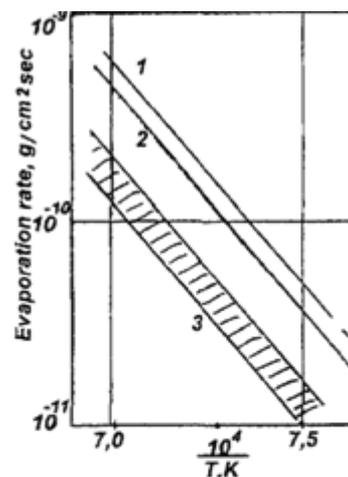


Рис. 3. Зависимости скорости испарения бариевой компоненты от температуры следующих катодов [3]: 1 - ММ (W+Os); 2 - СММ (W+Os/Os); 3 – плазменный катод после 7500 часов работы при 1380К

Стержневые тепловые развязки и экраны обеспечивают высокую экономичность КПУ и его термоциклическую (включение-выключение накала) устойчивость.

Катод большую часть времени находится в режиме готовности (80% по накалу), а при просвечивании изделий накал достигает полной мощности.

Характеристики КПУ-1:

диаметр металлопористого эмиттера 6 мм;

ток накала  $I_{\text{нак}}=5$  А;

напряжение накала  $U_{\text{нак}}=5,5-6$  В;

плотность эмиссионного тока  $j=1,5$  А/см<sup>2</sup>.

Проведенное пирометрирование (см. рис. 4) показывает, что рабочая температура эмиттера не превышает 1000 °С. Прогнозируемая эмиссионная долговечность такого КПУ при условии вакуума в приборе не хуже  $1 \cdot 10^7$  мм рт.ст., не менее 100 тыс. часов.



Рис. 4. Данные пирометрирования КПУ-1

Другой КПУ-2 разрабатывался на замену катода в пушке ускорителей в импортных системах досмотра. Это накладывает особые требования – необходимость воспроизводства параметров источника питания и геометрических размеров КПУ. Пушка имеет диодную структуру с ускоряющим напряжением  $U_a=14 - 16$  кВ. Металлопористый эмиттер диаметром 3 мм изготавливается по плазменной технологии, схема которого показана на рисунке 5.

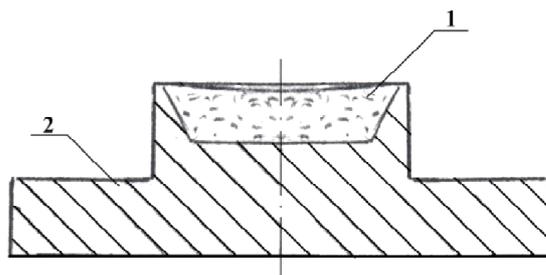


Рис. 5. Металлопористый эмиттер, изготовленный по плазменной технологии: 1 – вольфрамовая губка, 2 – молибденовый керн

Параметры накала: ток  $I_{нак}=3$  А, напряжение  $U_{нак}=4 - 4,4$  В. Импульсный ток с эмиттера  $I_{имп}=200$  мА при плотности тока  $2,8$  А/см<sup>2</sup>. К этим приборам предъявляются требования по долговечности не менее 15000 часов. Досмотровые приборы работают попеременно на частотах 200 и 400 Гц. Ускоряющее напряжение в пушке 16 кВ, на выходе ускорителя энергия электронов составляет 4 МэВ. На рисунке 6 представлена схема, а на рисунке 7 собранный КПУ-2 без наружного экрана.

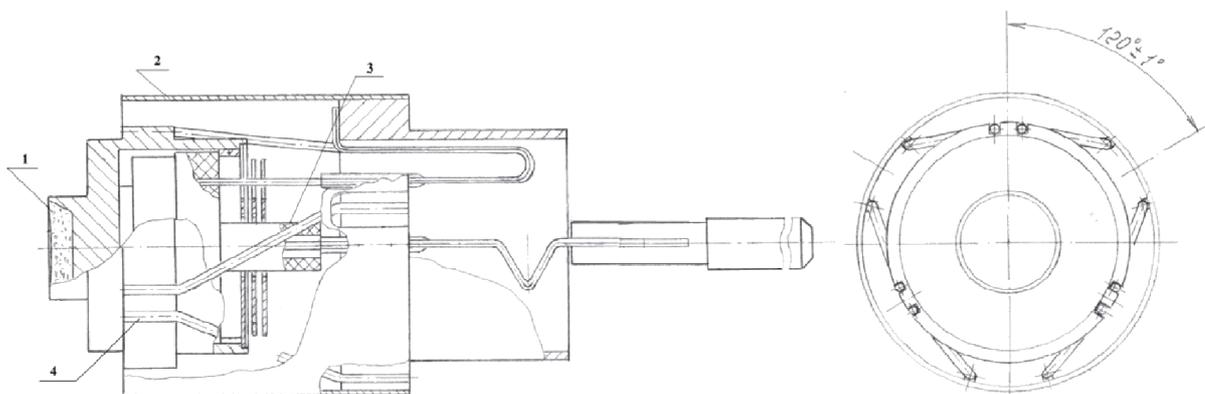


Рис. 6. Схема КПУ-2: 1 – эмиттер, 2 – блок экранов, 3 – подогреватель, 4 – стержневые тепловые развязки

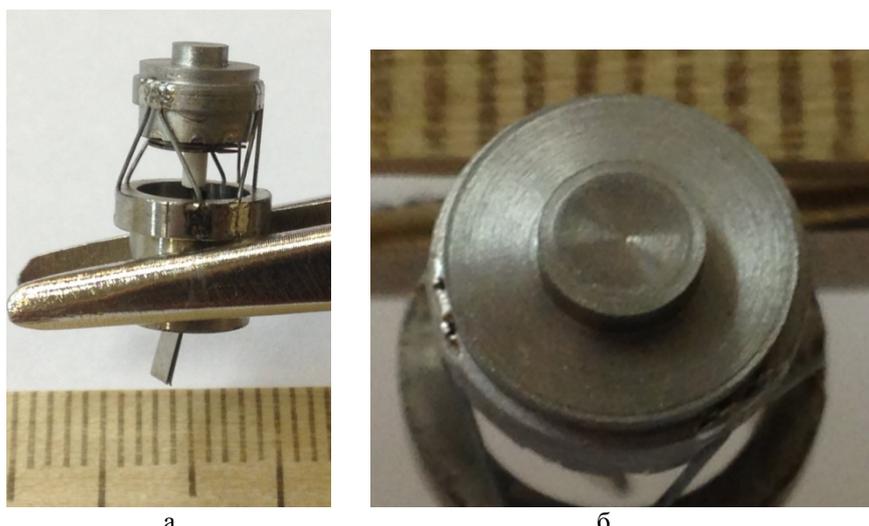


Рис. 7. Внешний вид КПУ-2: а – вид сбоку (зажат пинцетом), б – вид сверху

Третий КПУ-3 входит в состав излучателя, предназначенного для комплектования мощных линейных ускорителей электронов, составляющих основу многоканальных, многофункциональных станций электронной обработки [4], используемых, например, для стерилизации потоком электронов различных продуктов питания и медицинских изделий. Пушка представляет собой триодную структуру с параметрами  $U_{упр} = 12,9$  кВ,  $U_a = 50$  кВ, которая работает в импульсном режиме с  $\tau_{имп} = 15$  мкс, ток  $I_{имп} = 800$  мА, на частоте 400 Гц. Электроны с энергией 50 кэВ из пушки попадают в ускоряющую структуру, где 60% электронов захватывается в процессе ускорения. Выходная энергия электронов может регулироваться от 7 до 10 МэВ. Схема КПУ-3 представлена на рисунке 8.

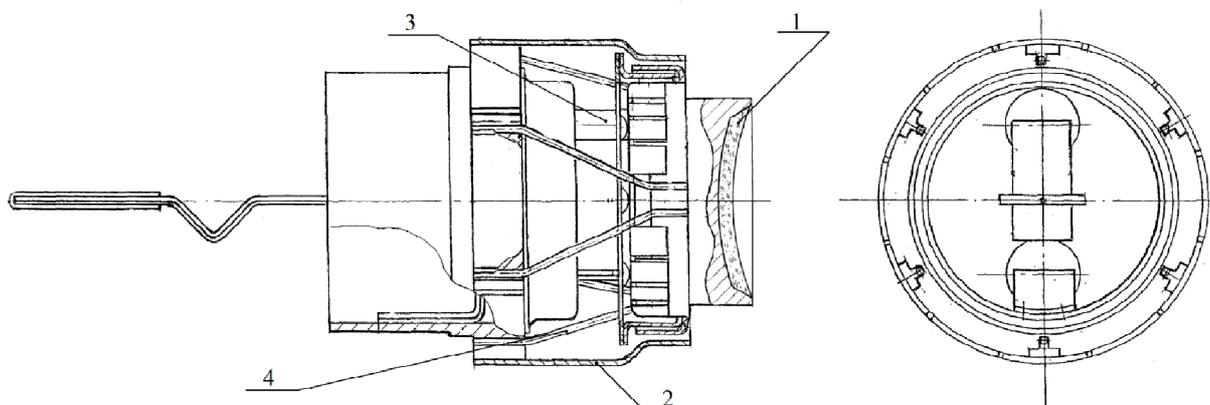


Рис. 8. Схема КПУ-3: 1 – эмиттер, 2 – блок экранов, 3 – подогреватель, 4 – стержневые тепловые развязки

Для повышения долговечности прибора эмиттер КПУ-3 был изготовлен по плазменной технологии.

Характеристики КПУ-3:

диаметр металлопористого эмиттера 8,6 мм;

ток накала  $I_{нак} = 3,25$  А;

напряжение накала  $U_{нак} = 6-6,5$  В;

плотность эмиссионного тока  $j = 1,37$  А/см<sup>2</sup>.

Долговечность этих приборов не менее 10000 часов, средняя мощность ускоренного пучка регулируется от 1 до 15 кВт, полоса сканирования 40-60 см. Внешний вид ускорительной секции линейного резонаторного излучателя электронов представлен на рисунке 9.



Рис. 9. Ускорительная секция излучателя электронов

Таким образом, разработано несколько типов КПУ с металлопористыми эмиттерами и повышенной эмиссионной долговечностью для ускорителей электронов.

### Библиографический список

1. Смирнов В.А. Высокоэффективные металлопористые (импрегнированные) катоды для электровакуумных приборов // Вакуумная наука и техника: материалы X научно-технической конференции. В 2-х томах. М.: МИЭМ, 2003. Т. 2. С. 436-442.
2. Корнюхин А.А., Крылов А.В., Кузнецов Г.И., Логачев П.В., Масленников О.Ю., Потапов Ю.А., Смирнов В.А., Судаков Ю.С. Сильноточный источник электронов для ускорителя-инжектора // Вакуумная наука и техника: материалы XV научно-технической конференции. М.: МИЭМ, 2008. С. 191-195.
3. Смирнов В.А. Катоды со специальными характеристиками для сверхмощных электровакуумных приборов // Вакуумная наука и техника: материалы VIII научно-технической конференции. М.: МИЭМ, 2001. С. 208-211.
4. Акимов П.И., Грызлов А.В., Гладышев Д.А., Невский П.В., Сигалаев В.Н., Чудин В.Г. Модернизация конструкции электронной пушки линейного ускорителя электронов // Вакуумная наука и техника: материалы XXII научно-технической конференции. М., 2015. С. 279-283.

УДК 004.932; ГРНТИ 89.57.35

## МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ КЛИСТРОН ДЛЯ ПИТАНИЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

П.И. Акимов, К.П. Дударев, И.С. Кузнецов, М.А. Мартыненко, Г.В. Мельничук, Б.В. Прокофьев, В.М. Саблин, \*К.Л. Сергеев, Д.А. Терентьев, И.А. Фрейдович, И.С. Фролов, В.Г. Чудин, \*\*В.И. Шведун

АО «НПП «Торий», г. Москва, torlab107@mail.ru,

\*АО «Спецмагнит», г. Москва,

\*\*НИИЯФ МГУ им. Скобелевца, г. Москва

*Аннотация.* Представлены результаты разработки основных узлов многолучевого клистрона с реверсной магнитной системой, выходной мощностью до 3 МВт, напряжением катода 43 кВ на частоту 5.712 ГГц.

*Ключевые слова.* Многолучевой клистрон, электронно-оптическая система, электродинамическая система, коллектор

### HIGH-POWER PULSE MULTIBEAM KLYSTRON FOR LINEAR ACCELERATOR SUPPLY

P.I. Akimov, K.P. Dudarev, I.S. Kuznetsov, M.A. Martynenko, G.V. Melnichuk, B.V. Prokof'ev, V.M. Sablin,

\*K.L. Sergeev, D.A. Terent'ev, I.A. Freydovich, I.S. Frolov, V.G. Chudin, \*\*V.I. Shvedunov

Join Stock Company «S&P Corporation «Toriy», torlab107@mail.ru,

\*Join Stock Company «Spetsmagnit», Moscow,

\*\*SINMSU, Moscow

*Abstract.* The development's results of the principal units for the multibeam klystron with reversal focusing magnetic system at frequency 5.712 GHz and output power up to 3 MW are presented.

*Keyword:* Multibeam klystron, electron-optical system, RF system, collector

Для обеспечения возможности использования малогабаритных линейных ускорителей на предприятии ФГУП «НПП «Торий» проведена разработка конструкции МЛК на частоту 5712 МГц с выходной импульсной мощностью не менее 3 МВт при уровне средней мощности до 10 кВт [1]. Проектируемый прибор при уровне напряжения на катоде около 43 кВ и 45% КПД рассчитан на коэффициент усиления не ниже 50 дБ. При этом в соответствии

с требованиями ТЗ вес прибора с фокусирующей магнитной системой не должен превышать 55 кг. Проведенный анализ возможных конструктивных решений основных узлов прибора показал, что требуемые характеристики можно получить при использовании 26-лучевой конструкции ЭОС с центрами парциальных пучков, расположенными на двух кольцевых рядах (18 - во внешнем ряду и 8 - во внутреннем). Пучки формируются парциальными пушками типа Пирса с коэффициентом линейной компрессии в кроссовере не менее 3.5. Для транспортировки пучка используется однореверсная магнитная фокусирующая система на кольцевых магнитах из самарий-кобальтового сплава. Характерной особенностью прибора является использование кольцевых резонаторов, работающих на высшем виде колебаний  $E_{020}$ , что позволяет обеспечить равномерность СВЧ поля в зазорах взаимодействия большой поперечной площади при приемлемой плотности тока с катода.

Основные требования к параметрам многолучевой электронной пушки: импульсный суммарный ток – 140 А, рабочее напряжение катода – 43 кВ, микропереванс парциального пучка –  $0,55 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Результаты двумерного анализа формирования пучка в парциальной пушке представлены на рис. 1.

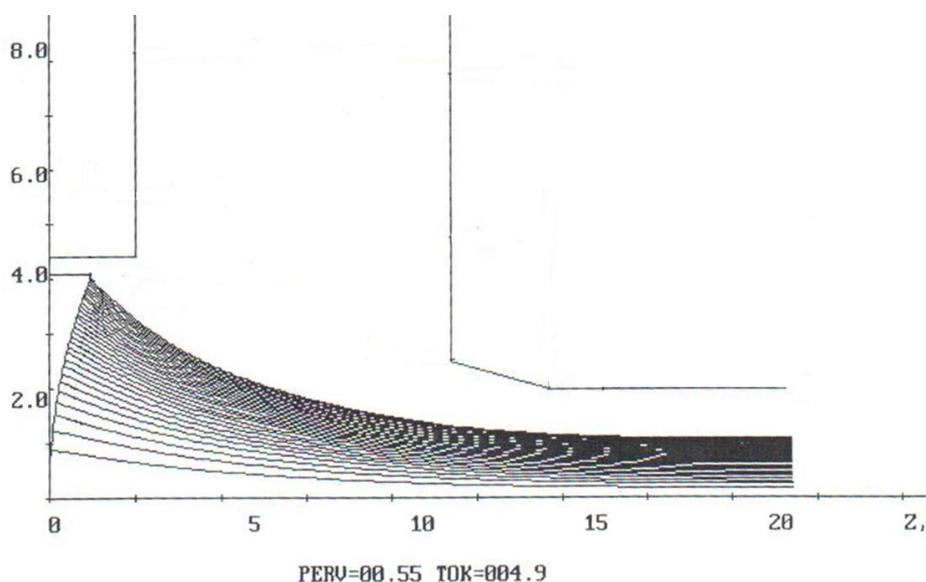


Рис. 1. Результаты расчета парциальной электронной пушки в двумерном приближении

Транспортировка парциальных пучков в каналах резонаторной системы прибора обеспечивается однореверсной магнитной фокусирующей системой с радиально намагниченными кольцевыми магнитами, выполненными из сплава КС-25ДЦ. Использование реверсной фокусирующей системы позволяет в несколько раз уменьшить массу и габариты фокусирующей системы по сравнению с системами, создающими униполярное магнитное поле. Расчетные величины амплитуд магнитного поля: 1270 Гс в первом реверсе и 1430 Гс во втором реверсе. Проведенный анализ показал, что неоднородность продольной составляющей индукции магнитного поля, измеренной во внешнем пролётом канале в первом и во втором реверсах, не должна превышать 20 Гс. Результаты расчета продольной составляющей индукции магнитного поля на оси канала транспортировки, а также расчет траекторий парциального пучка в двумерном приближении представлены на рис. 2.

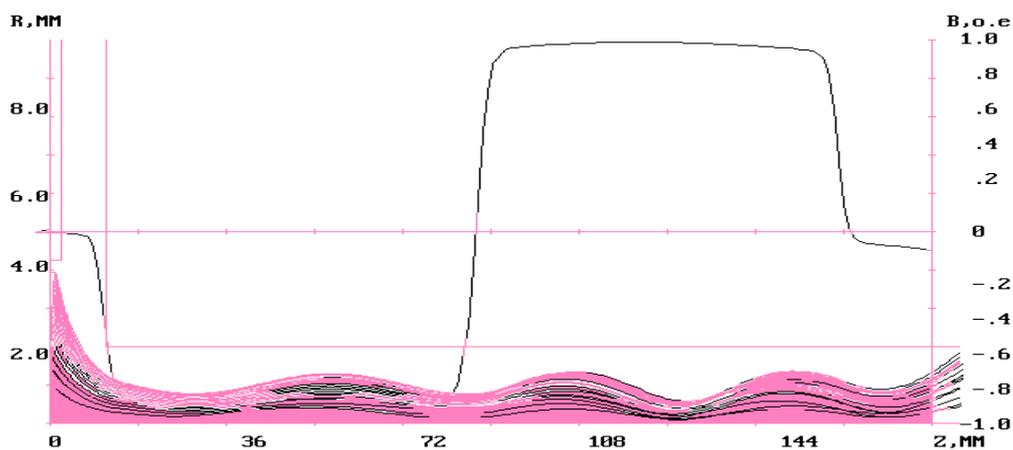


Рис. 2. Результаты расчета продольной составляющей магнитного поля и траектории пучка в канале транспортировки

При оптимизации параметров парциального пучка в канале транспортировки учитывалось, что протяженность зон реверса в практических конструкциях приблизительно равна диаметру отверстия в полюсном наконечнике и соизмерима с длиной волны пульсации пучка в пролетном канале. Электроны пучка в зоне реверса оказываются под воздействием магнитного поля, много меньшего, чем необходимо для существования равновесного пучка, а нарушение баланса сил приводит к кратковременной расфокусировке пучка. Далее поле опять быстро нарастает до заданного значения. При небольшой длине зоны реверса пучок не успевает заметно расшириться, но электроны приобретают радиальную составляющую скорости. В этом случае после прохождения зоны реверса пучок может сильно пульсировать. Снижения амплитуды пульсаций можно добиться путем подбора фазы входа пучка в реверс (рис. 2). Общий вид конструкции магнитной фокусирующей системы представлен на рисунке 3. МФС включает три радиально намагниченных кольцевых магнита с полюсными наконечниками переменной толщины, а также анодный и коллекторный экраны.

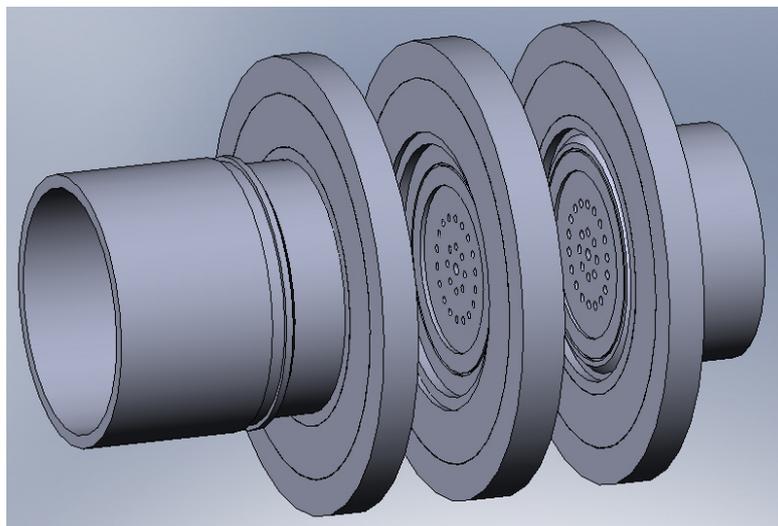


Рис. 3. Общий вид конструкции магнитной фокусирующей системы прибора

Коллектор клистрона имеет многокамерную конструкцию (рис. 4). Такой вариант коллектора, несмотря на сложность его конструкции и системы охлаждения, позволяет исключить явление возникновения виртуального катода, когда все лучи с большой величиной суммарного первеанса ( $14.3 \text{ мкА/В}^{3/2}$ ) попадают в один объем и образуют область с большим пространственным зарядом, отбрасывающим в пространство взаимодействия медленные электроны, что ухудшает стабильность работы клистрона.

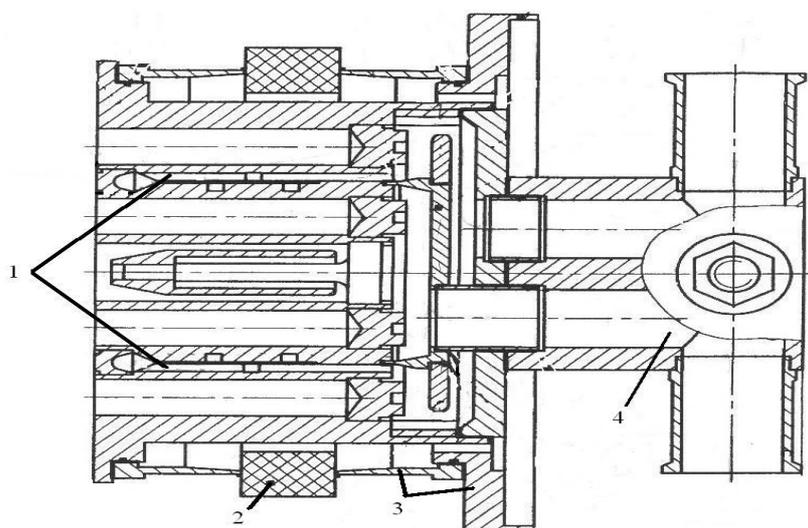


Рис. 4. Конструкция коллектора с системой охлаждения: 1 – каналы охлаждения; 2 – изоляционное кольцо; 3 – элементы магнитного экрана; 4 – элементы системы охлаждения

Проведенные расчеты формирования парциальных пучков в коллекторной области показали недостаточную расходимость пучков в камерах [2], что приводило к большим удельным тепловым нагрузкам на внутренние поверхности камер. С целью снижения удельных тепловых нагрузок была модифицирована конструкция коллекторного магнитного экрана. Изменение конструкции коллекторного экрана позволило на входе в парциальные камеры сформировать достаточно большую по величине поперечную компоненту индукции магнитного поля, обеспечивающую отклонение пучка и более равномерное распределение электронов по поверхности токоприемников (рис. 5). Проведенные расчеты теплового режима коллектора показали, что при выбранных параметрах системы жидкостного охлаждения коллектора максимальная температура на задней стенке парциальных камер составила  $201,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что гарантирует надежную работу прибора.

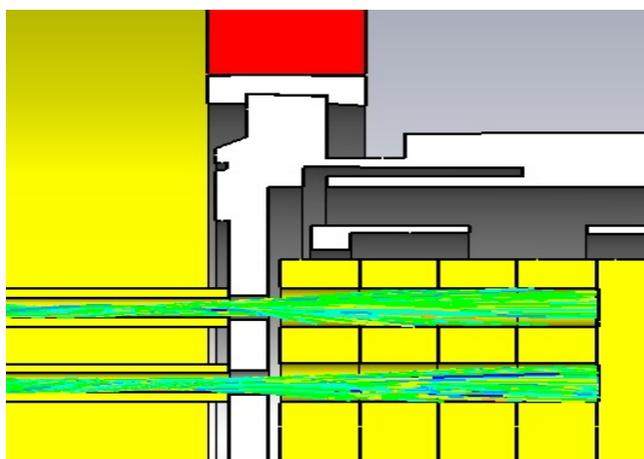


Рис. 5. Результаты моделирования пучков в области коллектора с доработанным экраном

Как известно, в большинстве случаев в клистронах применяются тороидальные резонаторы. В то же время при переходе на многолучевую конструкцию снижается эффективность работы прибора вследствие высокой неоднородности радиальной составляющей электрического поля в зазорах взаимодействия. В данной работе было принято решение использовать кольцевые резонаторы, работающие на высших видах колебаний, в частности на виде колебаний  $E_{020}$ . В этом случае по радиусу кольцевого полого резонатора умещается не одна, а две полуволны, а в области двух максимумов электрического поля располагаются два кольцевых емкостных зазора на разных диаметрах (рис. 6). Такая конфигурация поля позволяет получить достаточно высокую однородность

поля по сечению пролетного канала, а также максимально отдалиться от паразитных видов колебаний (в данном случае –  $E_{012}$  и  $E_{022}$ ).

Варьирование объема центральной области, находящейся между кольцевыми емкостными зазорами, позволяет манипулировать частотами паразитных видов за счет того, что электрическое поле на видах  $E_{01n}$  имеет максимум поля в области центральной линии резонатора и изменение емкости в этой области влияет на частоту этих видов сильнее, чем на частоты видов  $E_{02n}$ .

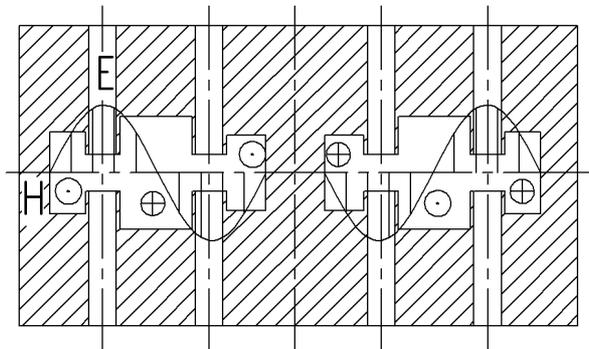


Рис. 6. Распределение электрического поля по диаметру полого резонатора, работающего на виде колебаний  $E_{020}$

Для применения в выводе энергии прибора предложена конструкция окна вывода СВЧ энергии, работающего на «смешанных модах»  $H_{11}$  и  $E_{11}$  круглого волновода, параметры окна были рассчитаны в программе MEMFIS [3]. Конструкция отличается не только высокой технологичностью, но и малым уровнем напряженности электрического поля в области спаев металл-диэлектрик (рис. 7). Это позволило снизить вероятность электрических пробоев по поверхности диэлектрика, являющихся основной причиной выхода из строя окон приборов с высокой импульсной мощностью.

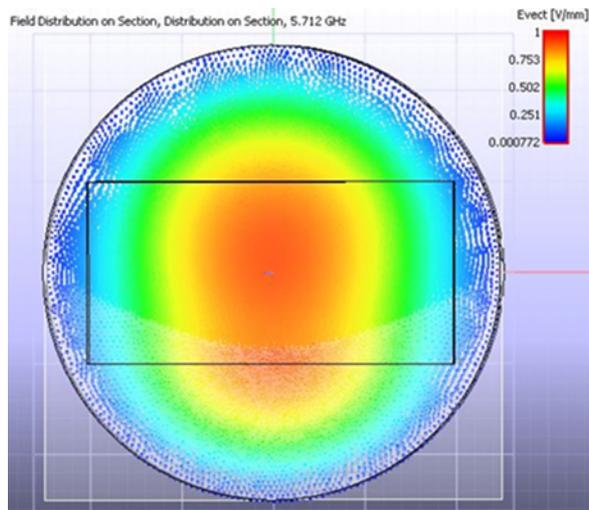


Рис. 7. Напряженность электрического поля в области спаев металл-диэлектрик

### Библиографический список

1. А.К. Балабанов, Р.А. Косарев, Г.В. Мельничук, П.В. Невский, Б.В. Прокофьев, И.А. Фрейдович, В.Г. Чудин, В.И. Шведунов. Многолучевой клистрон С-диапазона с фокусирующей системой на постоянных магнитах // Доклады III Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, июнь 2014 г.
2. П.И. Акимов, И.С. Кузнецов, П.В. Невский, В.М. Саблин, И.А. Фрейдович, И.С. Фролов, В.Г.Чудин. Проектирование коллекторного узла многолучевого клистрона // Вакуумная наука и техника: материалы XXII научно-технической конференции; под ред. академика А.С. Бугаева. М.; 2015. С. 296-300.
3. Grigoriev A.D., Salimov R.V., Tikhonov R.I. Modeling of Complicated Microwave Devices by RFS Code // Conf. Proc.: 2012 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Device Engineering. APEDE 2012. – 2012. – С.175-182.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭОС ЛБВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С МПФС

**М.В. Ефремова\***, **С.П. Морев\*\***, **Э.К. Муравьев\*\***

\* ОАО «Плутон», [info@pluton.msk.ru](mailto:info@pluton.msk.ru)

Россия, Москва,

\*\* АО «Научно-производственное предприятие «Торий»,

Россия, Москва, [npptoriy@mtu-net.ru](mailto:npptoriy@mtu-net.ru)

*Аннотация.* Рассмотрены теоретические и практические вопросы разработки электронно-оптических систем ламп бегущей волны с фокусировкой интенсивного электронного потока магнитной периодической фокусирующей системой при продвижении в область миллиметрового диапазона.

*Ключевые слова.* ЛБВ миллиметрового диапазона, ЭОС, МПФС, область устойчивой фокусировки электронного потока, параметр магнитного поля, токопрохождение.

## DESIGN FEATURES OF THE EOS TWT MILLIMETER RANGE WITH PPM

**M.V. Efremova\***, **S.P. Morev\*\***, **E.K. Muravyev\*\***

\* OAO "Pluton", [info@pluton.msk.ru](mailto:info@pluton.msk.ru)

Moscow, Russia,

\*\* AO "NPP "Toriy",

Moscow, Russia, [npptoriy@mtu-net.ru](mailto:npptoriy@mtu-net.ru)

*Abstract.* Theoretical and practical questions of development of electron-optical systems travelling-wave tubes of the focusing of intense electron beam a periodic magnetic focusing system for the promotion of the millimeter region are discussed.

*Keywords.* TWT millimeter range, EOS, MPPS, the region of stable focusing of the electron flow, magnetic field parameter, subsidence of part of the beam current.

Одним из существенных факторов, ограничивающих продвижение в получении больших мощностей в вакуумных СВЧ приборах (клинотронах или ЛБВ) с магнитной периодической фокусировкой (МПФС) в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов, является оседание электронного потока на элементы замедляющей или резонаторной системы. При всех достоинствах (по сравнению с системами фокусировки однородным полем) фокусировка с помощью МПФС обладает одним весьма неприятным свойством. При определенных значениях амплитуд магнитного поля, длин периодов МПФС и напряжений на замедляющей системе, составляющих так называемый параметр магнитного поля  $\alpha$ , амплитуда пульсаций пучка может неограниченно возрастать по мере его продвижения вдоль оси пролетного канала, что, в свою очередь, приводит к оседанию существенной части электронного потока на элементы замедляющей системы [1]. Для ЛБВ сантиметрового диапазона, использующих в качестве замедляющей системы (ЗС) цепочку связанных резонаторов (ЦСР), часто применяют совмещенные МПФС, в которых полюсные наконечники пространственно совмещены с элементами ЗС. В этом случае период МПФС определяется требуемыми электродинамическими характеристиками ЗС и, по сути, является заданным. При высоких значениях фокусирующего магнитного поля, необходимых для фокусировки интенсивных электронных потоков, в особенности при переходе в коротковолновую часть СВЧ диапазона, вследствие миниатюризации ЗС, период МПФС становится кратным периоду ЗС, и величина параметра  $\alpha$  может стать близкой к критическим значениям, при которых наблюдается неустойчивая фокусировка. За счет ввода в распределение осевой компоненты индукции магнитного поля высших гармонических составляющих (ВГС) удается сдвинуть область параметрического резонанса в сторону более высоких значений параметров магнитного поля [2,3]. Однако конструкции МПФС с требуемым спектром гармоник в распределении магнитного поля зачастую находятся в результате трудоемкого перебора (экспериментального или расчетного) геометрических размеров магнитов и наконечников.

Исследованное в [4] влияние гармонического состава распределения магнитного поля на устойчивость фокусировки пучка при повышенных значениях параметра магнитного поля  $\alpha$ , позволило сформулировать требования, накладываемые на амплитуды высших

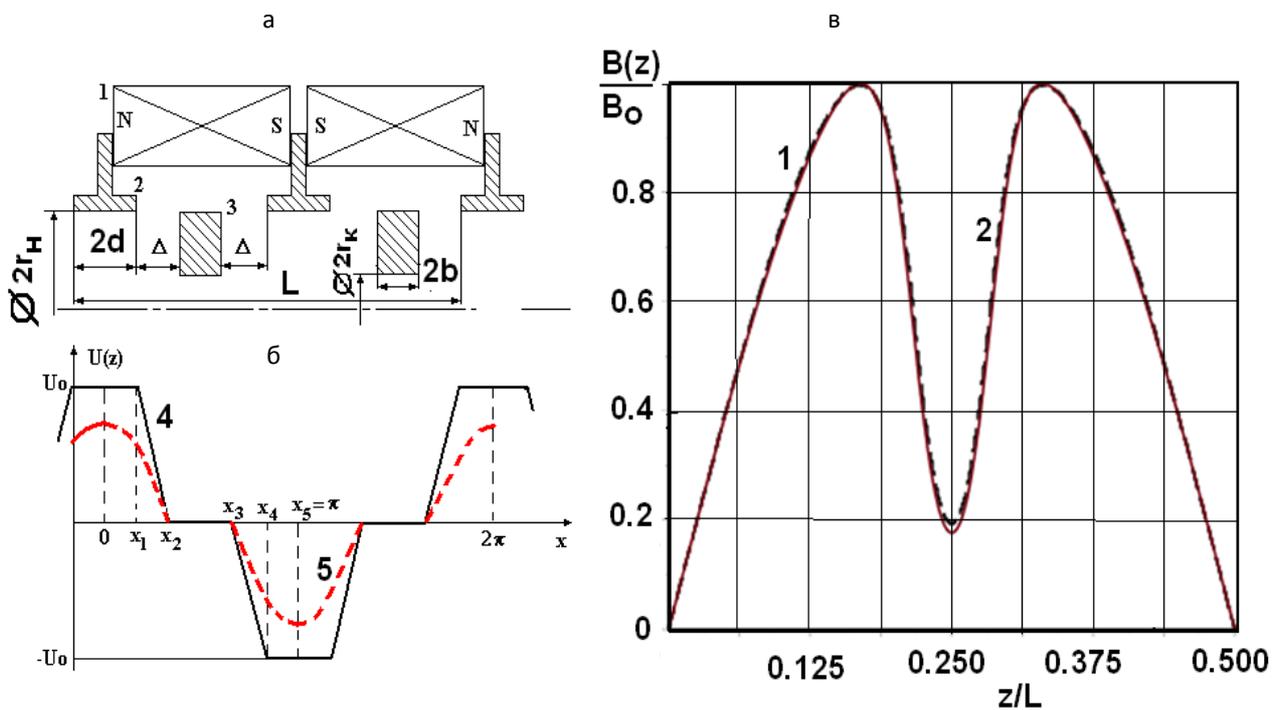
гармонических составляющих, при которых зоны устойчивой фокусировки смещаются в сторону больших значений параметра магнитного поля  $\alpha$ .

В работе [4,5] найдены приближенные аналитические выражения для гармоник магнитного поля, формируемого бесконечной МПФС с одинаково намагниченными магнитами для МПФС с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий в которых равен диаметру отверстий в наконечниках.

В представленной работе предложено приближенное аналитическое решение задачи о нахождении распределения магнитного поля, формируемого МПФС с магнитомягкими вставками, внутренний диаметр отверстий в которых существенно отличается от диаметра отверстий в наконечниках. Проведено исследование устойчивости фокусировки электронного потока при повышенных значениях параметра магнитного поля в предложенной конструкции МПФС.

*Распределение магнитного поля в МПФС с магнитомягкой вставкой.*

Для бесконечной МПФС с симметричным расположением относительно полюсных наконечников магнитомягкой вставки схематическое изображение ячейки представлено на рис.1. Решение задачи о нахождении (в приближениях [5]) распределения продольной и радиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$  сводится к решению уравнения Лапласа для магнитного скалярного потенциала в приосевой области, ограниченной полюсными наконечниками МПФС и магнитомягкой вставкой, имеющего следующий вид:



$$f(x) = \begin{cases} U_0 & 0 < x < x_1, \\ U_0 - 0,5\alpha U_0(x - x_1) & x_1 < x < x_2, \\ 0 & x_2 < x < x_3, \\ -0,5\alpha U_0(x - x_3) & x_3 < x < x_4, \\ -U_0 & x_4 < x < \pi, \end{cases}$$

$$f_1(x) = \begin{cases} U_0^* \cos\left(\frac{\pi x}{2x_2}\right) & 0 < x < x_2, \\ 0 & x_2 < x < x_3, \\ -U_0^* \cos\left(\frac{\pi(\pi - x)}{2x_2}\right) & x_3 < x < \pi. \end{cases}$$

Распределение продольной и радиальной компоненты индукции магнитного поля  $B_z(r,z)$  и  $B_r(r,z)$  имеет следующий вид

$$B_z(r, z) = B_0 \sum_k \frac{k(1 - (-1)^k)}{1 - (k\xi)^2} \cos\left(\frac{k\pi\xi}{2}\right) \frac{I_0\left(\frac{2\pi kr}{L}\right)}{I_0\left(\frac{2\pi kr_{\text{кан}}}{L}\right)} \sin\left(\frac{2\pi kz}{L}\right),$$

$$B_r(r, z) = B_0 \sum_k \frac{k(1 - (-1)^k)}{1 - (k\xi)^2} \cos\left(\frac{k\pi\xi}{2}\right) \frac{I_1\left(\frac{2\pi kr}{L}\right)}{I_0\left(\frac{2\pi kr_{\text{кан}}}{L}\right)} \cos\left(\frac{2\pi kz}{L}\right),$$

где  $\xi = (1 - 4b/L)$ ;  $2b$  – толщина вставки;  $L$  – период МПФС;  $I_0(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода.

Результаты сопоставления аналитического и численного расчета, полученного на основании строгих моделей распределений продольной компоненты индукции магнитного поля на оси МПФС, представлены на рис. 1, в для следующих параметров:  $2d = 1,9$  мм;  $2b = 0,85$  мм;  $\Delta = 1,725$  мм;  $L = 12,4$  мм;  $r_{\text{нак}} = 2,0$  мм;  $r_{\text{кан}} = 0,45$  мм.

Амплитуды первых семи пространственных гармоник спектрального состава полученного распределения имели следующие величины:  $b_1 = 0,886$ ;  $b_3 = 0,303$ ;  $b_5 = -0,198$ ;  $b_7 = 0,121$ ;  $b_9 = -0,064$ ;  $b_{11} = 0,028$ ;  $b_{13} = -0,008$ .

На рис. 2 представлены результаты расчетов ближайшей зоны неустойчивой фокусировки пучка в зависимости от величины параметра магнитного поля  $\alpha$ . Следует отметить, что при значениях  $\alpha > 3.2$  начинается «зона непропускания» для любого электрона пучка.

Как следует из анализа результатов, представленных на рис. 2, выбранная структура ВГС в распределении магнитного поля смещает зону неустойчивой фокусировки в сторону более высоких значений параметра магнитного поля, хотя и в меньшей степени, чем при оптимальном соотношении ВГС для МПФС со вставкой [4].

В качестве примера использования рассмотренной МПФС был проведен тестовый расчет ЭОС с параметрами, представленными в табл. 1,2.

При синусоидальном распределении магнитного поля в регулярной части МПФС и значении параметра  $\alpha = 0.5$  транспортировка электронного потока затруднительна из-за возникающего параметрического резонанса, приводящего к «раскачке» пучка [1]. Введение вставки позволяет добиться транспортировки потока с малыми пульсациями границы пучка (рис.3, а). При повышении параметра магнитного поля до величины  $\alpha = 1.0$  (что может быть осуществлено за счет уменьшения величины ускоряющего напряжения) пучок начинает оседать на пролетный канал ЭОС (рис.3, б).

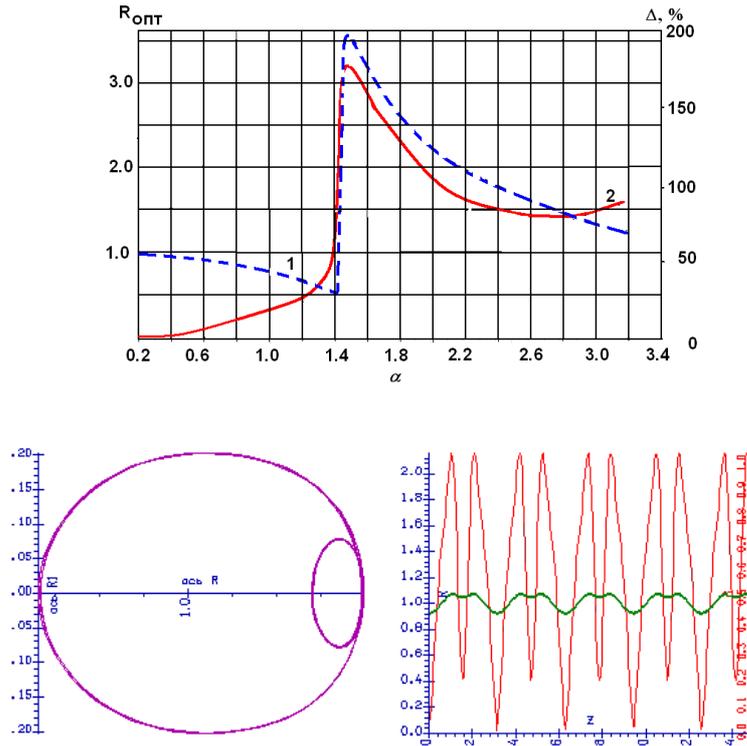


Рис.2. Фокусировка электронного потока в МПФС с магнитомяжкой вставкой:  
а – зависимость оптимального входного радиуса пучка  $R$  (1) и относительной амплитуды пульсаций  $\Delta$  (2) от параметра магнитного поля  $\alpha$ ,  
б – фазовый портрет и контур пучка в МПФС  $\alpha = \beta p = 0,5$ ;  $R_{\text{опт}} = 0,932$

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	570,0
Ускоряющее напряжение, В	18000
Микропервеанс, $\text{мкА}/\text{В}^{3/2}$	0,236
Диаметр катода, мм	3,75
Диаметр канала, мм	0,9
Тип катода	Импрегни- рованный
Плотность тока на катоде, $\text{А}/\text{см}^2$	5,16
Плотность тока в пучке, $\text{А}/\text{см}^2$	358,3
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	121,8
Компрессия пучка по площади (реальная)	69,4

Таблица 2. Параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Гс	4500
Период МПФС, мм	12,4
Параметр магнитного поля	0,486
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,170
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,378
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,225
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,500

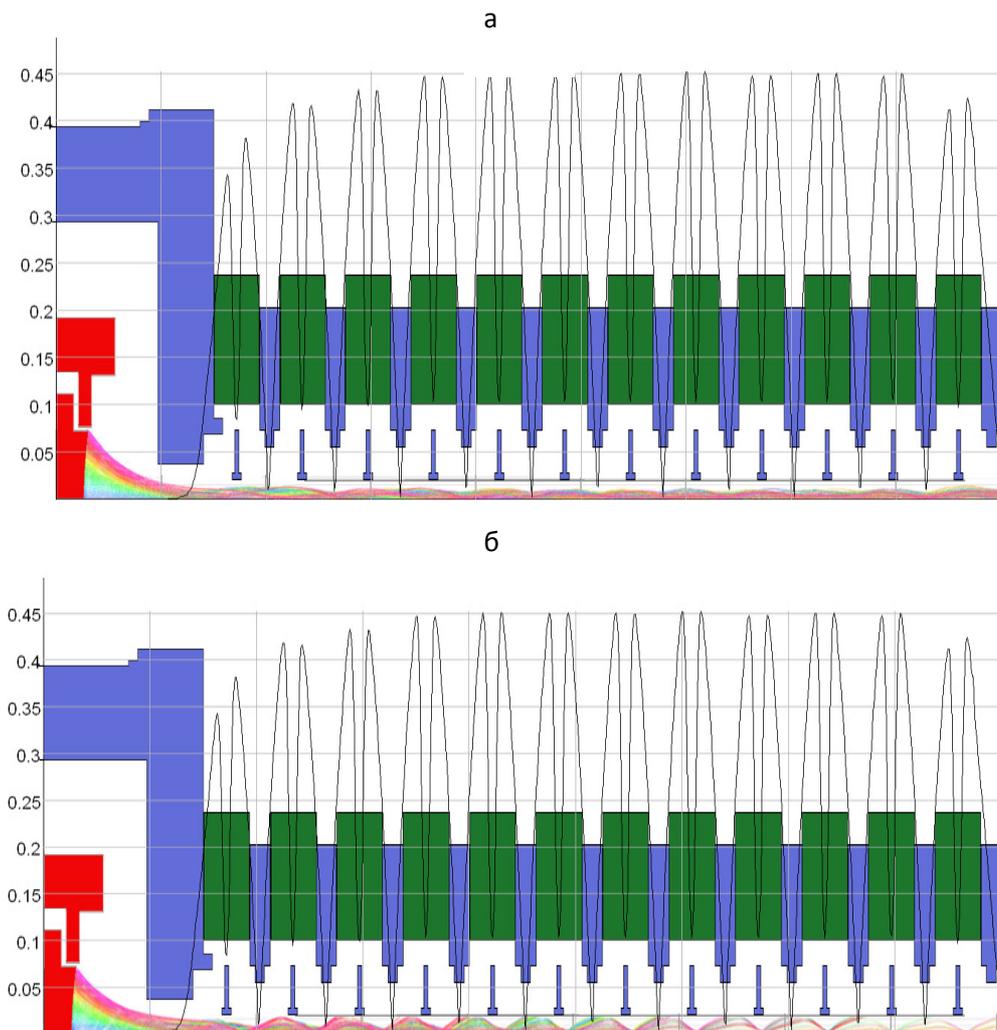


Рис.3. Транспортировка электронного потока в МПФС с магнитомягкой вставкой при различных параметрах магнитного поля:  
а  $U_0=18000$  В; б  $U_0=9000$  В

### Библиографический список

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966. 456 с.
2. Данович И.А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных электронных пучков в периодических магнитных полях /Изв. вузов. Сер. Радиофизика, 1966. Т.9, вып. 2. С. 351-361.
3. Кивокурцев А.Ю., Морев С.П., Юдин Г.Ю. Транспортировка многоскоростных электронных потоков в высших полосах пропускания МПФС как один из способов подавления динамической расфокусировки в ЭВП О-типа// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98: материалы международной научно-технической конференции, 1998. Т.3. С.84.
4. Дармаев А. Н., Морев С. П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля//Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 2006. С. 382-389.
5. Дармаев А. Н., Морев С. П. Приближенная оценка величин высших гармонических составляющих распределения магнитного поля в МПФС с магнитомягкими вставками// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 2006. С. 375-381.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОЩНОГО ВАКУУМНОГО СВЧ ПРИБОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С РЕВЕРСНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

А.Н. Дармаев<sup>1</sup>, Д.А. Комаров<sup>1,2</sup>, М.А. Кравченко<sup>1,2</sup>, С.П. Морев<sup>1,2</sup>, Э. К. Муравьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Научно-производственное предприятие «Торий»,

Россия, Москва, npptoriy@mtu-net.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,

Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское шос., 31

*Аннотация.* Представлено проектирование ЭОС мощной ЛБВ миллиметрового диапазона с магнитной фокусирующей системой, содержащей высшие гармонические составляющие. В приближении магнитостатического потенциала найдены аналитические выражения для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля в ячейках реверсной магнитной системы с кольцевой вставкой или полюсными наконечниками Т-образной формы.

*Ключевые слова.* Мощные вакуумные СВЧ приборы, клистроны, ЛБВ, реверсные магнитные фокусирующие системы.

При создании мощного вакуумного СВЧ прибора в миллиметровом диапазоне из-за большой величины магнитного поля, требуемого для фокусировки интенсивного электронного потока, зачастую приходится применять униполярное (постоянное) или знакопеременное (реверсное) с большим периодом распределение продольной компоненты индукции магнитного поля. Для обеспечения минимальных пульсаций электронного потока в области транспортировки к структуре магнитного поля, так же как и к МПФС, предъявляются повышенные требования.

Для фокусировки интенсивных электронных потоков в вакуумных СВЧ приборах широко применение получили реверсные магнитные фокусирующие системы (РМФС), так как они обладают лучшими массогабаритными характеристиками. РМФС используются в приборах с протяженными высокоперевансными электронными потоками малого диаметра. Улучшение качества фокусировки интенсивного электронного потока и компенсация конечной области спада реверса магнитного поля в подобных системах могут быть достигнуты за счет ввода в распределение магнитного поля высших гармонических составляющих, которые создаются различными магнитомягкими элементами. В качестве таких неоднородностей могут быть применены, в частности, магнитомягкие кольца. Магнитомягкие кольца (или вставки) осуществляют необходимую коррекцию структуры магнитного поля, выравнивая исходный профиль магнитного поля или создавая требуемый спад поля на необходимой длине. За счет применения Т-образных полюсных наконечников можно регулировать профиль нарастания или спада продольной компоненты индукции магнитного поля. Однако определение требуемой структуры магнитного поля при расчетах зачастую связано с перебором геометрических размеров магнитной фокусирующей системы, что может приводить к повышенным временным затратам.

В настоящей работе представлено приближенное аналитическое решение уравнения Лапласа для скалярного магнитного потенциала  $U(r,z)$  в аксиально-симметричной области [1-3] реверсной МФС ( $0 < r < r_0$ ). МФС состоит из радиально намагниченных магнитов, полюсных наконечников в виде дисков с отверстиями диаметром  $2r_0$  и кольцевых вставок, внутренний диаметр  $2R$  которых больше внутреннего диаметра полюсных наконечников ( $R > r_0$ ). Кроме того, рассмотрено также аналогичное решение для МФС, в которой полюсные наконечники выполнены в виде Т-образной формы (рис. 1).

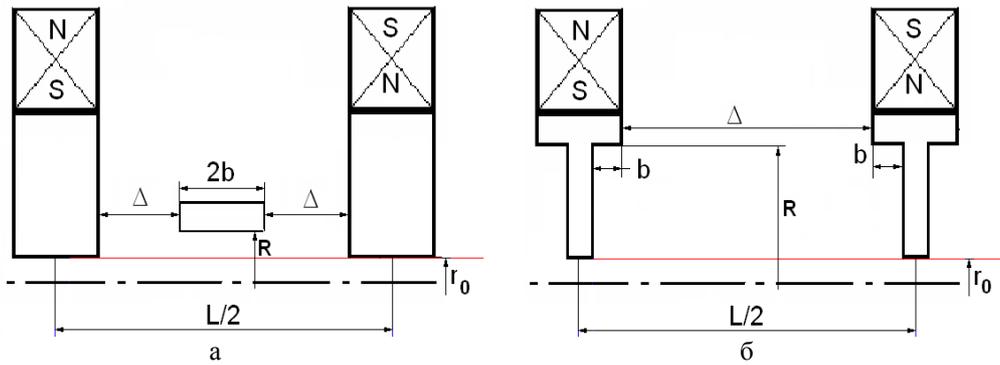


Рис. 1. МФС с кольцевой вставкой (а) и с Т-образными полюсными наконечниками (б)

Для учета действия кольцевой вставки с внутренним диаметром, большим чем диаметр отверстий в полюсных наконечниках, или учета формы полюсных наконечников решения в области пролетного канала «сшивались» по границе пролетного канала с решением в области внепролетного канала. Для МФС с кольцевой вставкой получено приближенное аналитическое выражение для продольной и радиальной компонент индукции магнитного поля  $B_z(r, z)$  в виде:

$$B_z(r, z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1 - U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \cos \frac{k(\alpha + 2\beta)}{2} + \frac{U_2}{2\beta} \sin k\beta \right] \frac{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r_0\right)} \sin\left(\frac{2\pi k}{L} z\right),$$

$$B_r(r, z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1 - U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \cos \frac{k(\alpha + 2\beta)}{2} + \frac{U_2}{2\beta} \sin k\beta \right] \frac{I_1\left(\frac{2\pi k}{L} r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r_0\right)} \cos\left(\frac{2\pi k}{L} z\right),$$

где  $I_0(x)$ ,  $K_0(x)$ ,  $I_1(x)$ ,  $K_1(x)$  – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого и первого порядка. При  $r_0=R$  формула (1) переходит в известное выражение для распределения магнитного поля в МФС с полюсными наконечниками и кольцевой вставкой [3].

Для МФС с Т-образными наконечниками соответствующие формулы имеют следующий вид:

$$B_z(r, z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1 - U_2}{\beta} \sin \frac{k\beta}{2} \cos \frac{k(\alpha + 2\beta)}{2} + \frac{U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \right] \frac{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r_0\right)} \sin\left(\frac{2\pi k}{L} z\right),$$

$$B_r(r, z) = -\frac{16U_0}{L} \sum_k \frac{\sin \frac{k\pi}{2}}{k} \left[ \frac{1 - U_2}{\beta} \sin \frac{k\beta}{2} \cos \frac{k(\alpha + 2\beta)}{2} + \frac{U_2}{\alpha} \sin \frac{k\alpha}{2} \right] \frac{I_1\left(\frac{2\pi k}{L} r\right)}{I_0\left(\frac{2\pi k}{L} r_0\right)} \cos\left(\frac{2\pi k}{L} z\right)$$

$$U_2 = U_0 \frac{\beta(1 - \varphi(r_0, R))}{\alpha + \beta}, \quad \varphi(r_0, R) \Rightarrow \begin{cases} 0, R \rightarrow \infty \\ 1, r_0 = R \end{cases}$$

На рис. 2а представлены распределения структуры индукции магнитного поля для продольной и радиальной компоненты в МФС с кольцевой вставкой, а на рис 1б соответствующие распределения для МФС с Т-образными полюсными наконечниками. При  $r_0=R$  формула (2) переходит в известное выражение для распределения магнитного поля в МФС с полюсными наконечниками и кольцевой вставкой [3].

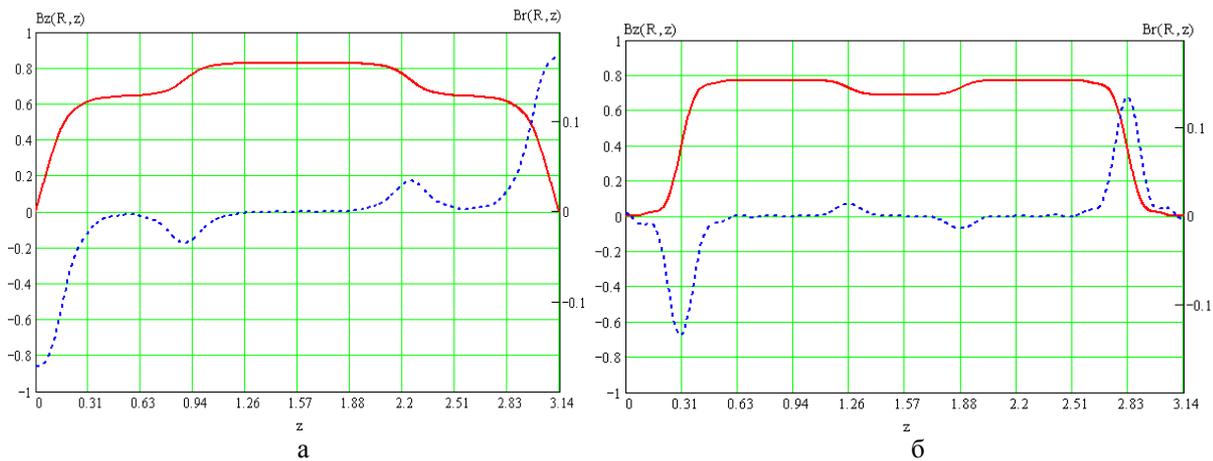


Рис. 2. Структура распределений продольной (1) и радиальной (2) компонент индукции магнитного поля в ячейке реверсной МФС с размером: а –  $L/2=58$  мм,  $\square=25$  мм,  $2b=30$  мм,  $r_0=4$  мм,  $R=50$  мм; б –  $L/2=100$  мм,  $\square=30$  мм,  $2b=20$  мм,  $r_0=4$  мм,  $R=65$  мм

В качестве примера использования реверсной МФС со вставками был проведен тестовый расчет ЭОС с параметрами, представленными в табл. 1,2.

При синусоидальном распределении магнитного поля в МФС транспортировка электронного потока затруднительна из-за возникающего параметрического резонанса, обусловленного пологими фронтами нарастания магнитного поля и приводящего к «раскачке» пучка [1]. Введение в каждый полупериод магнитного поля трех вставок

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	1500
Ускоряющее напряжение, В	24000
Микропервеанс, $\text{мкА}/\text{В}^{3/2}$	0,4
Диаметр катода, мм	4,00
Диаметр канала, мм	0,9
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, $\text{А}/\text{см}^2$	12,0
Плотность тока в пучке, $\text{А}/\text{см}^2$	943,0
Компрессия пучка по площади (бриллюэновская)	109
Компрессия пучка по площади (реальная)	79,0

Таблица 2. Параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Гс	4500
Период МПФС, мм	28,
Параметр магнитного поля	1,84
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,181
Заполнение канала пучком (без учета поперечных скоростей)	0,403
Средний радиус пучка (с учетом поперечных скоростей), мм	0,216
Реальное заполнение канала пучком (с учетом поперечных скоростей)	0,504

позволяет добиться транспортировки потока с малыми пульсациями границы пучка (рис.3,а).

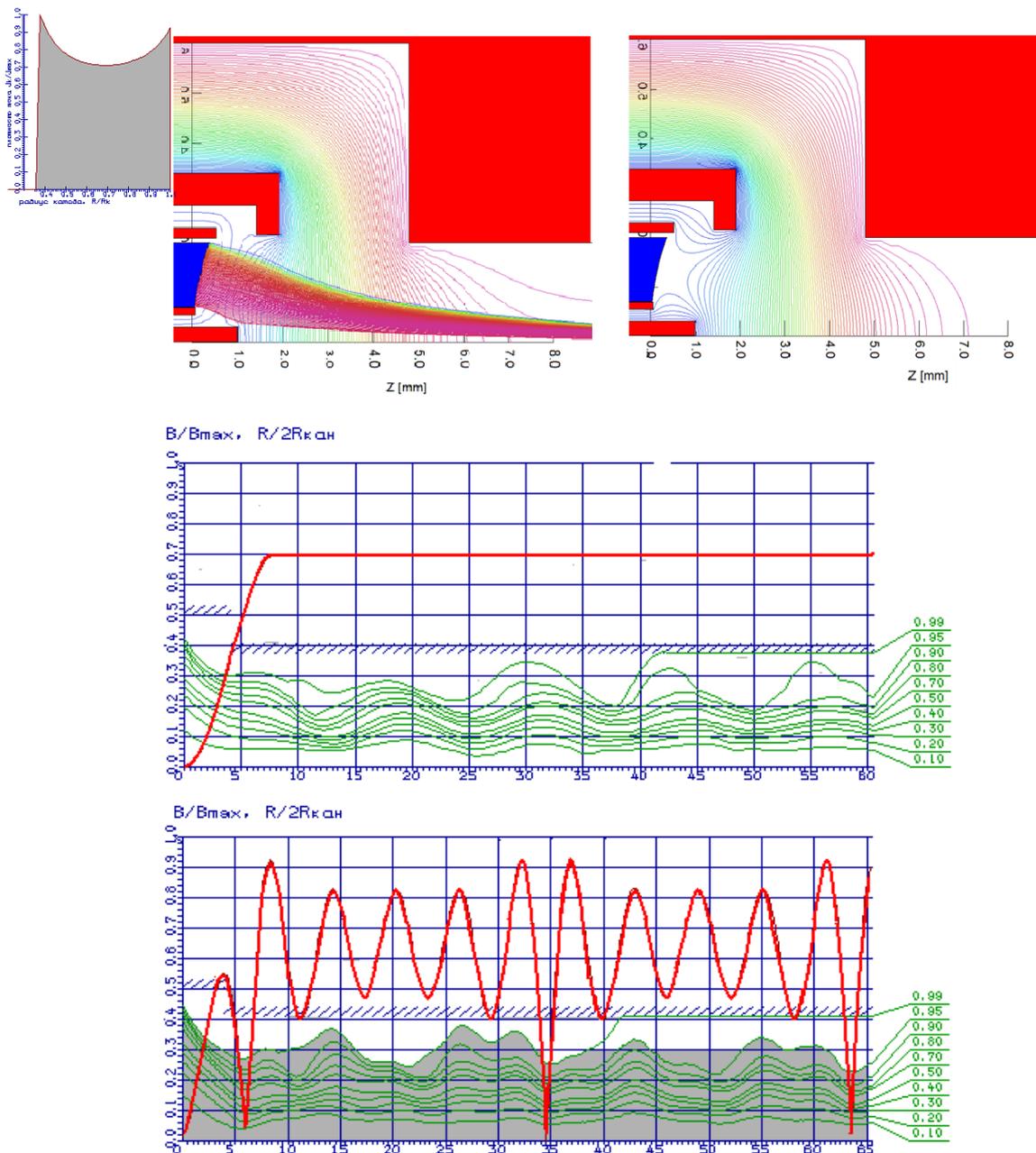


Рис. 3. Распределение потенциала траектории пучка в области электронной пушки в номинальном режиме при  $U_f=850$  В (а), при отсечке тока пучка потенциалом управляющих электродов при  $U_f= - 1700$  В (б) и в пролетном канале (в,г)  $V_{max}=5000$  Гс

### Библиографический список

1. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., 1966. 456 с.
2. Данович И.А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных электронных пучков в периодических магнитных полях //Изв. Вузов. Сер. Радиофизика, 1966. Т.9, вып. 2. С. 351-361.
3. Кивокурцев А.Ю., Морев С.П., Юдин Г.Ю. Транспортировка многоскоростных электронных потоков в высших полосах пропускания МПФС, как один из способов подавления динамической расфокусировки в ЭВП О-типа// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98: материалы международной научно-технической конференции, 1998. Т.3. 84 с.
4. Дармаев А. Н., Морев С. П. Повышение параметра магнитного поля в фокусирующих системах с негармоническим распределением магнитного поля//Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 2006. С. 382-389.
5. Дармаев А. Н., Морев С. П. Приближенная оценка величин высших гармонических составляющих распределения магнитного поля в МПФС с магнитомягкими вставками// Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006: материалы международной научно-технической конференции. Саратов, 2006. С. 375-381.

**ВОЗМОЖНОСТИ РАСЧЕТА ПРИБОРОВ СВЧ  
С ПЛОСКОСИММЕТРИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ**  
П.И. Акимов\*, А.А. Гаврилин\*, А.П. Никитин\*, В.М. Саблин\*, В.Г. Чудин\*, В.А. Сыровой\*\*,  
А.Б. Богословская\*\*\*

\*АО "НПП "ТОРИЙ", Обручева, 52

\*\*ФГУП "Всероссийский электротехнический институт", Красноказарменная, 12

\*\*\*Российский университет «Дружбы народов», Миклухо-Маклая, 6

*Аннотация.* Представлены модель плоскосимметричного электронного пучка с эллиптическим сечением и модель конечного ленточного пучка, основанная на формуле геометризованной теории плотных электронных потоков, а также результаты расчета эквипотенциальных кривых вне пучка для случая разных соотношений полуосей эллиптического пучка  $a/b$ .

*Ключевые слова.* Ленточный электронный пучок, эллиптический пучок, геометризованная теория

**POSSIBILITIES OF THE CALCULATION OF THE MICROWAVE TUBES WITH  
BAND ELECTRON BEAMS**

P.I. Akimov\*, A.A. Gavrilin\*, A.P. Nikitin\*, V.M. Sablin\*, V.G.Chudin\*, V.A. Syrovoy\*\*,  
A.B. Bogoslovskaya\*\*\*

\* Moscow, JoinStockCompany «S&P Corp. «TORIY», Obrucheva str., 52

\*\* Moscow, FGUP «VEI», Krasnokazarmennaya str., 12

\*\*\* Peoples' Friendship University of Russia, Miklukho-Maklaya, 6

*Abstract.* The model of plane symmetry beam with an elliptical cross-section and a model of the final band beam, based on the formula geometrized theory of dense electron fluxes, are presented. The results of calculation of the equipotential curves beyond the beam in case of different ratios of semi-axes of the elliptic beam  $a/b$  are also presented.

*Keywords.* Sheet electron beam, elliptic beam, geometrized theory

Для улучшения параметров вакуумных СВЧ приборов (клистронов, ЛБВ) используются ленточные электронные потоки, поскольку большие поперечные размеры пучка позволяют получить большую мощность в приборе при меньшем рабочем напряжении и низкой плотности тока эмиссии. При характерном для многоручевых приборов напряжении плотность тока остается на уровне однолучевого варианта. В традиционных конструкциях приборов выходная мощность уменьшается пропорционально квадрату рабочей частоты, в то время как в приборе с ленточным пучком при большом отношении сторон этот параметр изменяется линейно.

Заметный рост числа публикаций по данной проблеме несомненно связан с развитием программ 3D моделирования электродинамических, электронно-оптических и магнитных систем. При этом расчет пучков с линейной компрессией  $L \geq 30$  требует достоверной фиксации линейных размеров порядка  $1/L$ , т.е. точности модели на уровне 0.3%. Современные программы трехмерного траекторного анализа с гарантированной точностью такого порядка попросту обеспечить не могут. Характерно, что ряд исследователей не только не уделяют внимания этой теме, но и не знакомы с основными положениями теории формирования плотных пучков (значением угла наклона прикатодного фокусирующего электрода к граничной траектории пучка  $67.5^\circ$  в трехмерных задачах, в частности).

Несмотря на развитие производительности компьютеров, существует потребность, как представляется авторам, в разработке теоретических моделей, адекватно описывающих системы формирования и транспортировки ленточных пучков в пушке и в электродинамической системе с использованием фокусирующих магнитных устройств. В подобных моделях при рассмотрении трехмерных релятивистских непараксиальных потоков оперируют с обыкновенными дифференциальными уравнениями и не имеют проблем, связанных с потерей точности численных алгоритмов вблизи сингулярных эмитирующих поверхностей и вырожденных трубок тока [1].

Управляющими функциями синтеза в модели с эллиптическими трубками тока  $\xi = \text{const}$  являются форма катода, распределение потенциала на оси  $z$  пучка и закон изменения одной из полуосей сечения.

Катод описывается уравнением

$$z = (L_0 + L_c \cos 2\Psi)\xi^2; \quad L_0, L_c = \text{const} \quad (1)$$

и может быть сферическим, цилиндрическим или эллипсоидальным ( $\Psi$  отвечает за обход контура). Полуось  $b(z)$  и потенциал на оси  $U(z)$  при эмиссии в  $\rho$ -режиме описываются уравнениями

$$b(z) = b_0(1 + \bar{b}_3 z)E + A(z)(1 - E), \quad E = \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{z}{c_3}\right)^4\right];$$

$$U = [1 - e^{-S}]^{4/3} + c_1 \exp\left[-\left(\frac{z-1}{c_2}\right)^4\right], \quad c_1, c_2, c_3 = \text{const} \quad (2)$$

где  $A(z)$ ,  $S(z)$  – начинающиеся с линейного члена полиномы, удовлетворяющие прикатодным асимптотикам и содержащие произвольные управляющие параметры, позволяющие оптимизировать геометрию электронного потока.

Вторая полуось сечения  $a(z)$  удовлетворяет обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка, нормализованный вид которого в случае электростатических потоков приведен ниже:

$$\frac{1}{ab}(abU')' + 2U\left(\frac{a''}{a} + \frac{b''}{b}\right) = \frac{a_0 b_0 J}{ab\sqrt{2U}} = \rho, \quad (3)$$

где  $\rho, J$  – плотность пространственного заряда и плотность тока эмиссии; индекс нуль соответствует катоду.

Формирующие электроды определяются простым алгебраическим соотношением для потенциала  $\phi$  в лапласовской области:

$$\phi = \phi_i - \rho c^2 \left[ \frac{1}{4}c_1^2(e^{2v} - 1) + \frac{1}{2}(c_1^2 - 1)v + \frac{1}{4}(e^{-2v} - 1) + \frac{1}{2}c_1(1 - ch2v) \cos 2u \right],$$

$$c = \frac{a+b}{2}, \quad c_1 = \frac{a-b}{a+b}; \quad (4)$$

$$x = c(e^{-v} + c_1 e^v) \cos u, \quad y = c(e^{-v} - c_1 e^v) \sin u,$$

где  $\phi_i$  – потенциал в пучке;  $x, y$  и  $u, v$  – декартовы и криволинейный координаты в плоскости  $z = \text{const}$ .

На рисунках 1-3 представлены результаты расчета пучка с током  $I=10\text{A}$ ,  $U_a=40\text{кВ}$  при компрессии по площадям порядка 7.5.

Вторая модель основана на геометризованной теории плотных электронных пучков. Для случая электростатических течений вводится ортогональная заранее неизвестная система координат  $x^1, x^2$  с коэффициентами Ляме  $h_1, h_2$ , связанная с траекториями (линии  $x^1$ ). Уравнения пучка и условия эвклидовости пространства, определяющие систему координат, представлены в виде соотношения на траектории и эволюционной системы уравнений в частных производных первого порядка для геометрических и физических параметров потока:

$$\frac{u^2}{h_1} \left( \frac{h_{2,1}}{h_1} \right)_{,1} = -\frac{\varphi_{,1}}{h_1} \frac{h_{2,1}}{h_1} - h_2 \left[ 2k_1 u^2 + \frac{1}{h_1} \left( \frac{\varphi_{,1}}{h_1} \right)_{,1} \right] + \frac{h_{20} J}{u};$$

$$z_{,2} = -h_2 \sin \theta, \quad y_{,2} = h_2 \cos \theta, \quad \theta_{,2} = \frac{h_{2,1}}{h_1}, \quad h_{1,2} = -h_1 h_2 K_1, \quad (5)$$

$$u_{,2} = h_2 k_1 u, \quad \varphi_{,2} = h_2 E_V, \quad E_V = k_1 u^2, \quad k_{1,2} = h_2 k_1^2 + \frac{1}{h_1} \left( \frac{h_{2,1}}{h_1} \right)_{,1},$$

$$E_{V,2} = h_2 k_1 E_V - \frac{1}{h_1} \left( h_2 \frac{\varphi_{,1}}{h_1} \right)_{,1} + \frac{h_{20} J}{u}.$$

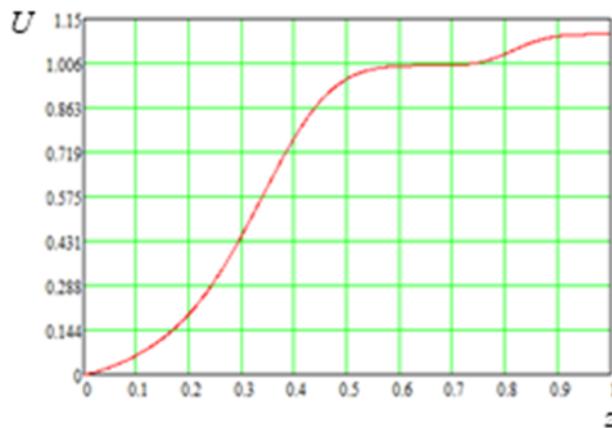


Рис.1. Распределение потенциала на осевой траектории

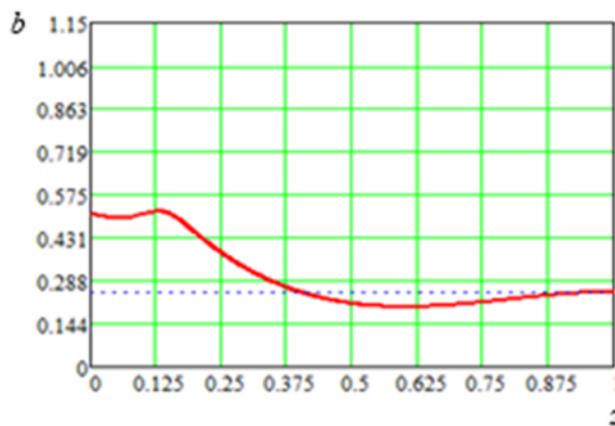


Рис. 2. Компрессия пучка по малой полуоси b вдоль оси z

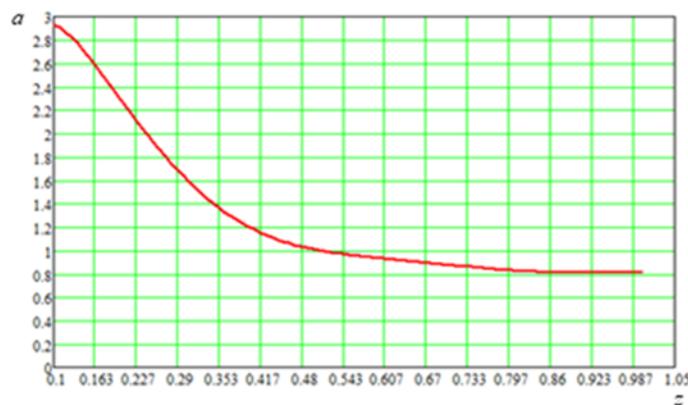


Рис. 3. Компрессия пучка по большой полуоси a вдоль оси z

Здесь  $x, y, z$  - декартовы координаты ( $x$  - циклическая);  $k_1$  - кривизна траектории,  $\theta$  - ее угол наклона к оси  $z$ ;  $u, \varphi, E_v$  - скорость, потенциал и нормальное электрическое поле на траектории. Первое уравнение (5) содержит только продольные производные, а переменная  $x^2$  входит как параметр. Для сокращенного обозначения частных производных использованы следующие символы:

$$h_{2,1} = \frac{\partial h_2}{\partial x^1}, \quad \varphi_{,2} = \frac{\partial \varphi}{\partial x^2}.$$

Решение внешней задачи для геометризованной модели возможно в двух вариантах. Первый связан с выделением эллиптического контура с  $b = \text{const}$  (полуось по  $x$ ) и расчетами формирующих электродов по формулам (4). Второй вариант состоит в рассмотрении задачи для плоской центральной части пучка и отдельном формировании торцевой области. При этом достаточно рассмотреть параксиальный алгоритм решения внешней задачи, когда пучок в системе  $\zeta, x, y$  ( $\zeta=0$  - уравнение катода) трактуется как квазицилиндр с медленно

меняющимся сечением и плотностью пространственного заряда, зависящей только от продольной координаты

$$\varphi = \varphi_i - \rho R e \int_0^v d\eta \int_0^{v-\eta} h^2(u + i\tau, \eta) d\tau \quad (6)$$

Координаты  $u, v$  с конформной метрикой  $h_1=h_2=h$  связаны с контуром сечения пучка  $v=0$ . Для эллиптического сечения или “почти прямоугольных” контуров [1] двойной интеграл в (6) выражается через элементарные функции.

На рис.4 и 5 приведены результаты расчета возможной конфигурации канала для случаев однородности плотности тока по сечению пучка  $\bar{\rho}_0 = 1$  при разном отношении полуосей  $a/b$  пучка ( $a/b = 2, 10$ ). На приведенных рисунках цифрами 1, ..., 5 обозначены эквипотенциали с одинаково уменьшающимися значениями потенциала, точки на периферийных эквипотенциалах соответствуют результатам численного решения системы уравнений (4). Из рисунков видно, что эквипотенциальные кривые вне пучка в системе, связанной с его границей, не являются эллипсами, но могут быть аппроксимированы семейством эллипсов с отношением полуосей  $a/b$ , отличным от соответствующего параметра поперечного сечения электронного потока.

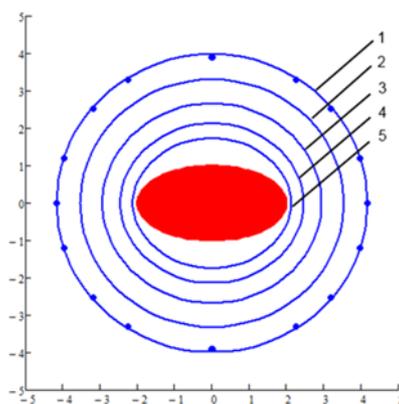


Рис. 4. Конфигурации эквипотенциальных кривых вне пучка (возможных конфигураций канала транспортировки) в случае  $\bar{\rho}_0 = 1$  при соотношении полуосей пучка 2

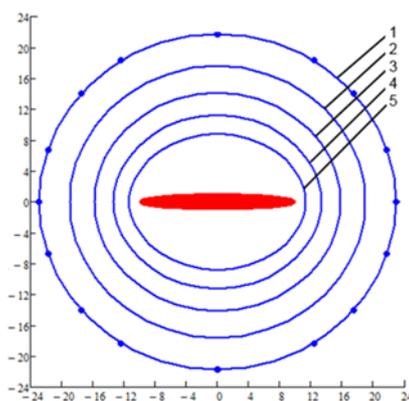


Рис. 5. Конфигурации эквипотенциальных кривых вне пучка (возможных конфигураций канала транспортировки) в случае  $\bar{\rho}_0 = 1$  при соотношении полуосей  $a/b = 10$

1. Сыровой В.А. Теория интенсивных пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 2004.

## **МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ МАГНЕТРОНОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ**

**Д.А.Калашников, П.И.Акимов, О.И.Сенатов, В.Г.Чудин**

*АО НПП «Торий», Россия, Москва, ул. Обручева, 52*

*E-mail: torlab107@mail.ru*

*Аннотация.* Представлена методика настройки предельно-волноводных магнетронов дециметрового диапазона длин волн, используемых в линейных ускорителях электронов, позволяющая увеличить долговечность и стабильность работы приборов.

*Ключевые слова.* Долговечность прибора, коэффициент равномерности, линейный ускоритель, предельно-волноводный магнетрон, распределение высокочастотного поля.

## **METHOD OF TUNING MAGNETRONS USED IN ELECTRON LINEAR ACCELERATOR**

**Kalashnikov D.A., Akimov P.I., Senatov O.I., Chudin V.G.**

*Corporation "Scientific & Research Corp. "Toriy"*

*Obrucheva street, 52, Moscow, Russian Federation,*

*E-mail: torlab107@mail.ru*

*Abstract.* This paper describes a technique of tuning high power cutoff magnetron operating in the decimeter range to increase the power output and durability of the device.

*Keywords.* Cutoff magnetron; durability; linear electron accelerator; microwave field distribution; non-uniformity coefficient.

В связи с широким внедрением линейных ускорителей электронов в медицине, промышленности, сельском хозяйстве и в системах безопасности возникают требования к используемым источникам СВЧ энергии, такие как повышение долговечности, *устойчивость генерации, снижение процента брака и простота эксплуатации.*

Наиболее распространенным источником питания линейных ускорителей электронов являются магнетроны, среди которых особое место занимает предельно-волноводный магнетрон в связи с высоким к.п.д. лампы, относительно низким питающим напряжением, что обеспечивает компактность источников питания. Специфической особенностью магнетрона как генератора является сильная зависимость выходной мощности и частоты от сопротивления нагрузки.

Особенностью предельно-волноводного магнетрона является возможность получения больших величин выходных мощностей, определяемых существенной увеличенной длиной анодного блока. Однако такой конструкции присущи недостаточный гарантированный срок службы и сложности настройки электродинамических параметров прибора. Данные проблемы взаимосвязаны, требуется увеличить гарантированный срок службы при условии сохранения рабочих параметров и небольших изменениях конструкции. На каждом этапе производства магнетрона производятся измерения его параметров и настройка, поэтому важным является определение характера зависимостей в данном типе магнетрона, чтобы можно было сохранить как частоту прибора, так и равномерность распределения высокочастотного поля вдоль пространства взаимодействия, чтобы повысить долговечность.

Из-за появления асимметрии, возникающей при перемещении элемента механизма настройки частоты, возникают нестабильности в работе прибора, «перескоки» частоты, падение электронного к.п.д., возрастание электронного смещения частоты, перегревы и разрушение катода.

Целью работы являлось исследование особенности электродинамической системы предельно-волноводного магнетрона вблизи критической частоты на примере серийно изготавливаемого магнетрона МИ – 470, работающего на частоте 1885 МГц с выходной импульсной мощностью 10 МВт. Величина средней мощности 30 кВт, исходная гарантированная долговечность – 2000 ч. Прибор работает на основном  $\pi$ -виде колебаний двумерно-периодической замедляющей системы типа многокамерного волновода, нагруженного в осевом направлении емкостными элементами (связками) [4]. Длина резонаторного блока равна  $2\lambda$  ( $\lambda$  - длина волны в свободном пространстве). В связи с особенностями системы охлаждения на границах электродинамическая система закорочена,

и распределение высокочастотного поля вдоль оси на основном виде представляет собой полупериод синусоиды [коэффициент неравномерности  $K_n = (U_{\max}^2 / U_{\text{cp}}^2 - 1) \approx 1$ , где  $U_{\max}$  и  $U_{\text{cp}}$  – максимальное и среднее значения напряжения высокочастотного поля соответственно]. Для повышения срока службы прибора необходимо было существенно снизить коэффициент неоднородности продольной составляющей вч поля в пространстве взаимодействия. Для решения задачи на обоих концах однородной части замедляющей системы размещались корректирующие ячейки. Геометрия концевых корректирующих ячеек выполнялась аналогично центральным ячейкам резонаторной системы, но с возможностью регулировки их емкостных сопротивлений.

При настройке приборов удается в некоторых случаях значительно снизить параметры неоднородности. Но в связи с тем, что результаты настройки не могут быть заранее количественно спрогнозированы и в процессе настройки изменения ёмкостей могут оказаться необратимыми, возникла необходимость проведения анализа осевого распределения ВЧ поля вдоль магнетрона.

Особенности работы электродинамической системы прибора были исследованы с применением простейшей модели в виде передающей линии с дисперсией, нагруженной реактивными сопротивлениями (рис. 1).

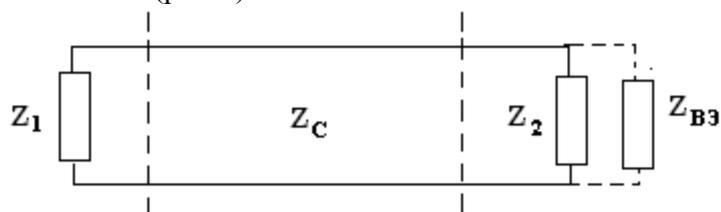


Рис. 1. Эквивалентная схема магнетрона с длинным анодом

( $Z_1, Z_2$  - величина нагрузки корректирующих резонаторов,  $Z_c$  - волновое сопротивление линии,  $Z_{BЭ}$  - сопротивление вывода энергии)

Для области частот, близких к критической частоте электродинамической системы  $\chi$ , задача может быть решена с использованием телеграфных уравнений, в которых постоянная распространения выражена через критическую частоту [5,6].

Выражение для продольной составляющей высокочастотного поля, полученное в работах [1,2,7], имеет вид

$$\dot{U}_h = \dot{A}^+ e^{-K \cdot z} + \dot{A}^- e^{K \cdot z} + \dot{U}_h^0, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_h^0$  является величиной, независимой от координаты  $z$ ,

$\dot{A}^+, \dot{A}^-, \dot{U}_h, \dot{U}_h^0$  - комплексные величины.

В итоге амплитуды ВЧ поля можно выразить в виде соотношений

$$\dot{U}_h^0 = -\frac{\chi f_{zh}}{K^2} - \frac{i \omega_0}{K^2}, \quad (2a)$$

$$\dot{A}^+ = \frac{1}{K^2 (e^{k \cdot l} - e^{-k \cdot l})} (\dot{\alpha}_1 e^{k \cdot l} - \dot{\alpha}_2), \quad (2b)$$

$$\dot{A}^- = \frac{1}{K^2 (e^{kl} - e^{-kl})} (-\dot{\alpha}_1 e^{-kl} + \dot{\alpha}_2), \quad (2c)$$

где

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{\chi f_{zh} - K^2 f_h Z_{i2} / i \omega_0}{1 - K^2 Z_{i2} / i \omega_0} + i \frac{\omega_0 j_h}{1 - K^2 Z_{i2} / i \omega_0}, \quad (3a)$$

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\chi f_{zh} - K^2 f_h Z_{i1} / i\omega_0}{1 - K^2 Z_{i1} / i\omega_0} + i \frac{\omega_0 j_h - \eta K^2 Z_{H1} / i\omega_0}{1 - K^2 Z_{i1} / i\omega_0}. \quad (3b)$$

Анализ системы (1-3) показывает, что при изменении сопротивления концевых резонаторов  $Z_1$  и  $Z_2$  перестройка частоты основного вида  $\omega_0$  приводит к изменению характера распределения высокочастотного поля этого вида в электродинамической системе. Если частота основного вида ниже критической ( $\omega_0 < \chi$ ), распределение имеет экспоненциальный характер; при  $\omega_0 = \chi$  поле однородно по длине; в области выше критической частоты ( $\omega_0 > \chi$ ) с увеличением частоты происходит плавное уменьшение постоянной составляющей ВЧ поля и увеличение синусоидальной составляющей пространственного распределения его амплитуды.

Предложенная методика была использована для коррекции формы продольного распределения высокочастотного поля в пространстве взаимодействия магнетрона. Результат применения методики коррекции представлен на рис.2 (кривая 2). Для сравнения здесь же дана картина распределения поля в электродинамической системе без коррекции (кривая 1). Измерения проводились методом возмущающего тела. Представленные результаты показывают, что применение коррекции позволяет снизить значение коэффициента неравномерности с 0.85 до 0.5 (примерно в 1.7 раза). В результате коррекции формы продольного распределения высокочастотного поля ресурс прибора возрастет предположительно не менее чем в 1.5 раза.

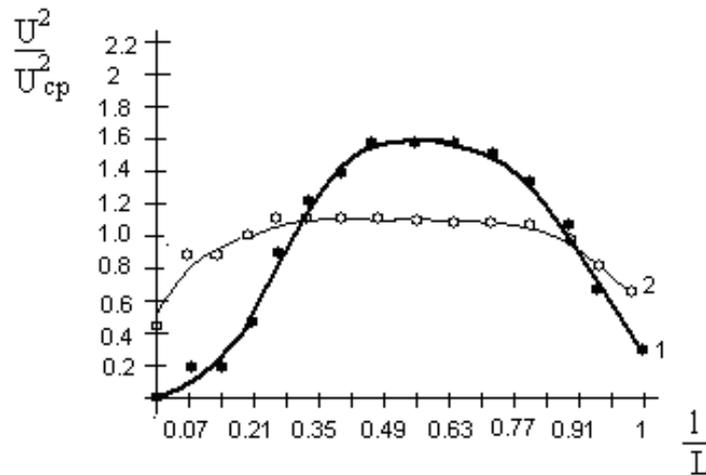


Рис.2. Распределение ВЧ поля вдоль ЗС (эксперимент):  
 кривая 1 – распределение поля в электродинамической системе без коррекции,  
 кривая 2 – результат применения коррекции

Предложенная методика позволяет провести предварительную оценку параметров концевых ячеек замедляющей системы, необходимых для увеличения однородности распределения ВЧ поля рабочего вида в пространстве взаимодействия магнетрона с длинным анодом. Достоинством работы является также то, что выявленные физические закономерности позволяют оценивать и корректировать результаты проведения финишной настройки электродинамической системы приборов аналогичного типа [3] в процессе производства.

### Библиографический список

1. Акимов П.И., Калашников Д.А., Мельничук Г.В., Сенатов О.И., Сигалаев В.Н. Особенности работы замедляющих систем вблизи критической частоты и их использование для улучшения характеристик предельно-волноводного магнетрона// Радиотехника и электроника. №12. 2011. С.1511-1513.
2. Асташов С.Г., Калашников Д.А., Мельничук Г.В., Сигалаев В.Н. Результаты моделирования процессов настройки резонаторного блока предельно-волноводного магнетрона// Доклады III Всероссийской конференции «Электроника и микроволновая СВЧ». Санкт-Петербург, июнь 2014 г. С.199-202.

3. Калашников Д.А., Мельничук Г.В., Сенатов О.И., Сигалаев В.Н. Расчет и конструирование предельно-волноводного магнетрона с магнитной реверсной системой// Прикладная физика. № 2. 2012. С. 86-89.
4. Бут Г. Магнетроны с длинным анодом. Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями. М.: Изд. иностранной литературы, 1961. Т. 2. С. 236 – 248.
5. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Советское радио, 1966.
6. Машковцев Б.М., Цибизов К.Н., Емелин Б.Ф. Теория волноводов. М.; Л.: Наука, 1966.
7. Kalashnikov D.A., Melnichuk G.V., Senatov O.I., Sigalaev V.N. On the Slow-Wave Structure Operation in the Vicinity of the Cutoff Frequency and Means to Enhance the Cutoff Magnetron Life Characteristics. 14-th IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2013. 21-23 May 2013. Paris, France.

УДК 621.52; ГРНТИ 47.29.37

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛИЧЕСКОГО СВЧ ДЕФРОСТЕРА

**К.П. Дударев, А.В. Коннов**

*АО «НПП «Торий», Россия, Москва, ул. Обручева, 52*

*E-mail: torlab107@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматривается вопрос оптимизации размеров и положения диссектора и отражательных стенок в камере дефростера, заданных параметров для равномерного прогрева мясного блока.

*Ключевые слова.* СВЧ дефростер, диссектор.

## CYCLIC MICROWAVE DEFROSTER OPTIMIZATION

**K.P. Dudarev, A.V. Konnov**

*Corporation "Scientific & Research Corp. "Toriy"*

*Obrucheva street, 52, Moscow, Russian Federation,*

*E-mail: torlab107@mail.ru*

*Abstract.* Optimization of the dissector size and position and the defroster microwave chamber reflective walls for the uniform heating of the meat block is considered.

*Keywords.* Microwave defroster, dissector.

Пищевая промышленность России ежегодно перерабатывает миллионы тонн замороженного мяса. Для этих целей применяются различные системы размораживания исходной мясной продукции. Наиболее эффективными из них являются СВЧ системы размораживания, так называемые СВЧ дефростеры. Дефростером называется устройство, имеющее в своей конструкции СВЧ-камеру и источник СВЧ излучения.

В процессе размораживания микроволны излучаются генератором СВЧ энергии и по волноводам передаются в рабочую зону СВЧ-камеры. Известно, что энергия микроволн преобразуется в тепло вследствие диэлектрических потерь в продукте. Дефростер служит для размораживания различных типов продукции: мяса, рыбы, птицы; и для каждого типа используются различные по мощности и частоте генераторы СВЧ энергии. В качестве генератора в дефростере для размораживания мяса обычно используется магнетрон, работающий на частоте 915 МГц.

Для равномерного нагрева мясного блока в камере используется один из двух способов: либо вращающийся поддон, либо рассеиватель микроволн (диссектор). Сам нагрев длится, как правило, 2-3 минуты. Такие камеры ставятся в крупных ресторанах, кораблях дальнего плавания и на предприятиях мясоперерабатывающей промышленности.

В домашних условиях использование вращающегося поддона более рационально в силу малых габаритов и веса размораживаемых продуктов, однако в случае промышленного использования поворотный механизм подноса под большим весом недолговечен, к тому же подобный механизм будет заметно усложнять конструкцию СВЧ дефростера, и как следствие, повышать его стоимость. Использование камеры с диссектором в промышленном дефростере позволяет уменьшить расходы на производство поворотного механизма, сэкономить место в конструкции СВЧ дефростера, увеличить долговечность и практичность механизма изменения поля [1].

Размеры оптимизируемой камеры дефростера 1000x1000x800 мм. Габариты камеры выбраны так, чтобы по каждой из координат укладывалось несколько полуволн. В этом случае камера является многомодовым резонатором. В силу нестабильности системы моды в такой камере будут меняться во времени даже без использования диссектора. Окна ввода энергии в камеру расположены друг относительно друга под углом 90° для уменьшения

влияния магнетронов друга на друга. Окна ввода энергии располагаются на верхней стенке для того, чтобы вектор напряженности электрического поля  $E$  в любой точке был направлен параллельно плоскости мясного блока для эффективного нагрева. При такой направленности поле, проходя через границу сред, не ослабевает (непрерывность тангенциальной компоненты), однако если поле будет проходить границу сред под углом, то оно будет ослабляться в  $\epsilon$  раз [2].

Диссектор выполнен в виде уголкового отражателя для того, чтобы отражать волны не в сторону генераторов, снижая таким образом нагрузку на генераторы. Также уголкового форма диссектора увеличивает его жесткость.

Если мясо прогревается неравномерно, это приводит к локальному перегреву поверхности. Таким образом, конструкция диссектора нуждается в оптимизации. Суть оптимизации заключается в следующем: необходимо изменить параметры диссектора так, чтобы уменьшить или вовсе устранить пятна локального нагрева мясного блока в камере дефростера, сохраняя при этом относительно небольшой коэффициент отражения на входах в волноводы. После ряда расчетов по изменению длины и ширины лопастей диссектора и высоты положения диссектора относительно верхней стенки камеры лопасти диссектора получили следующие размеры: длина 310 мм, ширина 40 мм, толщина 1 мм. Расстояние от верхней стенки камеры дефростера 60 мм.

На рис. 1 приведена расчётная модель камеры дефростера, а на рис. 2 - выбранная конструкция диссектора.

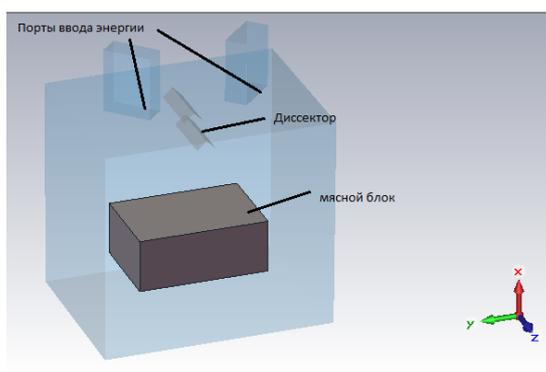


Рис. 1 Трёхмерная модель камеры дефростера

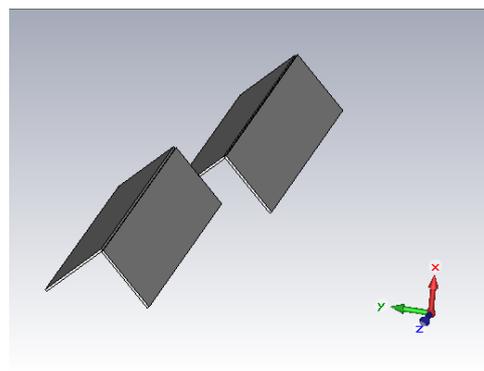


Рис. 2 Трёхмерная модель диссектора

В ходе оптимизации были проведены расчеты данной системы, в результате которых планировалось определить элементы матрицы рассеяния  $S_{11}$  (коэффициенты отражения на портах), КСВн, распределение потока энергии внутри камеры дефростера, распределение локального тепловыделения в мясном блоке. Расчеты проводились с двумя положениями диссектора: поперек и вдоль задней стенки, чтобы увидеть изменение поля при вращении диссектора. Излучение из волноводов предполагалось синфазным.

По определению КСВн:

$$КСВн = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|},$$

где  $S_{11}$  - коэффициент отражения на портах на частоте 915 МГц.

Допустимый уровень КСВн для нормальной работы магнетрона не должен превышать значений 2-3.

На рис. 3-6 представлены результаты расчета.

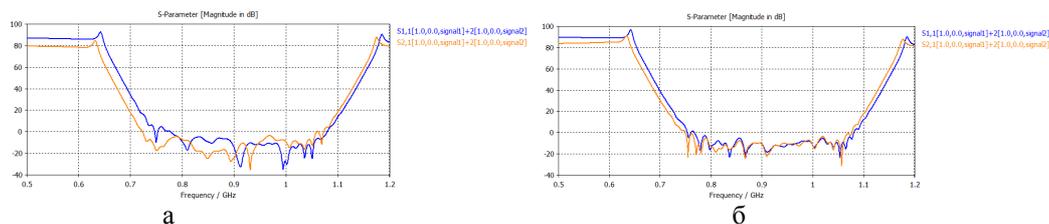


Рис. 3. Частотная зависимость  $S_{11}$ : а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен задней стенке

Из рис. 3 следует, что на частоте 915 МГц КСВн = 1,08, когда диссектор параллелен задней стенке камеры дефростера и КСВн = 1,1, когда диссектор перпендикулярен к задней стенке камеры дефростера.

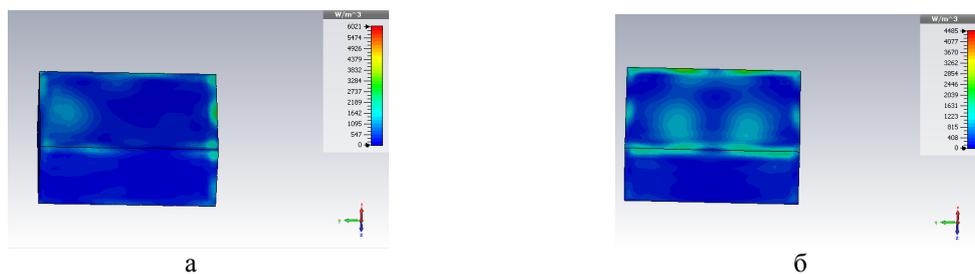


Рис. 4. Тепловыделение в мясном блоке: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

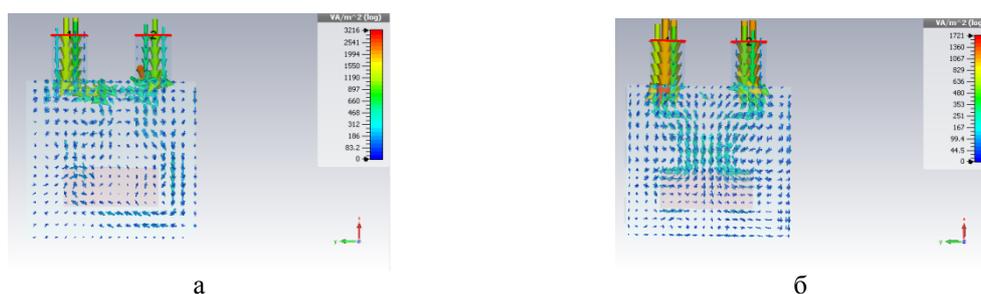


Рис. 5. Распределение потока СВЧ мощности в камере дефростера, вид спереди: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

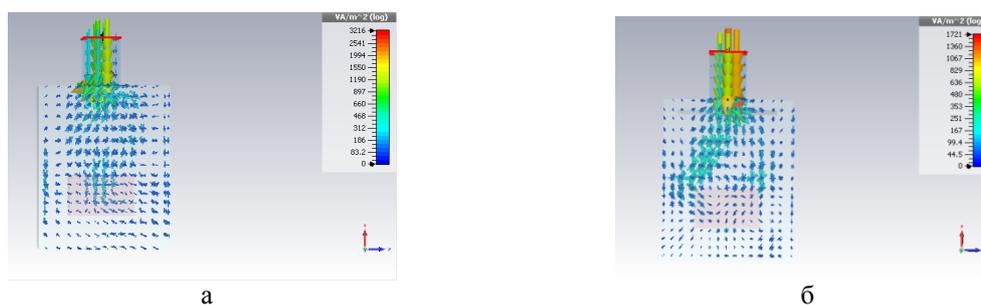


Рис. 6. Распределение потока СВЧ мощности в камере дефростера, вид сбоку: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

Из полученных данных видно, что пятна локального нагрева меняют свое местоположение в зависимости от положения диссектора, что означает, что поле хорошо перемешивается. Перегрев остается лишь на ребрах мясного блока. Это вызвано тем, что на ребрах слой мяса очень тонкий и прогрев осуществляется быстрее. В действительности, мясные блоки, упакованные в стандартные коробки, не имеют острых углов.

Расположение окон ввода энергии на верхней стенке камеры дефростера позволяет создать наиболее равномерный прогрев мясного блока во всех точках, однако такое положение волноводов не является единственным конструктивно возможным решением. В связи с этим рассмотрены, в частности, варианты расположения окон ввода энергии на задней стенке камеры дефростера. Окна ввода также располагаются перпендикулярно друг к другу. Из-за изменения положения окон ввода была необходима оптимизация диссектора. Диссектор был сдвинут на 250 мм вниз и на 100 мм вправо, чтобы он располагался ниже уровня окон ввода. Новая конструкция камеры дефростера представлена на рис. 7. На рис. 8,9 представлены результаты расчета измененной конструкции камеры дефростера.

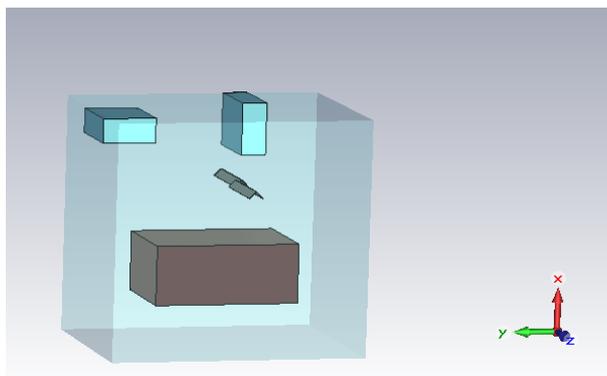


Рис. 7. Трехмерная модель камеры дефростера. Волноводы располагаются на задней стенке

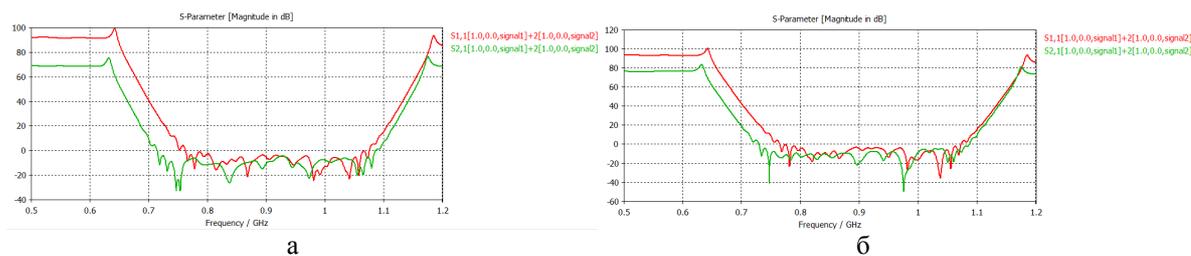


Рис. 8. С-параметры: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

Из рис. 8 следует, что на частоте 915 МГц КСВн = 1,29, когда диссектор параллелен задней стенке камеры дефростера, и КСВн = 1,5, когда диссектор перпендикулярен к задней стенке камеры дефростера.

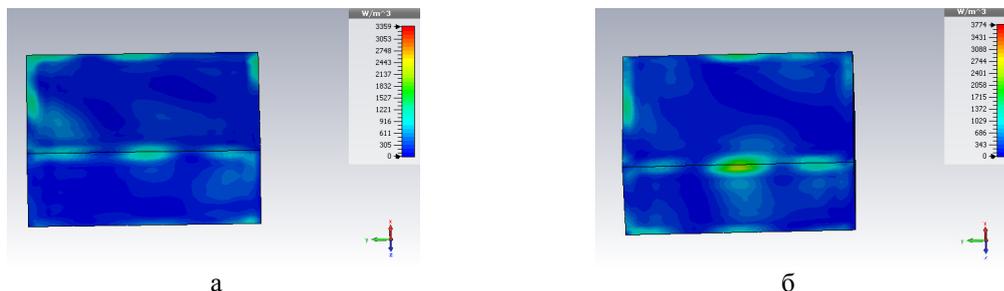


Рис. 9. Тепловыделение в мясном блоке: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

Из полученных данных видно, что нагрев по всему объему мяса практически равномерен, а незначительные области повышенного нагрева меняют свое положение при вращении диссектора, что означает, что поле изменяется, а значит, диссектор хорошо оптимизирован. Сильный нагрев сохраняется лишь на ребрах мясного блока. Также полученные расчеты показывают, что поле плохо распространяется в нижней части мясного блока, а основной поток приходится на верхнюю часть. Для лучшего проникновения СВЧ поля в объем блока предлагается добавить в конструкцию камеры дефростера дополнительные отражающие пластины.

Для того чтобы СВЧ энергия лучше распределялась по пространству камеры и действовала на мясной блок со всех сторон, было предложено добавить в конструкцию камеры дефростера отражающие пластины. После ряда расчетов с различными вариантами положения пластин была выявлена наиболее оптимальная конструкция с тремя дополнительными пластинами. Одна наклонная пластина (угол наклона 50°), соединяющая переднюю и верхнюю стенки камеры, позволяет отразить поток и направить его на мясной блок, две пластины на боковых стенках камеры шириной по 100 мм позволяют изменить распределение СВЧ поля так, чтобы поле воздействовало на мясной блок со всех сторон. На

рис. 10 представлена новая модель камеры дефростера. На рис. 11,12 представлены результаты расчета новой конструкции камеры дефростера.

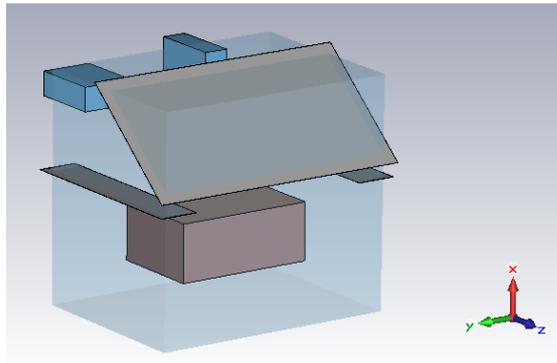


Рис. 10. Трехмерная модель камеры дефростера с применением отражающих пластин

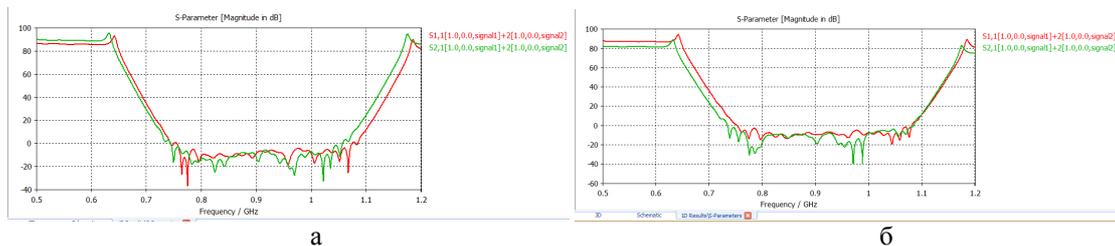


Рис. 11. С-параметры: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

Из рис. 11 следует, что на частоте 915 МГц КСВн = 1,29, когда диссектор параллелен задней стенке камеры дефростера, и КСВн = 1,3, когда диссектор перпендикулярен к задней стенке камеры дефростера.

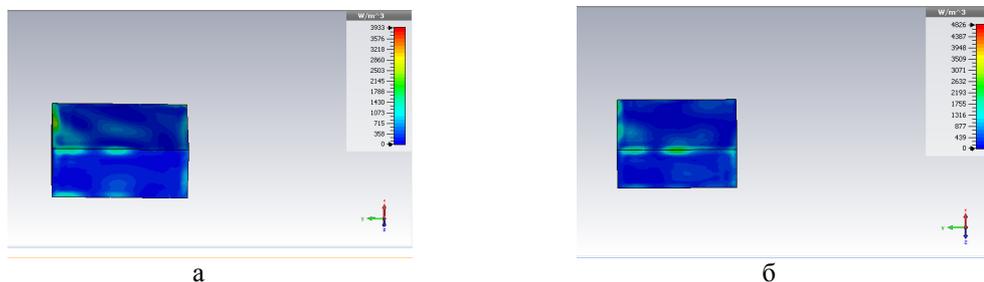


Рис. 12. Тепловыделение в мясном блоке: а – диссектор параллелен задней стенке, б – диссектор перпендикулярен к задней стенке

Из полученных данных следует, что СВЧ поле в области мясного блока распространяется более равномерно по всему объему и нагрев по всему объему мяса практически равномерен. Незначительные области повышенного нагрева меняют свое положение при вращении диссектора, другими словами, диссектор и камера хорошо оптимизированы.

В ходе работы удалось оптимизировать камеру циклического СВЧ дефростера. Конструкция камеры, выходы волноводов в которой располагаются в верхней стенке, более проста с точки зрения оптимизации, однако с помощью дополнительных отражающих элементов удалось хорошо оптимизировать конструкцию камеры, выходы волноводов в которой располагаются в задней стенке.

### Библиографический список

1. Окресс Э. СВЧ-энергетика. Т. 3. Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике. М.: Книга по требованию, 2012.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.2. М.: Высшая школа, 1970.

## **НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ ДЕФЕКТАМИ ЭМИТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫХ КАТОДОВ**

**М.Д. Воробьев\*, Я.С. Кумов\*, В.Г. Чудин\*\*, Д.Н. Юдаев\***

*\*Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт",  
Россия, Москва, mpei-ep@mail.ru*

*\*\* Научно-производственное предприятие "ТОРИЙ"  
Россия, Москва, npptoriy@mtu-net.ru*

*Аннотация.* Приведены результаты исследования спектральных характеристик низкочастотных шумов, создаваемых дефектами эмитирующей поверхности металлопористых катодов. Установлено существование составляющих шума с характерной частотной зависимостью и предложен механизм их возникновения. Показано, что количественные характеристики этих составляющих коррелируют с эффективной работой выхода катода.

*Ключевые слова.* Низкочастотный шум, металлопористый катод, эмитирующая поверхность, дефекты

### **LOW-FREQUENCY NOISE CREATED BY EMITTING SURFACE IMPERFECTIONS OF HOT CATHODES**

**M.D. Vorobyev\*, Y.S. Kumov\*, V.G. Chudin\*\*, D.N. Yudaev\***

*\*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Moscow, Russia, mpei-ep@mail.ru*

*\*\* Research and Production Enterprise "TORIY"  
Moscow, Russia, npptoriy@mtu-net.ru*

*Abstract.* The results of research of low-frequency noise generated by defects at impregnate cathode emitting surface are presented. The existence of noise components with characteristic frequency dependence is found and the mechanism of their occurrence is suggested. It is shown that the quantitative characteristics of these components correlate with the effective work function of the cathode.

*Keywords.* Low-frequency noise, impregnate cathode, emitting surface, defects

Среди методов диагностики изделий электронной техники особое место занимают электрофлуктуационные методы благодаря их уникально высокой чувствительности к дефектам, вызванным технологическими и конструктивными недостатками. Диагностика связана, как правило, с измерением флуктуационных шумов токов в цепях диагностируемых изделий или отдельных узлов. Хорошо известна эффективность практического использования шумов для оценки качества таких изделий, как резисторы, биполярные транзисторы и операционные усилители. В то же время использование шумов при проведении диагностики электровакуумных приборов и их узлов с целью определения надежности в значительной степени ограничивается как техническими трудностями и сложностями создания оборудования, приспособленного для помехозащищенных измерений, так и недостаточными представлениями о механизмах возникновения шумов.

С точки зрения надежности электровакуумных приборов в первую очередь внимания заслуживает катодно-подогревательный узел и используемый в нем термоэлектронный катод, на работу которого чаще всего влияют деградационные изменения. Деградация эмиссионных свойств катодов, как известно, приводит к ухудшению параметров приборов и служит одной из основных причин отказов. Исходное состояние катода и его эмитирующей поверхности, отсутствие или минимальное содержание дефектов поэтому находятся в центре внимания при разработке диагностических методов.

В настоящей работе отражены результаты исследований дефектов эмитирующей поверхности металлопористых (МПК) катодов с Os покрытием с целью получения информации о степени их влияния на результирующие интегральные эмиссионные характеристики, непосредственно определяющие выходные параметры приборов.

Исследуемые МПК с диаметром эмитирующей поверхности 1,3 мм помещались в экспериментальные образцы с диодной системой электродов. Для измерений шумов использовался специально разработанный мобильный измерительный комплекс, в котором создаваемый отбираемым током шум поступает на вход многокаскадного сверхмаломощного усилителя, где преобразуется до уровня, не чувствительного к помехам

и приемлемого для дальнейшей его цифровой обработки. Далее производится необходимая аналоговая фильтрация и оцифровка, после чего – обработка в компьютере при помощи специального программного обеспечения. Диапазон частот выбирался таким образом, чтобы обеспечить возможность определения основных шумовых компонент – дробовой частотонезависимой и фликкерной частотозависимой. Типичные спектральные характеристики экспериментальных диодов при различных отбираемых токах в режиме глубокого пространственного заряда показаны на рис. 1.

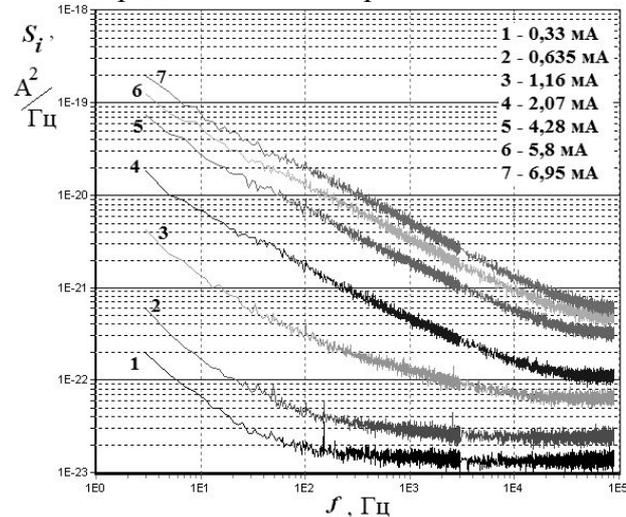


Рис.1. Спектральные характеристики шума при разных токах, отбираемых с катода

Согласно [1], уровень шумов, создаваемых МПК в диодных системах, определяется слабозэмитирующими участками, находящимися в режиме насыщения, то есть дефектами эмитирующей поверхности. При этом объем информации о дефектах, которую содержат спектральные характеристики шума, различен для различных компонент шума. Так, в частности, если для частотонезависимой компоненты информация содержится только в ее уровне, то для фликкерной – еще и в форме ее спектральной характеристики. С учетом этого основное внимание при исследованиях было сосредоточено на фликкерной компоненте. На рис.2 показаны характеристики нескольких экспериментальных диодов для одинаковых режимов работы, полученные для каждого путем вычитания частотонезависимой дробовой компоненты.

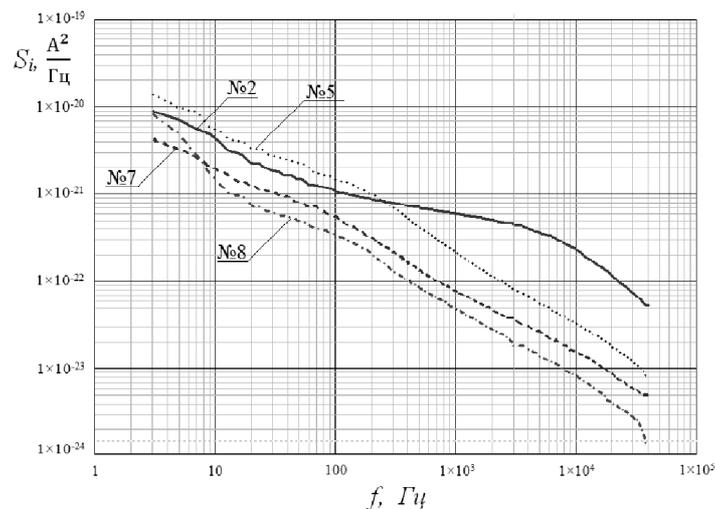


Рис.2. Спектральные характеристики шума экспериментальных образцов при  $I_a=5.8\text{mA}$

Нетрудно видеть, что каждую из выделенных спектральных характеристик можно рассматривать как сумму двух составляющих с различной формой зависимости от частоты  $f$ . Одна из составляющих  $\sim 1/f$ , что характерно для фликкер-шума, а другая имеет более сложный характер с переходом на частоте  $f_{пер}$  при уменьшении  $f$  к пологому участку. С

учетом того, что эта составляющая имеет сходство со спектром генерационно-рекомбинационного шума в полупроводниках с ловушками, в дальнейшем будем называть ее релаксационной составляющей. Механизм возникновения такой составляющей может быть обусловлен миграцией активирующих атомов по эмитирующим пятнам в пределах дефектов, а частота перехода связана с геометрическими размерами пятен [2]. В том случае когда размеры пятен приблизительно одинаковы, в спектральной характеристике наблюдается отчетливо выраженная релаксационная составляющая. Если же разброс пятен по размерам значителен, то спектральная характеристика формируется как сумма релаксационных составляющих от каждого пятна, что в целом может приближать ее к виду  $f^{-1}$ . В [3], например, показано, как происходит переход спектральной характеристики шума с релаксационным спектром к характеристике  $\sim f^{-1}$  при термомеханическом воздействии на полупроводниковые образцы, изменяющем ширину распределения ловушек по эффективному сечению. Таким образом, можно считать, что спектральная характеристика шума в области низких частот формируется исключительно из одинаковых по форме, но различных по уровню и значениям  $f_{nep}$  составляющих подобно формированию спектра  $1/f$  в теории Ван дер Зила [4]. Отличие состоит лишь в том, что релаксационные составляющие для высокочастотной части имеют зависимость вида  $f^{-3/2}$ , определяемую поверхностной диффузией атомов.

В [4] с помощью моделирования процессов поверхностной диффузии были найдены «базовые» релаксационные компоненты для различных размеров пятен в дефектных участках. В дальнейшем проводилась процедура синтеза характеристик на рис.2 на основе подбора совокупности этих компонент с различными размерами круглых пятен диаметром  $d$ . Если обозначить относительное число необходимых для синтеза релаксационных составляющих с диаметром  $d$  как  $F(d)$ , то эта зависимость будет представлять количественную характеристику неоднородности дефектных слабоэмитирующих участков.

Важным и обязательным этапом в процедуре синтеза измеренной спектральной характеристики является ее сглаживание, то есть преобразование в непрерывную гладкую функцию в отличие от исходной, которая получена с использованием алгоритмов цифровой обработки и поэтому таковой не является. На основе анализа различных способов сглаживания был выбран процентильный фильтр [5]. Эффективность действия фильтра иллюстрируется на рис. 3,а и рис. 3,б, где показаны участки спектральных характеристик, полученные сглаживанием при использовании различных значений числа элементов в окне фильтра.

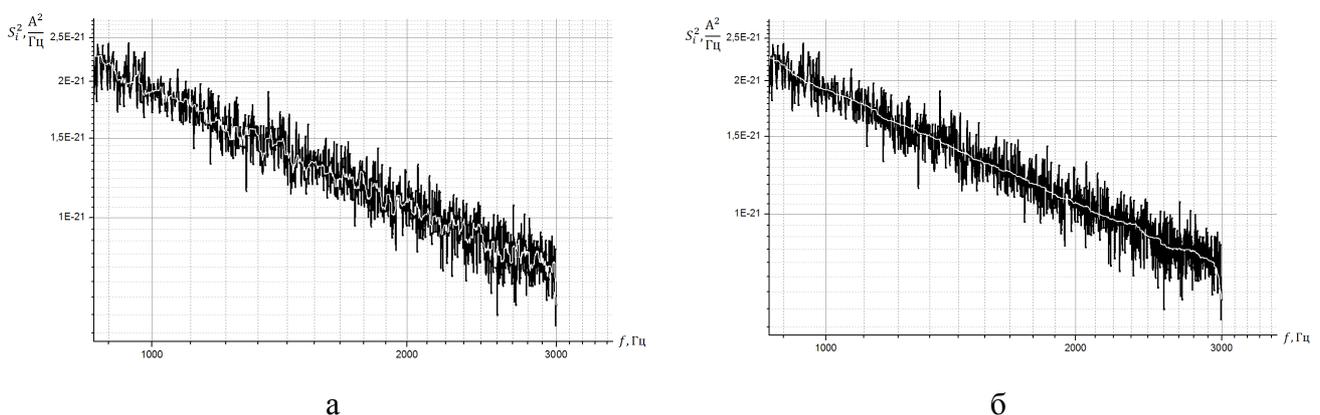


Рис. 3. Исходная и сглаженная по методу процентильного фильтра спектральные характеристики. Размер окна фильтра: а) 11 элементов, б) 121 элемент

Типичные результаты определения  $F(d)$  для одного из экспериментальных диодов показаны на рис.4, где приведены данные до и после длительной наработки, приводящей к существенным ухудшениям интегрального эмиссионного параметра – эффективной работы выхода  $e\varphi$ .

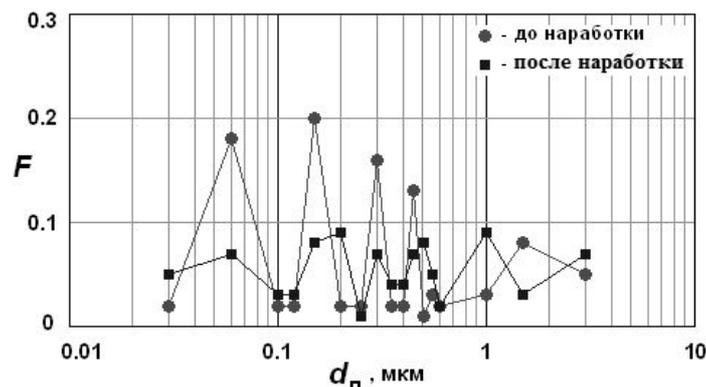


Рис.4. Результаты синтеза спектральных характеристик в относительных единицах  $F(d)$

Как видно, большим  $e\varphi$  соответствует меньший разброс по значениям  $F$ , а при низких  $e\varphi$  максимальный вклад в шум вносят только 4 из 17 составляющих с различными  $d$ .

### Библиографический список

1. М.Д.Воробьев, М.Н. Чирков, В.В.Чубаров, Д.Н.Юдаев. Электрофлукуационная диагностика эмитирующей поверхности термокатодов/ М.Д.Воробьев и др. // Электронная техника, сер.1, СВЧ-техника. 2012. Вып.1(512).
2. М.Д. Воробьев, Д.Н.Юдаев. Токовые НЧ шумы как высокочувствительный инструмент для оценки качества термокатодов. Флукуационные и деградационные процессы в полупроводниковых приборах/ М.Д. Воробьев, Д.Н.Юдаев// Материалы международного научно-методического семинара. М., 2009. С.50 –57.
3. М.Д.Воробьев, С.М.Склизнев, О.Ю.Трусова Оценка возможности оптимизации технологических режимов по уровню низкочастотных шумов диодов Ганна/ М.Д.Воробьев, С.М.Склизнев, О.Ю.Трусова // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1986. Вып.10. С. 40-42.
4. Ван дер Зил А. Флукуации в радиотехнике и физике/А. Ван дер Зил; пер. с англ. под ред. А.К. Нарышкина. М.: Госэнергоиздат. 1968. 296 с.
5. Кузьмин С.А. Исследование комбинации детектора импульсного шума в бинарных изображениях и процентильных фильтров /С. Кузьмин // Международная заочная научно-практическая конференция «Естественные и математические науки в современном мире». Новосибирск, 2013.

УДК 621.52; ГРНТИ 47.29.37

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНЕТРОНА ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

П.И. Акимов, С.Г. Асташов, Д.А. Калашников, Н.С. Котрелева, А.В. Коннов, В.Н. Сигалаев, В.Г. Чудин  
АО «НПП «Торий», Россия, Москва, ул. Обручева, 52  
E-mail: torlab107@mail.ru

*Аннотация.* Представлены результаты проектирования магнетрона дециметрового диапазона длин волн, предназначенного для использования в системах СВЧ-энергетики, с выходной мощностью 4 кВт. Приведены результаты расчета: электродинамической и магнитной систем, вывода энергии и нестационарного динамического режима взаимодействия электронного потока с ВЧ-полем.

*Ключевые слова.* Магнетрон дециметрового диапазона, трехмерное моделирование.

### UHF MAGNETRON DESIGN

P.I. Akimov, S.G. Astashov, D.A. Kalashnikov, N.S. Kotreleva, A.V. Konnov, V.N. Sigalaev, V.G.Chudin  
Corporation "Scientific & Research Corp. "Toriy"  
Obrycheva street, 52, Moscow, Russian Federation,  
E-mail: torlab107@mail.ru

*Abstract.* The results of the design of a UHF magnetron intended for use in microwave energetics, with an output power of 4 kW are discussed. The results of calculation: electrodynamic and magnetic systems, output circuit and non-stationary dynamic mode.

*Keywords.* UHF magnetron, three-dimensional modeling

Широкое внедрение СВЧ-технологий в промышленности (мясной, сельскохозяйственной, химической, порошковой металлургии и т.д.) стимулирует разработку высокоэффективных мощных СВЧ источников, в частности промышленных магнетронов дециметрового диапазона длин волн. Так, для систем СВЧ размораживания и сублимационной СВЧ сушки остро ощущается потребность в магнетронных генераторах непрерывного действия мощностью 4–8 кВт в диапазоне 915 МГц [1]. Например, магнетрон непрерывного действия дециметрового диапазона с выходной мощностью 4 кВт

обеспечивает концентрацию мощности около  $0,1-0,3 \text{ Вт/см}^3$  в рабочих СВЧ-камерах установок.

В процессе выполнения данной работы решена задача проектирования электродинамической системы магнетрона. Электродинамическая система (ЭДС) проектируемого прибора выполнена в виде десятирезонаторного анодного блока с двойными двухсторонними связками. На рис. 1 схематически представлен анодный блок с обозначением основных параметров.

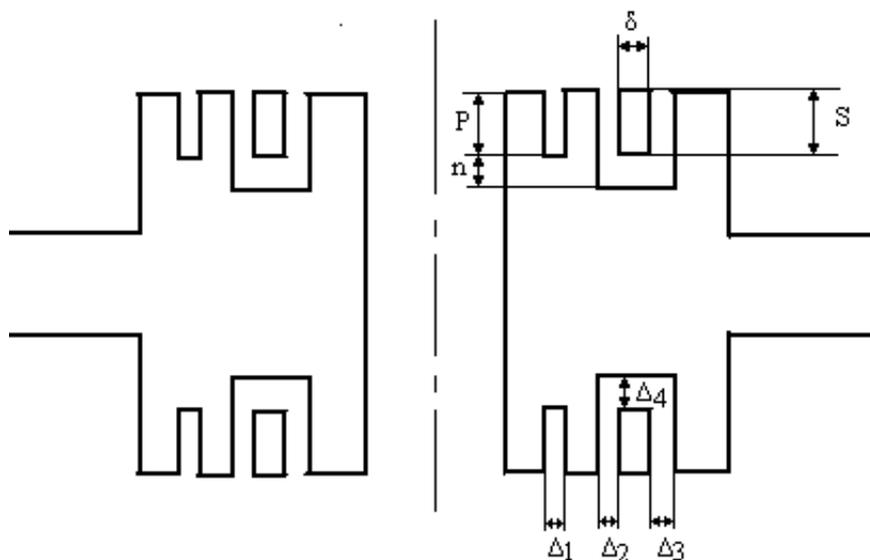


Рис.1. Параметры электродинамической системы

При расчете геометрических размеров анодного блока электродинамической системы [2] были использованы параметры существующего магнетрона дециметрового диапазона с рабочей частотой, близкой к разрабатываемому, с коррекцией размеров связок и канавок по методике, предложенной в [1]. Требуемая частота обеспечивается выбором высоты связок 4.4 мм (рис.2.).

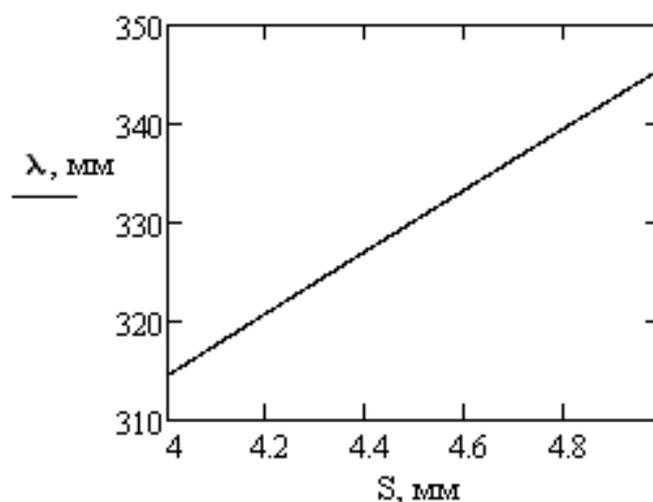


Рис. 2. Зависимость длины волны от высоты связок

В таблице приведены параметры анодного блока проектируемого прибора.

Параметры, мм	Ra	Rб	Rсв1	Rсв2	$\tau$	$\omega$	$\Delta 1$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$	$\delta$	S
	7.5	30	12.5	14.5	3	1.7	0.5	1	0.5	1	1	4.4

В таблице введены следующие обозначения:  $R_a$  – радиус анода,  $R_b$  – радиус сегмента,  $R_{св1}$ ,  $R_{св2}$  – радиус связи,  $\tau$  – толщина ламели,  $\omega$  – ширина щели резонатора,  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta_4$  – конденсаторные промежутки,  $\delta$  – ширина связи,  $S$  – высота связи.

Численное трехмерное моделирование электродинамической системы (рис.3) проведено с использованием подпрограммы Eigenmode solver [3], что позволило получить распределение электрического ВЧ-поля (рис.4) и значение частоты рабочего  $\pi$ -вида колебаний.

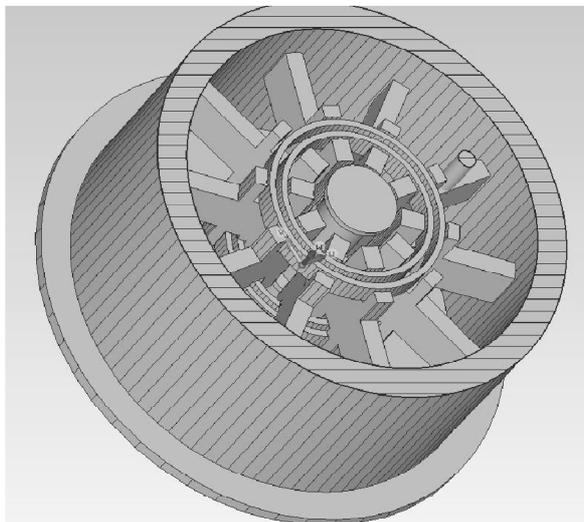


Рис. 3. Поперечное сечение электродинамической системы

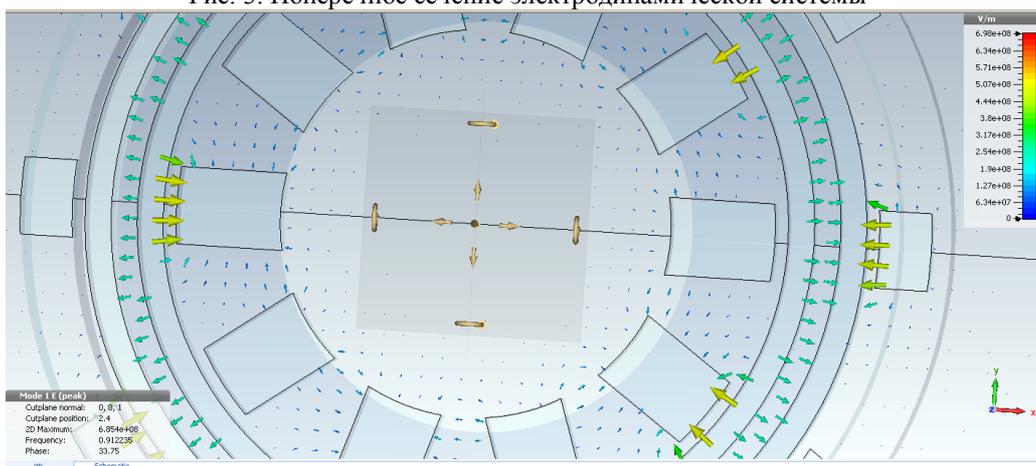


Рис. 4. Распределение высокочастотного электрического поля  $\pi$ -вида

Частота рабочего вида составила 912 МГц, ближайшего паразитного вида – 2.2 ГГц.

Магнитная система разрабатываемого прибора выполнена в виде двух постоянных кольцевых радиально-намагниченных магнитов с полюсными наконечниками. Распределение магнитного поля в пространстве взаимодействия прибора представлено на рис.5, величина продольной составляющей магнитной индукции составила 0.09 Тл.

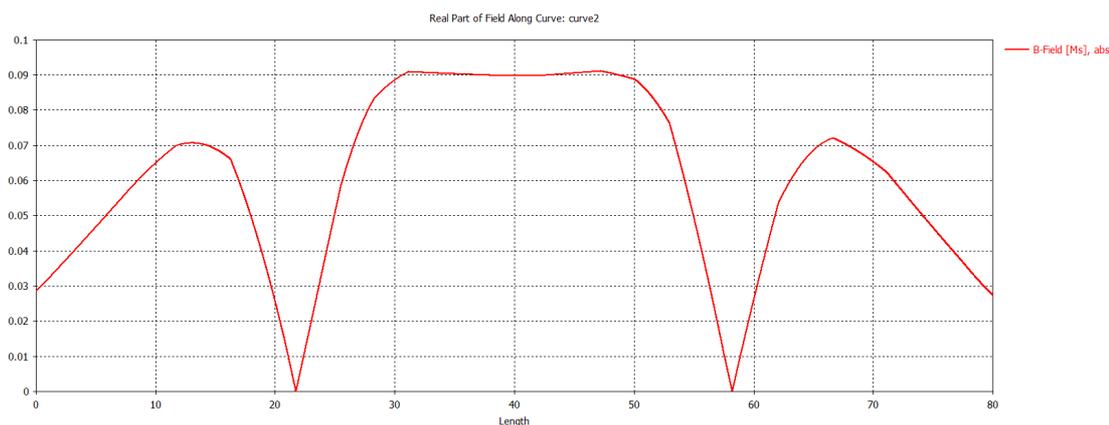


Рис. 5. Распределение продольной составляющей магнитной индукции на оси симметрии прибора

Расчет вывода энергии проведен с использованием подпрограммы Time Domain solver. Трехмерная модель конструкции вывода энергии представляла собой вакуумный объем выходного прямоугольного волновода размерами 30 x 196 x 167 мм, настроечный штырь и вакуумно-плотный керамический конус. В результате моделирования при расположении штыря в 6 мм от верхней стенки прямоугольного волновода получена зависимость КСВн от частоты, представленная на рис.6.

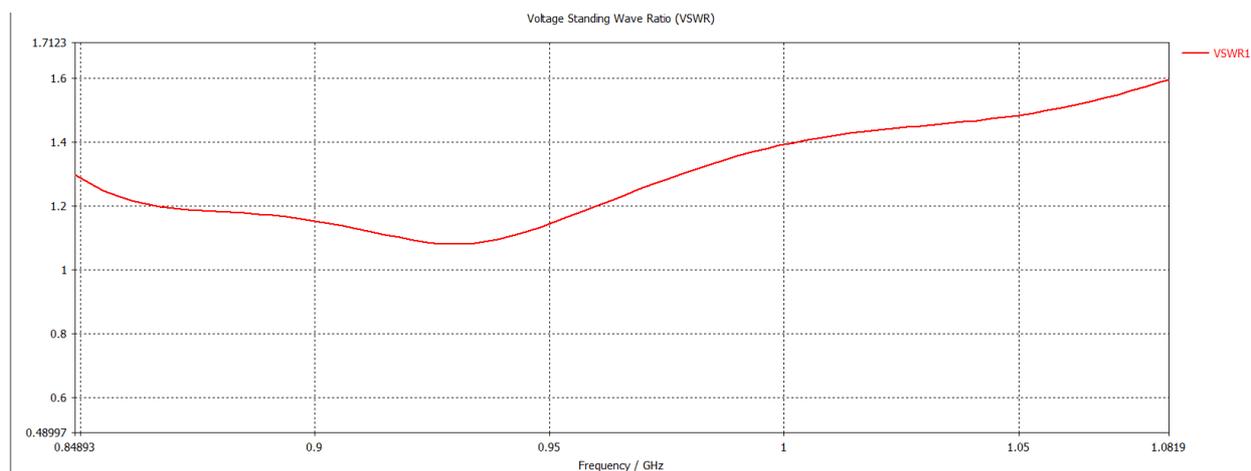


Рис.6. Зависимость КСВн вывода энергии от частоты

Динамический режим рассчитан с использованием подпрограммы PIC solver. Как следует из представленных на рис. 7 результатов, на 70-й наносекунде в магнетроне начинают образовываться спицы, а мощность установившихся ВЧ колебаний в динамическом режиме работы прибора составила 4 кВт.

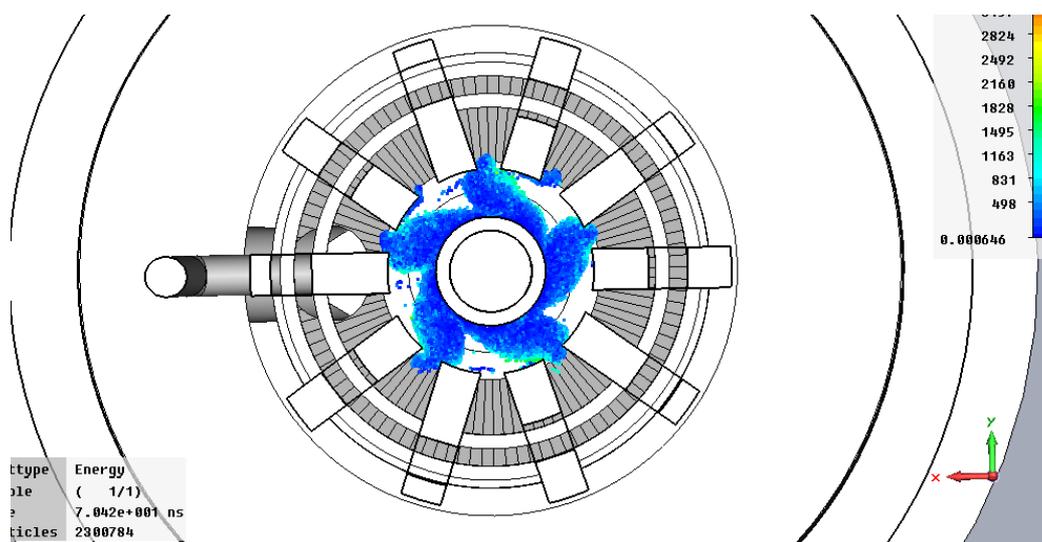


Рис. 7. Формирование «спиц»

На рис. 8 представлена спектральная характеристика установившихся колебаний. При этом резонансная частота составила 915 МГц в соответствии с требованиями ТЗ.

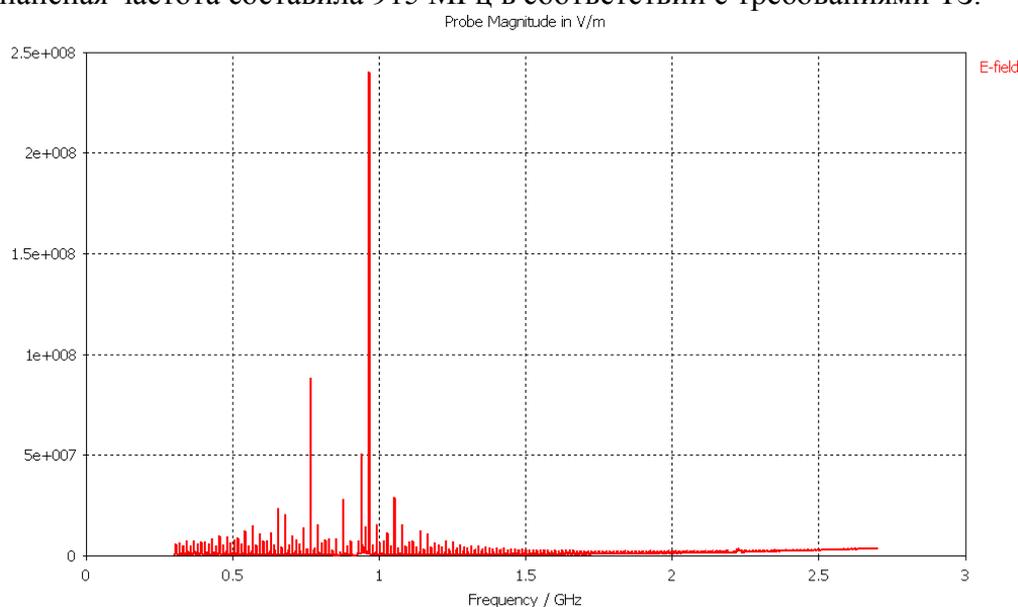


Рис.8. Спектральная характеристика магнетрона в динамическом режиме на 80 нс работы

В результате проведенного проектирования разработаны электродинамическая система с собственной частотой 912 МГц (без эмиссии электронов) и 915 МГц в динамическом режиме работы прибора; магнитная система, формирующая однородное поле в области взаимодействия между анодом и катодом [4] со значением магнитной индукции 900 Гс (отклонение величины продольной составляющей индукции магнитного поля не более 4%); вывод энергии с КСВн ниже 1.2 в диапазоне частот 850-960 МГц.

Анализ динамического режима показал, что выходная мощность прибора составляет не менее 4 кВт. Полученные параметры удовлетворяют требованиям ТЗ, что позволяет приступить к выполнению ОКР.

### Библиографический список

1. Рычков Ю.М. Электронные приборы СВЧ. Гродно: ГрГУ, 2012.103с.
2. Самсонов Д.Е. Основы расчета конструирования многорезонаторного магнетрона. М.: Из-во «Советское радио», 1966. 224 с.
3. Курушин А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave studio. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. 152 с.
4. Суходолец Л.Г. Мощные вакуумные СВЧ-приборы: учеб. пособие по изучению ЭВП СВЧ. М.: Издательство ИКАР, 2014. 272 с.:ил.

## ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

\*П.И. Акимов, \*А.В. Грызлов, \*Д.А. Гладышев, \*П.В. Невский, \*В.А. Смирнов, \*И.А. Фрейдovich,  
\*В.Г. Чудин, \*\*В.И., Шведун

\*Москва, АО "НПП "Торий", Обручева, 52, E-mail: torlab107@mail.ru

\*\*Москва, НИЯФ МГУ, Ломоносовский проспект, 1(2)

*Аннотация.* Приведены результаты моделирования и модернизации конструкции электронной пушки для линейного ускорителя электронов.

*Ключевые слова.* Электронная пушка, линейный ускоритель, электронный пучок.

## ELECTRON GUN FOR THE LINEAR ELECTRON ACCELERATOR

P.I. Akimov\*, A.V. Gryzlov\*, D.A. Gladyshev\*, P.V. Nevsky\*, V.A. Smirnov\*, I.A. Freydovich\*,  
V.G. Chudin\*, V.I. Shvedunov\*\*

\*Join Stock Company "S&P Corporation "Toriy"

Moscow, Russia, toriy107@mail.ru

\*\*MSU SINP, 119991, Leninskie gory, 1(2),

*Abstract.* The results of modeling and simulations to electron gun for linear electron accelerator designs are given.

*Keywords.* Electron gun, linear accelerator, electron beam.

Предпринятые в послевоенные годы работы по созданию конструкций линейных ускорителей электронов к настоящему времени инициировали интенсивный рост использования радиационных технологий как в научных исследованиях, так и в самых различных отраслях промышленности, медицины, сельского хозяйства и прочее. Эти технологии, в основном, основаны на применении ускорителей с энергией электронов от 0,5 до 100 МэВ, при этом наиболее распространенным типом является линейный высокочастотный ускоритель электронов. Следует отметить, что подавляющая часть линейных ускорителей, разрабатываемых для применения в медицине, радиологии, досмотровых комплексах, установках стерилизации, рассчитаны на мощность пучка не более десятков киловатт и энергию электронов в диапазоне 3 – 20 МэВ. На текущий момент можно выделить основные сферы использования и соответствующие им характеристики ускорителей (см. таблицу 1).

Таблица 1. Области применения и параметры ускорителей электронов

Назначение	Энергия ускоренных электронов, МэВ	Средняя мощность пучка, кВт	Мощность дозы, Гр м/мин
Производство радионуклидов	15 – 30	3 – 25	150 – 1500
Активационный анализ	10 – 40	3 – 30	100 – 1500
Стерилизация	5 – 10	10 – 40	300 – 2000
Радиационные технологии	5 – 15	10 – 40	200 – 1500
Инспекционно - досмотровый контроль	5 – 10	0.5 – 10	15 – 50
Лучевая терапия	5 – 40	0.3 – 4	10 – 60
Дефектоскопия	6 – 15	1 – 3	15 – 80

Предприятие АО «НПП «Торий» совместно с НИИЯФ МГУ и лабораторией электронных ускорителей МГУ в течение ряда лет активно участвует в работах по созданию мощных линейных ускорителей, предназначенных для многофункциональных станций электронной обработки. Разработанный ранее (с использованием созданных на предприятии мощных источников СВЧ энергии) компактный линейный ускоритель на энергию электронов до 10 МэВ со средней мощностью пучка 30-50 кВт применяется для стерилизации продуктов питания и медицинских инструментов. Ускорители с близкими параметрами используются в качестве источников тормозного излучения высокой энергии в дефектоскопах для радиографического контроля сварных швов и металла большой толщины (до 80 мм по стали). Ускоритель УЭЛР-10-15 работает в режиме стоячей волны и имеет основные параметры, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры ускорителя УЭЛР-10-15

Энергия пучка	10 МэВ
Мощность пучка	50 кВт
Ширина энергетического спектра	0.5 МэВ
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	70 кВт

Опыт эксплуатации данного ускорителя, как, впрочем, и его зарубежных аналогов, показал, что электронная пушка линейного ускорителя является одним из самых недолговечных конструктивных элементов. В связи с этим в данной работе была поставлена и решалась задача существенного увеличения срока службы электронной пушки данного варианта ускорителя.

В ускорителе УЭЛР-10-15 в качестве инжектора электронов применяется разработанная ранее на предприятии конструкция триодной двуханодной электронной пушки, геометрия электродов ЭОС которой представлена на рис.1. Первый анод выполняет функции управляющего электрода, второй анод находится под потенциалом 50кВ.

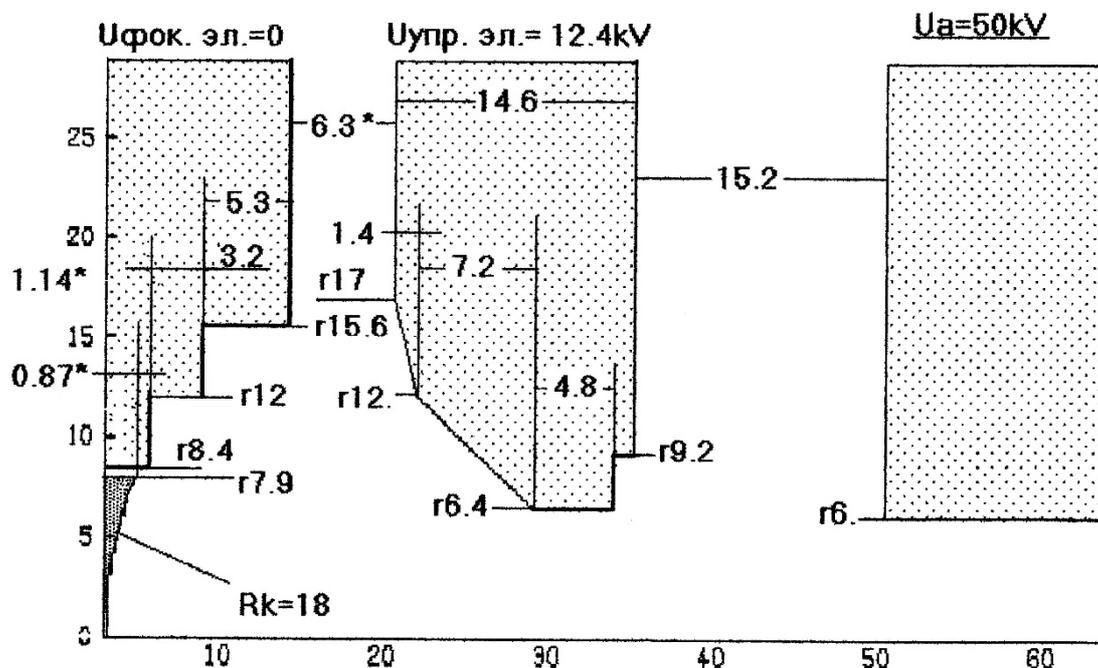


Рис. 1. Геометрия электродов электронной пушки

Основные параметры пушки ЭП-6 представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры электронной пушки ЭП-6

Анодное напряжение	50 кВ
Ток луча (импульсный)	800 мА
Радиус луча в кроссовере на уровне 0,5 тока	0,5 мм
Положение кроссовера относительно плоскости анода	26-29 мм
Диаметр анодного отверстия	12 мм

При потенциалах относительно нулевого катода  $U_1 = 12.9$  кВ на первом аноде и  $U_2 = 50$  кВ на втором аноде данная конструкция пушки позволяет получить импульсный ток  $I = 0.8$  А (величина микропервеанса пучка по второму аноду  $P_{m2} = 0.072$  мкА/В<sup>3/2</sup>). Траекторный анализ формирования пучка в пушке был проведен в двумерном приближении, Результаты представлены на рис. 2. Моделирование динамики электронов пучка в ускорительной секции проведено сотрудниками НИЯФ МГУ с использованием программы EGUN.

Проведенные расчеты показали, что кроссовер пучка находится на расстоянии около 36 мм от катода, диаметр пучка в кроссовере - 3 мм. В качестве катода в данном варианте пушки используется стандартный металлопористый катод диаметром 8,6 мм, изготавливаемый по технологии Леви.

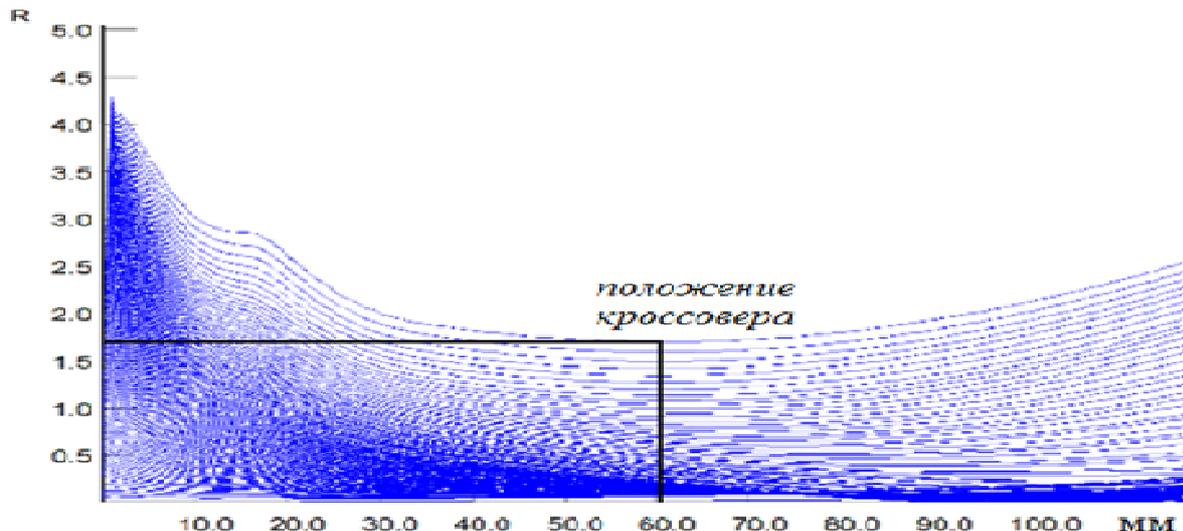


Рис 2. Траектории электронного пучка в пушке ЭП-6

Катод в ускорителях на стоячей волне, в особенности с коротким группирователем (в рассматриваемом варианте ускорителя состоящим из 3 ячеек), подвергается дополнительной бомбардировке не захваченными в процесс ускорения электронами. Проведенное моделирование процессов взаимодействия электронов с СВЧ полем в ускорительной трубке показало, что средняя энергия электронов, возвращающихся на катод, составляет 175 кэВ. При этом величина импульсной мощности, выделяемой на катоде возвращающимися обратно электронами, достигает 7.5 кВт. В режиме минимальной скважности работы ускорителя средняя мощность, выделяющаяся при этом на поверхности катода, может достигать 35-40 Вт, что сравнимо с мощностью накала катода.

Для повышения долговечности катода было решено увеличить площадь эмитирующей поверхности. При этом в качестве эмиттера вновь разрабатываемой конструкции пушки был выбран вариант эмиттера, используемый в катодном узле пушки ускорителя УЭЛВ-10-10 и хорошо зарекомендовавший себя в процессе длительной эксплуатации.

На рис. 3 представлена схема усовершенствованной электронно-оптической системы пушки с увеличенным радиусом эмитирующей поверхности катода.

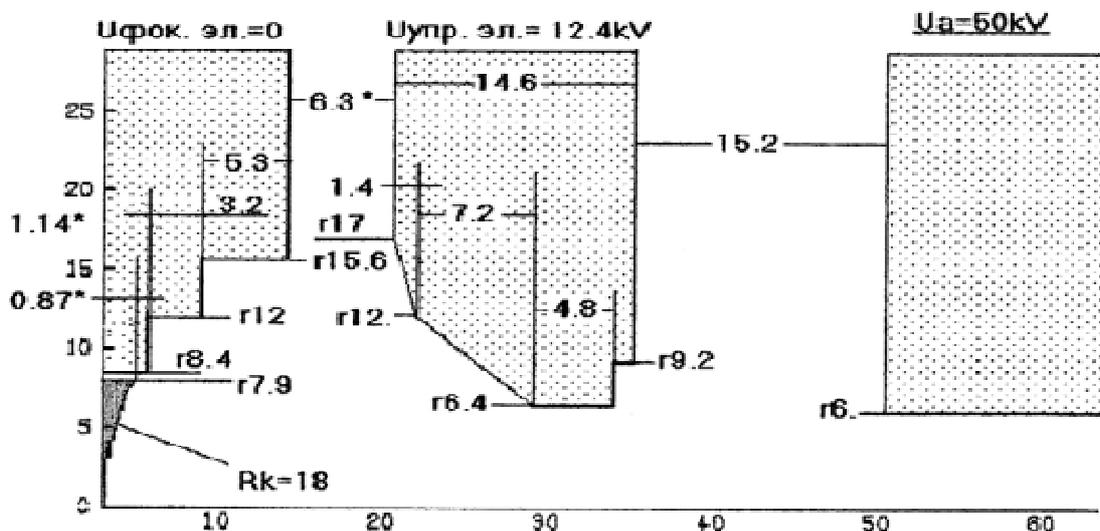


Рис. 3. Схема конструкции пушки ускорителя УЭЛР-10-15с диаметром катода 15.8 мм

Результаты проведенного двухмерного моделирования движения электронов в варианте модернизированной конструкции пушки ускорителя УЭЛР-10-15 с диаметром катода 15.8 мм приведены на рис. 4 (на рисунке отмечено также положение кроссовера пучка в пушке новой конструкции).

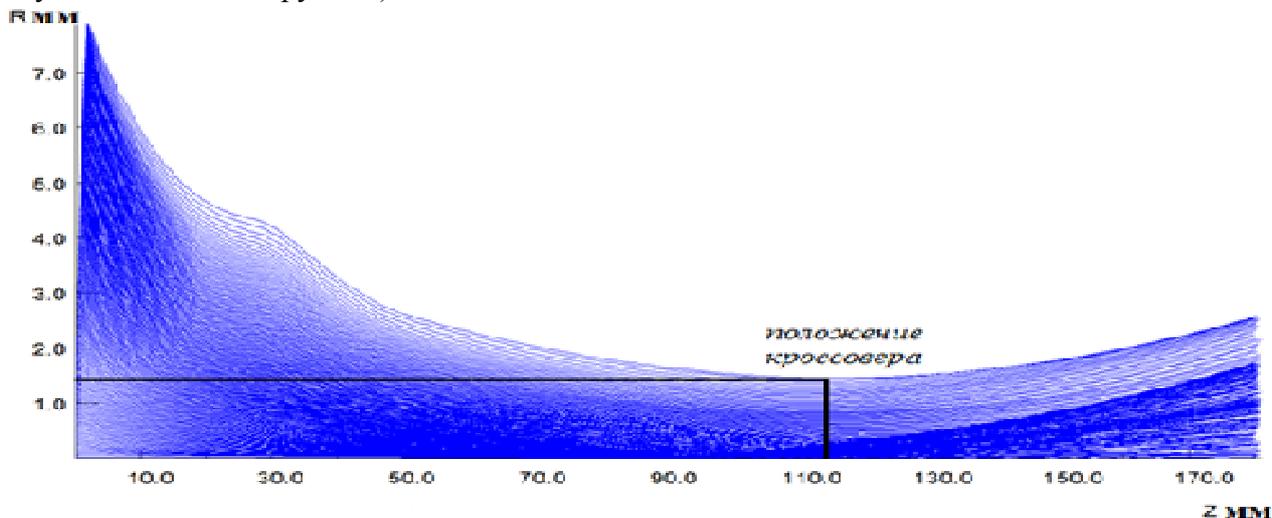


Рис. 4. Результаты 2D моделирования траекторий пучка в пушке, с диаметром катода 15.8 мм

Дополнительно проведено моделирование в трехмерном пакете программ CST.

Результаты сравнения параметров пушки ЭП-6 с эмиттером диаметром 8.6 мм и проектируемой пушки с катодом 15.8 мм приведены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение параметров пучков

Диаметр эмиттера пушки, мм	8.6	15.8
Ток пучка I, А	0,865	0,8
Энергия электронов пучка на выходе, кЭв	50	50
Удаление кроссовера от поверхности эмиттера, мм	60	115
Радиус пучка в кроссовере, мм	1,6	1,4
Радиус пучка на выходе из пушки, мм	2,1	2,4
Первеанс по управляющему электроду, А/В <sup>3/2</sup>	6,3*10 <sup>-7</sup>	5,75 *10 <sup>-7</sup>
Первеанс пучка на выходе пушки, А/В <sup>3/2</sup>	7,7*10 <sup>-8</sup>	7,1*10 <sup>-8</sup>
Плотность тока на катоде, А/см <sup>2</sup>	1,5	0,41

Как следует из представленных в таблице 4 результатов анализа, кроссовер пушки с диаметром катода 15,8 мм находится на большем удалении от катода, чем в варианте ЭП-6 с эмиттером диаметром 8.6 мм. Это обеспечивает более высокое токопрохождение электронов в пушке модифицированной конструкции. Кроме того, благодаря увеличению диаметра катода плотность эмиссионного тока снижается более чем на 70%. Изменение радиуса пучка и коэффициента захвата («токопрохождения») в процессе ускорения для старой (штатной) и новой пушек, рассчитанные сотрудниками профессора Шведунова В.И., приведены на рис.5а и рис.5б.

Представленные на рис. 5а и 5б зависимости однозначно подтверждают, что с использованием новой конструкции электронной пушки характеристики прохождения пучка через ускоряющую структуру заметно улучшились.

### Заключение

Проведенная модернизация конструкции электронной пушки для линейного ускорителя электронов и результаты моделирования обеих конструкций показали, что увеличение диаметра катода позволило увеличить расстояние от эмиттера до кроссовера пучка при одновременном снижении величины пространственного заряда пучка в прикатодной области и уменьшении величин напряженности электрического поля в области между катодом и управляющим электродом. Это позволит существенно увеличить время работы катода и тем самым повысить долговечность ускорителя.

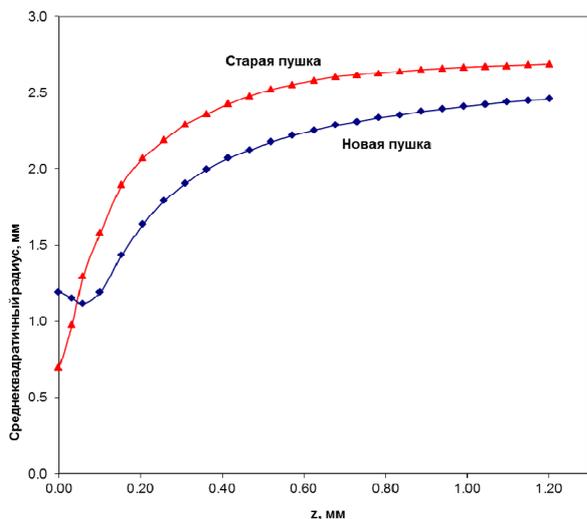


Рис.5а. Радиус пучка

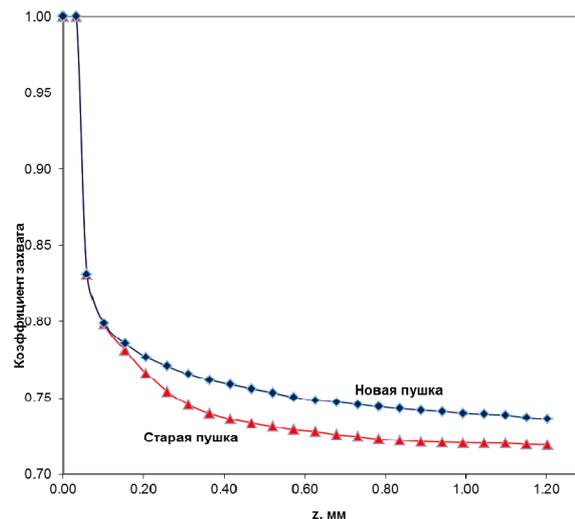


Рис.5б. Коэффициент захвата

1. Акимов П.И., Грызлов А.В., Гладышев Д.А., Невский П.В., Сигалаев В.Н., Чудин В.Г. Модернизация конструкции электронной пушки линейного ускорителя электронов// Материалы XXII научно-технической конференции “Вакуумная наука и техника”; под ред. академика А.С. Бугаева. М. ISBN 978.5-600-01145-8. 2015. С.279 - 283.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

## ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ ЧАСТОТНОЙ ПОДСТАВКОЙ В ЛАЗЕРНОМ ГИРОСКОПЕ

**В.Ю. Мишин\***, **Д.А. Морозов\***, **А.В. Молчанов\*\***, **М.В. Чиркин\***,

\* *Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, mishvalera@rsreu.ru*

\*\* *Московский институт электромеханики и автоматики,  
Россия, Москва, aomiea@aviapribor.ru*

*Аннотация.* Разработана и апробирована система цифрового управления вибрационной частотной подставкой лазерного гироскопа. Представлены результаты испытаний разработанной системы.

*Ключевые слова.* Лазерный гироскоп, кольцевой лазер, вибрационная частотная подставка, фаза Саньяка, порог синхронизации.

## MECHANICAL DITHER DIGITAL CONTROL IN A LASER GYRO

**M.V. Chirkin\***, **V.Y. Mishin\***, **A.V. Molchanov\*\***, **D.A. Morozov\***

\* *Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, mishvalera@yandex.ru*

\*\* *Moscow Institute of Electromechanics and Automatics  
Russia, Moscow, aomiea@aviapribor.ru*

*Abstract.* The system for digital control of mechanical dither of laser gyro are developed and tested. The results of tests of the developed system are presented.

*Keywords.* Laser gyro, ring laser, mechanical dither, Sagnac phase, synchronization threshold.

В качестве датчиков угловых перемещений в инерциальных навигационных системах широко используются кольцевые лазерные гироскопы [1,2]. Лазерный гироскоп (ЛГ) представляет собой комбинацию кольцевого гелий-неонового лазера и сервисной электроники. Кольцевой лазер (КЛ) генерирует два оптических пучка, распространяющиеся во встречных направлениях внутри резонатора, образованного зеркалами 4 и 5 (рис. 1). Лазерные пучки выходят из резонатора и, перекрываясь в смесительной призме 6, формируют интерференционную картину. Вращение гироскопа изменяет разность фаз  $\psi$  встречных лазерных пучков (фазу Саньяка), что сопровождается перемещением

интерференционных полос. Для регистрации движений интерференционной картины используется фотодиод 2 с двумя чувствительными площадками.

Рассеяние лазерных пучков шероховатостями на отражающих поверхностях зеркал создает слабую связь, которая приводит к синхронизации: при малых угловых скоростях гироскоп не реагирует на вращение. Скомпенсировать данный эффект и уменьшить погрешность измерения угловой скорости до величины порядка 0,01 градусов/час позволяет вибрационная частотная подставка, амплитуда которой промодулирована по случайному закону. Для ее создания используется пьезоэлектрический двигатель 9, который сообщает кольцевому лазеру вращательные колебания с частотой около 400 Гц и амплитудой, изменяющейся по случайному закону. Электромеханический датчик 8 служит для вычитания колебаний на частоте подставки из выходных отсчетов угловой скорости.

В работах [3,4] была реализована система прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины путем дискретизации и цифровой обработки сигналов лазерного гироскопа, что позволяет:

- выделять информацию о параметрах вибрационной частотной подставки (амплитуде и частоте),
- использовать цифровые фильтры в качестве альтернативы прямому вычитанию колебаний на частоте подставки,
- на порядок увеличить частоту отсчетов угловой скорости, формируемых на выходе ЛГ.

Конструкция пьезоэлектрического двигателя 9 позволяет осуществить автоколебательный режим создания частотной подставки. Для замыкания петли обратной связи может быть использован сигнал, снимаемый с одной из пьезоэлектрических пластин. В то же время регистрация текущих значений параметров составляющей выходного сигнала ЛГ на частоте подставки создает условия для ошумления подставки с помощью введения в обратную связь цифрового управления. Реализация такого подхода создает условия для исключения вспомогательного датчика 8 и дополнительной погрешности, связанной с неполным удалением из выходного сигнала ЛГ колебаний на частоте подставки [4].

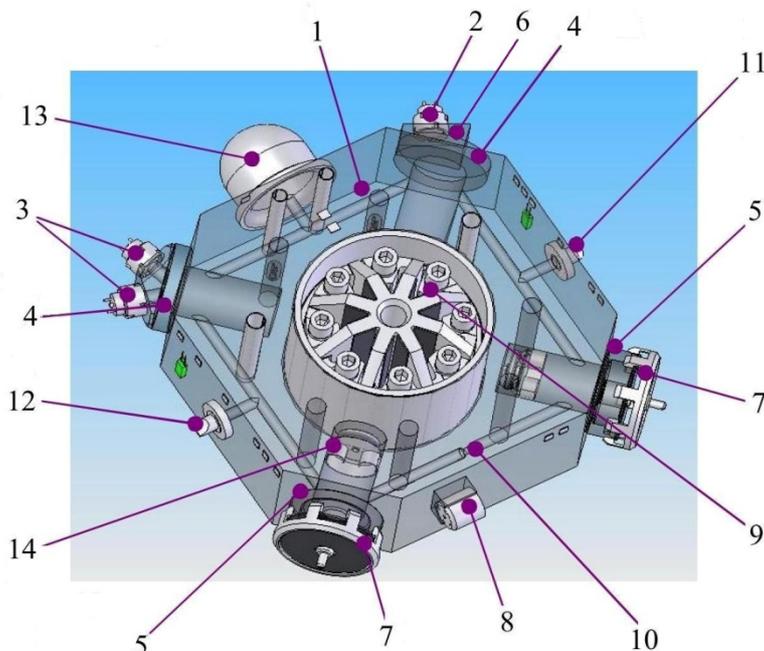


Рис. 1. Кольцевой лазер: 1 – моноблок из ситалла, 2, 3 – фотоприемники, 4 – плоские зеркала, 5 – сферические зеркала, 6 - смесительная призма, 7 - пьезокорректоры, 8 - ротор датчика угловой скорости, 9 – пьезоэлектрический двигатель, 10 – диафрагма, 11 - анод, 12 – анод - штенгель, 13 – холодный катод, 14 – геттер

Цель работы заключается в создании цифровой системы управления вибрационной частотной подставкой ЛГ с использованием в качестве источника информации лишь перемещений интерференционной картины на выходе из смесительной призмы 6. На рис. 2 представлена структурная схема лазерного гироскопа с системой прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины, включающей разработанное устройство цифрового управления подставкой. Для экспериментов использован малогабаритный четырехзеркальный кольцевой гелий-неоновый лазер гироскопа ЛГ-1 с длиной периметра 28 см и длиной волны 0,6328 мкм производства АО «Московский институт электромеханики и автоматики» [5]. Предварительно измеренный порог синхронизации в случае использованного КЛ соответствует угловой скорости 0,06 градуса/с, что в два раза превышает номинальную величину для приборов данного класса.

Устройство формирования частотной подставки представляет собой двухкаскадный усилитель, первый каскад которого работает в режиме фазовращателя ФВ (обеспечивает выполнение фазовых условий автоколебаний), а второй каскад представляет собой усилитель с ограничением ОУ. Амплитуда механических колебаний кольцевого лазера регулируется путем управления напряжением питания ОУ от биполярного регулируемого источника с цифровым управлением. Квадратурные сигналы с информационного фотодиода КЛ, предварительно усиленные с помощью широкополосных усилителей и оцифрованные с помощью двухканального АЦП ( $N=12$ ,  $f_s=20$  МГц), поступают в блок обработки первичных сигналов (ОПС), разработанный в [4].

Блок ОПС осуществляет накопление первичных отсчетов квадратурных сигналов, восстановление временного ряда для изменений фазы Саньяка  $\Delta\psi_i$ , цифровую фильтрацию колебаний подставки из восстановленного ряда данных  $\Delta\psi_i$ , в результате чего вычисляются отсчеты  $\Delta\varphi_i$ , характеризующие фактическое угловое перемещение ЛГ. Восстановленные отсчеты  $\Delta\varphi_i$  подаются на выход 1 блока обработки первичных сигналов для последующего использования в навигационных алгоритмах. Параллельно определяются параметры вибрационной частотной подставки: амплитуда  $\omega_d$  и частота  $f$ . Отсчеты, пропорциональные амплитуде колебаний угловой скорости кольцевого лазера на частоте вибрационной частотной подставки, поступают на выход 2 блока ОПС для последующего использования в системе управления.

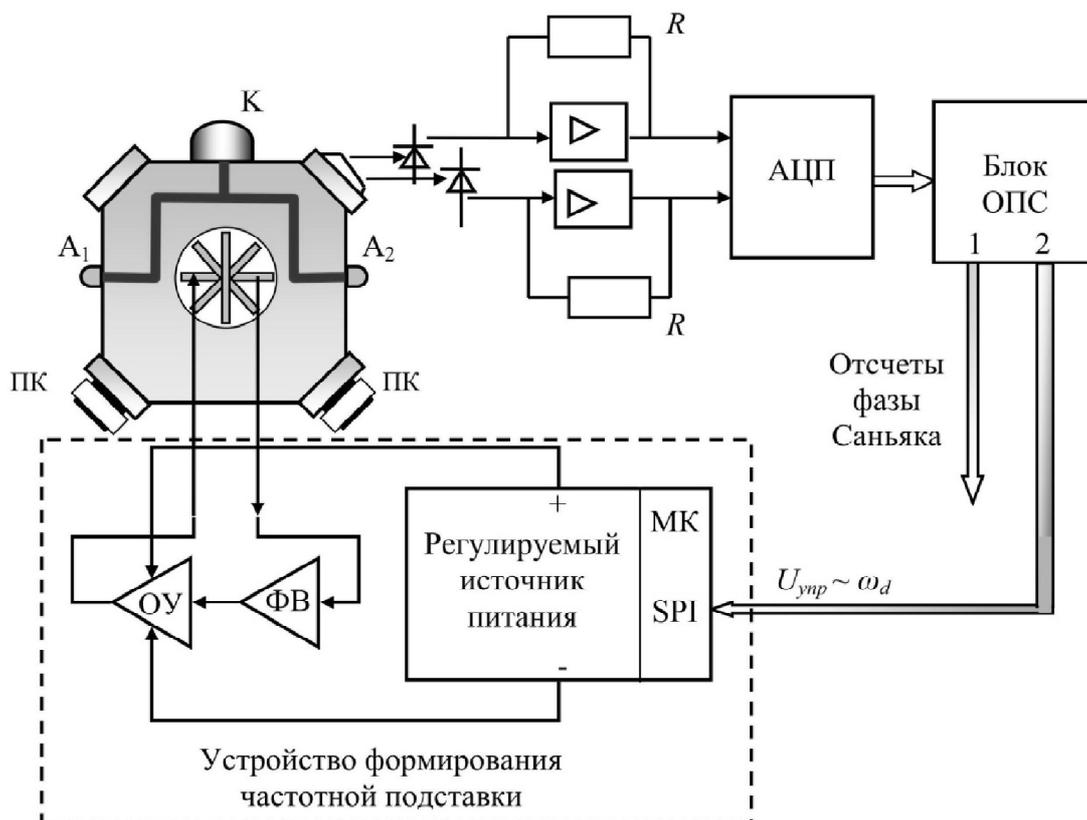


Рис. 2. Структурная схема лазерного гироскопа с прецизионной регистрацией перемещений интерференционной картины и цифровым управлением вибрационной частотной подставкой

Микроконтроллер МК регулируемого источника питания осуществляет начальный запуск и калибровку автоколебательной системы, а также ошумляет амплитуду колебаний. Для передачи управляющего воздействия от МК к регулируемому биполярному источнику питания используется 12-битный цифро-аналоговый преобразователь AD7390 с SPI интерфейсом, который является источником опорного напряжения для регулируемого источника питания. В пределах от 3 до 15 В характеристика биполярного источника линейна. В качестве входных данных микроконтроллер МК системы формирования частотной подставки использует отсчеты, пропорциональные амплитуде составляющей колебаний угловой скорости на частоте подставки  $\omega_d$ . Передача ведется с использованием интерфейса SPI в виде двухбайтовых целых чисел с частотой 244 Гц.

При первом запуске МК записывает в ЦАП код, соответствующий максимальной амплитуде колебаний, и накапливает отсчеты, поступающие от ОПС в течение 163 мс. Затем вычисляются коды ЦАП  $m_0$  и  $\sigma$ , соответствующие номинальному значению амплитуды колебаний угловой скорости КЛ, равному  $80^\circ/с$ , и среднеквадратичному разбросу амплитуды  $35^\circ/с$ , т.е. осуществляется калибровка автоколебательной системы. После калибровки запускается алгоритм ошумления амплитуды колебаний. При получении очередного кода амплитуды колебаний из ОПС рассчитывается квазислучайное число с нормальным распределением  $E_{new}$  с использованием центральной предельной теоремы [6]:

$$E_{new} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma \left( \sum_{i=1}^{26} x_i - 12,5 \right)}{1,99661} + m_0, \quad (1)$$

где  $x_i$  - случайные числа, имеющие равномерное распределение в диапазоне от 0 до 1, генерируются с помощью стандартных библиотек языка программирования С. При этом производится проверка условия:

$$|E_{new} - E_{old}| < \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  - эмпирически найденное отклонение, обеспечивающее плавное изменение амплитуды колебаний,  $E_{old}$  - код, записанный в ЦАП на предыдущем шаге. Если условие (2) выполняется, осуществляется запись рассчитанного кода  $E_{new}$  в ЦАП. В противном случае повторяется процедура расчета случайного числа. Периодически раз в минуту по данным, поступающим от ОПС, проводится коррекция кодов для  $m_0$  и  $\sigma$ .

Для апробации разработанной системы зарегистрирован ряд отсчетов угловой скорости колебаний КЛ. На рис. 3, а представлены спектры восстановленных колебаний в условиях гармонических колебаний КЛ с частотой 409 Гц (кривая 1) и при ошумлении подставки (кривая 2). Для второго случая гистограмма отсчетов амплитуды  $\omega_d$  колебаний угловой скорости КЛ представлена на рис. 3, б.

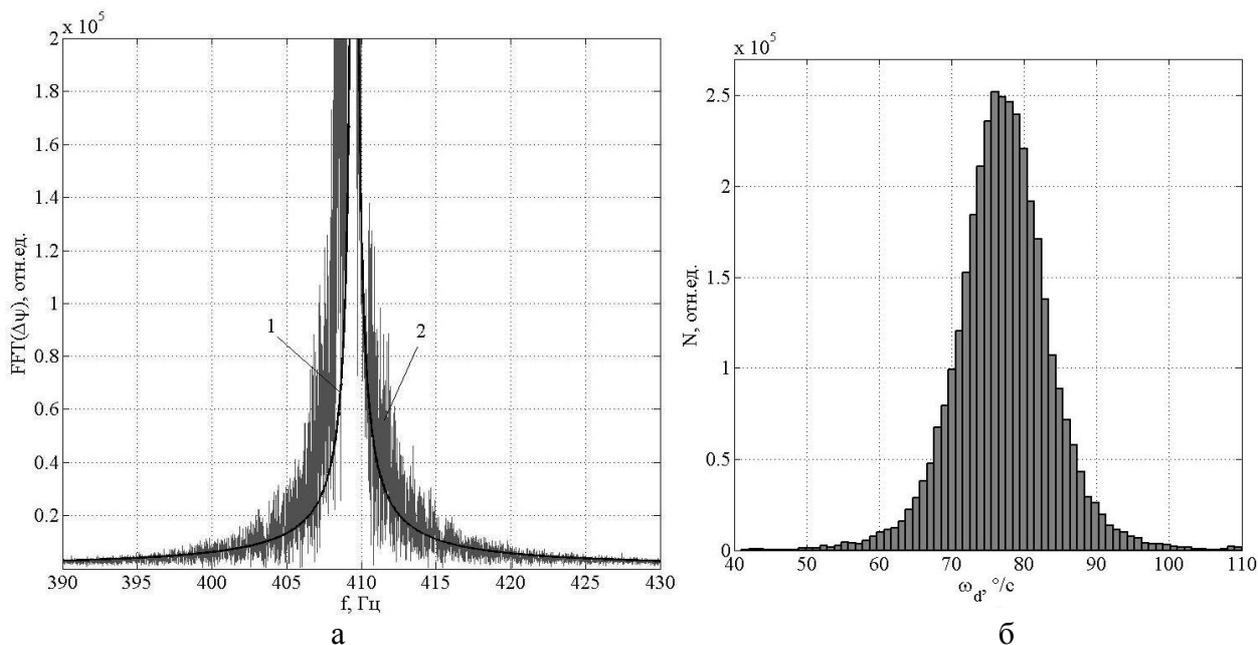


Рис. 3. Спектры восстановленных колебаний угловой скорости (а) и гистограмма амплитуд колебаний (б): 1 – гармоническая вибрационная частотная подставка, 2 – ошумленная вибрационная частотная подставка в условиях цифрового управления

При испытаниях разработанной системы ось чувствительности кольцевого лазера была ориентирована вертикально. После удаления колебаний на частоте подставки в соответствии с подходом, реализованным в работе [4], выходной сигнал ЛГ представляет собой отсчеты проекции угловой скорости вращения Земли на вертикаль, значение которой для географической широты Рязани составляет 12,23 градуса/час. В режиме с ошумленной вибрационной частотной подставкой зарегистрировано среднее значение угловой скорости 12,19 градуса/час со среднеквадратичным разбросом 0,02 градуса/час при интервале времени усреднения, равном 100 с.

Таким образом, цифровое управление вибрационной частотной подставкой ЛГ на основе прецизионной регистрации квадратурных сигналов КЛ позволило отказаться от использования вспомогательного датчика угловой скорости. В результате удалось измерить угловую скорость вращения с точностью, достаточной для автономных инерциальных навигационных систем второго класса точности [2], даже в случае КЛ с порогом синхронизации, в два раза больше номинальной величины. Поскольку случайная составляющая погрешности ЛГ, вызванная ошумлением подставки, прямо пропорциональна порогу синхронизации [1], полученный результат делает реальным создание на основе КЛ данного класса лазерных гироскопов для автономных инерциальных навигационных систем первого класса точности.

## Библиографический список

1. Aronovitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical Gyros and their Application. – RTO-AG-339, 1999. – P. 3-1 – 3-45.
2. Kuznetsov A.G., Molchanov A.V., Chirkin M.V., Izmailov E.A. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation // Quantum electronics. 2015. Vol. 45, Issue 1. P. 78-88.
3. Alekseev S.Yu., Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Morozov D.A., Borisov M.V., Molchanov A.V., Zakharov M.A. Method of lock-in threshold measurement in manufacture and operation of ring lasers // Gyroscopy and Navigation. 2013. Vol. 4. № 4. P. 223-228.
4. Molchanov A.V., Belokurov V.A., Chirkin M.V., Koshelev V.I., Mishin V.Yu., Morozov D.A. Precision laser gyro with a digital channel for quadrature signal processing // Proceedings of 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – 25-27 May 2015. Saint Petersburg, Russia. - P. 307-314.
5. АО «МИЭА» Наши разработки > Автономные и корректируемые инерциальные навигационные системы. [Электронный ресурс]. URL: <http://aomia.ru/ins.htm> (дата обращения 02.02.2016).
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. 4-е изд. - М.: Наука, 1969. - 576 с.

УДК 621.372.8; ГРНТИ 47.45.31

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГТЕМ-КАМЕРЫ

**А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев**

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, Томск, vandervals@inbox.ru*

*Аннотация.* Предложен подход к расчёту оптимальных геометрических размеров ГТЕМ-камеры. Выполнен квазистатический анализ рассчитанных размеров сечения камеры. Проведено сравнение результатов квазистатического и электродинамического моделирования.

*Ключевые слова.* ГТЕМ-камера, ТЕМ-волна, электромагнитная совместимость, электродинамическое моделирование.

## STRATEGY OF GTEM-CELL PROJECTION

**A.V. Demakov, M.E. Komnatnov, A.A. Sobko, A.V. Osintsev**

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
Tomsk, Russia, vandervals@inbox.ru*

*Abstract.* Approach to calculation of geometrical dimensions of GTEM-cell is proposed. Quasistatic analysis of calculated dimensions is performed. Results of quasistatic and electrodynamic simulations are compared.

*Keywords.* GTEM-cell, TEM-wave, electromagnetic compatibility, electrodynamic modeling.

Проведение испытаний на электромагнитную совместимость является необходимым этапом при разработке современного радиоэлектронного оборудования. Такие измерения проводятся в соответствии с нормативными документами, в которых оговариваются порядок проведения испытания и используемое оборудование. Одним из таких устройств является ГТЕМ-камера, применяемая для проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость на частотах до 20 ГГц.

Имеется достаточно большое количество работ, посвященных проектированию и созданию ГТЕМ-камер, что свидетельствует об актуальности подобных исследований. Так, в [1] приведено рассмотрение ГТЕМ-камеры как сужающегося полоскового волновода и представлены формулы для расчёта геометрических размеров камеры. Выполнено проектирование, моделирование и оценка небольшой ГТЕМ-камеры размером 2,2×1,3×1 м, способной создавать электрические поля напряженностью свыше 600 В/м на объект размерами 20×20×15 см. Представлены конструктивные решения и характеристики разработанной ГТЕМ-камеры [2]. Предложен сверхширокополосный переход для согласования коаксиального соединителя и центрального проводника. Преимущество модели такого перехода заключается в простоте конструкции и малых вносимых потерях [3]. Исследовано влияние радиопоглощающего материала (РПМ) на коэффициент отражения камеры. Сопротивление РПМ характеризуется большим значением погонной ёмкости, что приводит к уменьшению характеристического сопротивления линии в месте расположения РПМ. Уменьшения влияния РПМ на характеристики камеры добиваются путём разделения центрального проводника на несколько секций, каждая из которых сужается и соединяется в

конце камеры с резистивной нагрузкой [4]. Однако проведенный обзор показал о отсутствие унифицированной методики расчета геометрических размеров ГТЕМ-камеры.

Целью данной работы является разработка методики расчёта геометрических размеров ГТЕМ-камеры.

Конструктивно ГТЕМ-камера содержит внешний металлический корпус, выполненный в форме расширяющейся пирамиды, внутри которой имеется центральный проводник. Основание пирамиды изнутри покрыто РПМ. Центральный проводник соединен с одной стороны на вершине пирамиды с коаксиальным соединителем, а с другой – с массивом согласованных нагрузок возле основания пирамиды. Центральный проводник смещен относительно центра конструкции ГТЕМ-камеры вверх, что позволяет увеличить объем пространства под испытуемый объект. Общий вид с основными составляющими конструкции камеры представлен на рисунке 1.

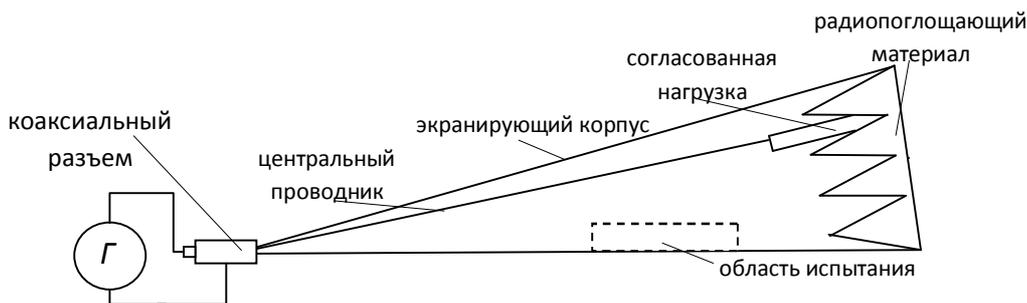


Рис. 1 – Составляющие конструкции ГТЕМ-камеры

Для достижения идеального согласования линии передачи и полного поглощения электромагнитной волны в конце линии передачи необходимо, чтобы в каждом поперечном сечении камеры волновое сопротивление было постоянным. Это условие является основополагающим при выборе размеров конструкции камеры.

При вычислении геометрических размеров ГТЕМ-камеры она рассматривается как сужающийся полосковый волновод со смещенным центральным проводником, благодаря которому происходит распространение ТЕМ-волны [1].

Расчёт размеров поперечного сечения в раскрыве камеры производится при заданных значениях длины  $L$ , углов  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\vartheta$ , определяющих раскрыв (рисунок 2), по следующим формулам:  $a = 2 \cdot L \cdot \tan(\alpha)$ ,  $b = L \cdot [\tan(\gamma) - \tan(\vartheta)]$ ,  $d = L \cdot [\tan(\gamma) + \tan(\vartheta)]$ .

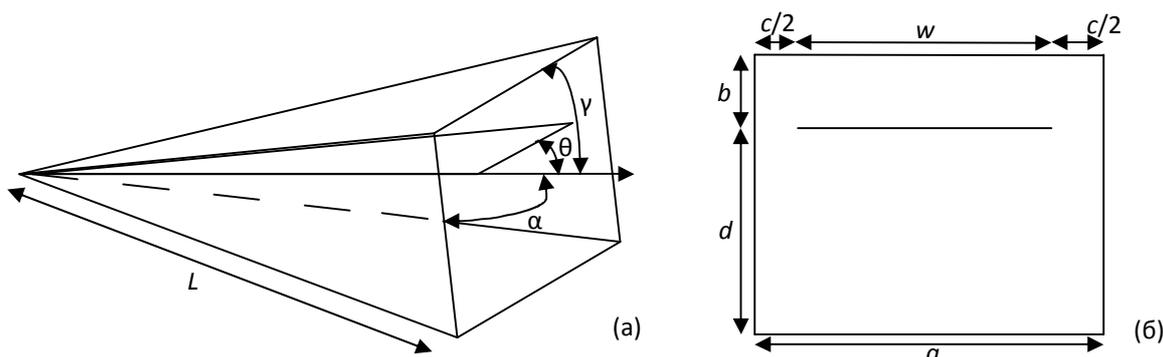


Рис. 2 – Общий вид ГТЕМ-камеры (а), поперечное сечение (б)

Для определения значения характеристического сопротивления рассчитанного сечения используется следующее выражение [1]:

$$\frac{Z_0}{\eta} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{C},$$

где  $Z_0$  - характеристическое сопротивление поперечного сечения ГТЕМ-камеры,  $\eta = 120 \cdot \pi$  - характеристическое сопротивление свободного пространства,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Емкость  $C$  может быть определена через неявную функцию геометрических размеров поперечного сечения камеры [1]:

$$C = 2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \left( \frac{[1 + (1 - \chi^2) \cdot A_1] \cdot K(k) - A_1 \cdot [(1 + \xi)^2 - \chi^2] \cdot E(k)}{[1 - \xi \cdot (2 + \xi) \cdot A_1] \cdot K'(k') + A_1 \cdot [(1 + \xi)^2 - \chi^2] \cdot E'(k')} \right) \text{mod } k,$$

где  $K(k)$  и  $E(k)$  – полные нормальные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно,  $K'(k') = K(k')$  и  $E'(k') = E(k')$ , где  $k' = (1 - k^2)^{1/2}$ .

В вышеуказанных формулах использованы следующие обозначения:

$$\chi = \frac{1}{2} \cdot (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2), \quad \xi = \frac{1}{2} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad k = \frac{2 \cdot \sqrt{\xi}}{([1 + \xi]^2 - \chi^2)^{1/2}}, \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{2 \cdot a} \cdot (a - w),$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2 \cdot a} \cdot (a + w), \quad A_1 = \left[ \frac{\cosh(\pi \cdot a^{-1} \cdot (b + d)) - \cosh(\pi \cdot a^{-1} \cdot (d - b))}{\sinh(\pi \cdot a^{-1} \cdot (b + d))} - 1 \right].$$

По вышеуказанным формулам рассчитаны размеры раскрыва при следующих начальных данных:  $L = 1$  м,  $\frac{b}{d} = \frac{3}{4}$ ,  $\alpha = \frac{\pi}{9}$ ,  $\gamma = \frac{\pi}{11}$ ,  $\vartheta = \frac{\pi}{29}$ . Получены следующие размеры:  $a = 727,9$  мм,  $b = 184,87$  мм,  $d = 402,38$  мм,  $w = 509,5$  мм, волновое сопротивление в поперечном сечении  $Z_0 = 56$  Ом.

На основе полученных значений выполнен квазистатический анализ поперечного сечения камеры в программе TALGAT [5]. Согласно аналитически рассчитанным размерам поперечного сечения камеры найдено его волновое сопротивление:  $Z_0 = 56,04$  Ом. Произведена ручная оптимизация с целью достижения волнового сопротивления 50 Ом. Результаты оптимизации:  $a = 793$  мм,  $b = 197,3$  мм,  $d = 394,7$  мм,  $w = 597$  мм,  $Z_0 = 50,04$  Ом.

В программе CST MWS выполнен электродинамический анализ оптимизированного поперечного сечения. Толщина внешнего металлического корпуса была принята равной 1 мм, толщина центрального проводника – 2 мм. Зависимость характеристического сопротивления сечения от частоты представлена на рисунке 3.

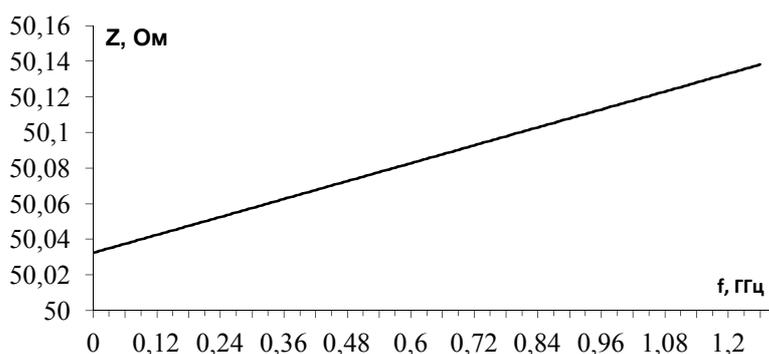


Рис. 3 – Частотная зависимость  $Z_0$

Увеличение сопротивления с ростом частоты обусловлено использованием для модели материала с потерями. Результаты электродинамического моделирования подтверждают точность ранее проведенных расчётов.

В данной работе был рассмотрен подход к определению оптимальных размеров ГТЕМ-камеры. В дальнейшем на основе полученных данных будут проведены полное электродинамическое моделирование камеры и её оптимизация. Работа выполнена в рамках государственного задания №8.1802.2014/К Минобрнауки России.

## Библиографический список

1. G. Calo, F. Lattarulo, V. Petruzzelli. GTEM Cell Experimental Set up for In Vitro Dosimetry // Journal of Communications Software and Systems, Vol.3, No. 1, 2007. С: 34-43.
2. Sinha S., Stander T. Development, simulation and construction of cost-effective GTEM cells // 23rd International Conference Radioelektronika, 2013. С: 39-44.
3. Yuanyuan W., Mengxia Y., Wensi Z., Junru Z. Design of ultra wide band transition connector for GTEM cell // 2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011. С: 3657-3660.
4. C. Icheln. The Construction and Application of a GTEM Cell, Master's Thesis, Technical University of Hamburg-Harburg / Helsinki University of Technology, 1995.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619615. TALGAT 2015 / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т. и др. – Заявка №2013617773. Дата поступления 29 авг. 2013 г. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2013 г.

УДК 004.428.4; ГРНТИ 59.37.71

## СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ДЛЯ СТЕНДА ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

**В.В. Климаков, В.Ю. Мишин, Г.В. Давыдов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, ep@rsreu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются практические вопросы разработки системы регистрации температурного поля для стенда тепловых испытаний инерциальных датчиков.

*Ключевые слова.* Инерциальный датчик, тепловые испытания, 1-wire интерфейс, бесплатформенная инерциальная навигационная система.

## REGISTRATION SYSTEM FOR THE TEST RIG THERMAL TESTING INERTIAL SENSORS

**V.V. Klimakov, V.Yu. Mishin, G.V. Davydov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, ep@rsreu.ru*

*Abstract.* We consider the practical issues of the development registration system for the temperature field in the thermal test rig inertial sensors.

*Keywords.* Inertial sensors, thermal testing, 1-wire interface, strapdown inertial navigation system.

В настоящее время появление эффективных методов обработки сигналов [1] создало условия для качественного прогресса в области повышения точности бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС). Развитие этой тенденции означает включение в состав блока инерциальных датчиков цифровых управляющих процессоров, высокое быстродействие которых позволяет реализовать новые алгоритмы выделения информации и управления характеристиками лазерных гироскопов и отказаться от части используемой аналоговой электроники [2]. Однако подобные решения наряду с уменьшением габаритных характеристик БИНС увеличивают тепловую нагрузку на инерциальные датчики. Все это создает предпосылки для роста нестабильности масштабных коэффициентов и дрейфа выходных сигналов инерциальных датчиков, что в конечном итоге приводит к снижению точности и надежности БИНС [3].

Как показывают данные, приведенные в работах [4,5], конструкция БИНС представляет собой довольно плотно скомпонованную архитектуру, тепловой режим которой в случае введения в ее состав цифровой сервисной электроники снизит эксплуатационную надежность. Поэтому для последующей выработки конструкторских решений, обеспечивающих интенсификацию теплообмена внутри БИНС [6], требуется исследование распределения температур для инерциальных датчиков вместе с сервисной электроникой.

В настоящей работе рассматривается система регистрации температурного поля для проведения тепловых испытаний блока инерциальных датчиков в составе разработанного теплового стенда. Стенд для тепловых испытаний триады лазерных гироскопов состоит из следующих основных структурных элементов: камеры тепла и холода, разборного макета внешнего корпуса БИНС, системы регистрации температурного поля и исследуемого блока чувствительных элементов, содержащего лазерные гироскопы, сервисную электронику,

высоковольтный источник и блок акселерометров. Функциональная схема стенда, позволяющая реализовать поставленные задачи и описывающая принцип его работы, представлена на рис. 1.

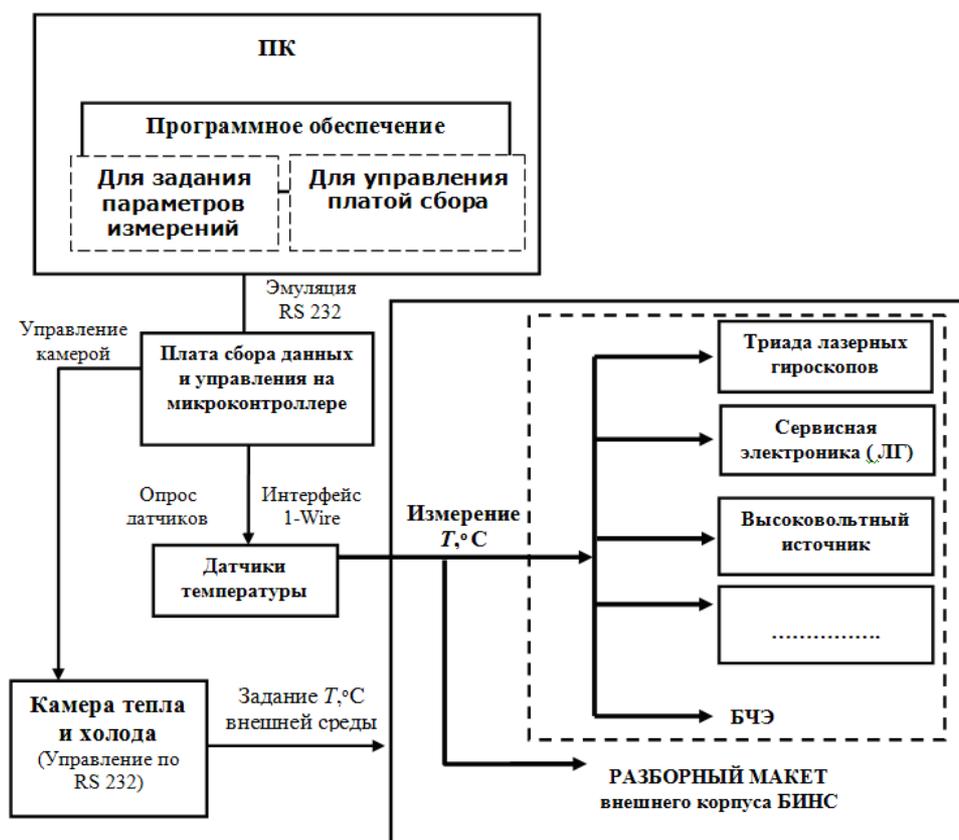


Рис.1. Функциональная схема стенда для тепловых испытаний

Система измерения температурного поля включает в себя персональный компьютер, плату сбора информации с датчиков и группу цифровых термодатчиков DS18B20 [7], соединенных по 1-wire интерфейсу. Каждый цифровой датчик DS18B20 имеет в своем составе кроме полупроводникового диода встроенный АЦП, который позволяет посылать на плату сбора информации уникальный 64-битный код, содержащий информацию о температуре и имени датчика.

Алгоритм работы системы регистрации температуры (рис. 2) представляет собой следующее:

- управляющая программа на ПК открывает COM порт, после чего опрашивает адреса датчиков и их количество через плату сбора информации с записью полученных данных в таблицу пользователя;

- далее программа находится в режиме ожидания действий пользователя. На этом этапе можно присвоить интуитивно понятное имя датчика по его идентификационному коду, задать интервалы режимов измерения и время опроса;

- при запуске режима измерений активируется таймер, который будет с заданным шагом выдавать событие, по которому программа последовательно запрашивает данные о температурах с датчиков у микроконтроллера и заносит их в таблицу, параллельно строя температурные зависимости от времени (рис.3);

- по событию от пользователя закончить измерения таймер останавливается и все накопленные данные о температурах записываются в файл вместе со служебной информацией.

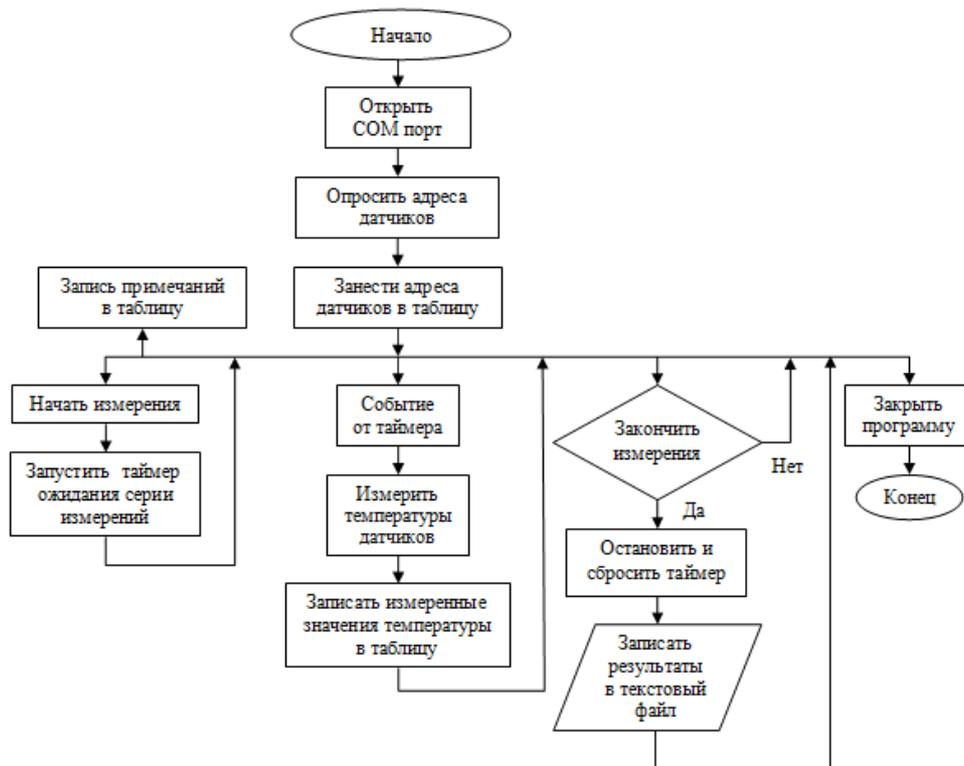


Рис. 2. Алгоритм работы системы регистрации температуры

Если по команде от ПК микроконтроллер не отвечает, то включается сигнал об ошибке связи с платой, после чего работа программы приостанавливается. В случае если программа на ПК обнаружила ошибку в процессе приема данных от выбранного датчика, то процесс измерений повторяется для этого датчика несколько раз (при отрицательном результате в таблице пользователя регистрируется отказ датчика). Если к плате сбора датчики не подключены, то выдается сообщение - «подключите датчики».

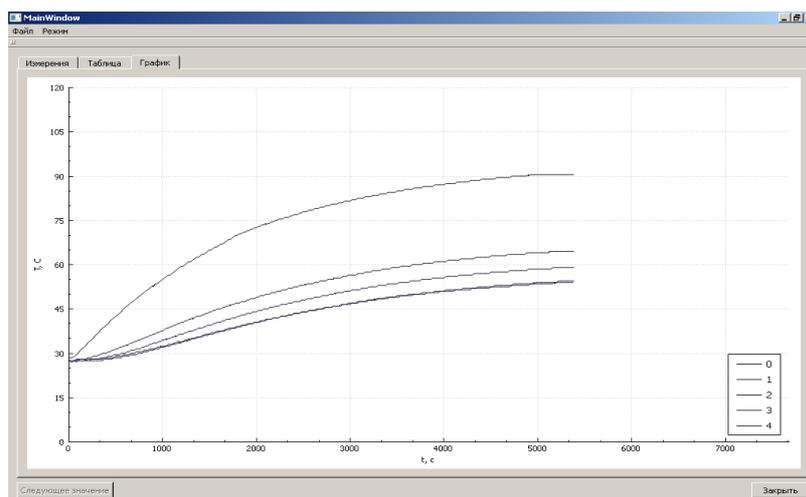


Рис. 3. Визуализация результатов регистрации температурного поля для блока инерциальных датчиков в разработанном программном обеспечении

Разработанная программа для системы регистрации температурного поля позволяет производить сбор и обработку данных с цифровых датчиков, использующих протокол связи 1-wire и предназначена:

- для реализации процесса измерения, обработки, приема-передачи и накопления информации по измеряемым данным;

- обработки данных;
- отображения результатов измерений в виде таблиц и графиков;
- создания файлов, хранящих информацию о датчиках и результатах измерений;
- управления по RS232 камерой тепла и холода.

Сбор данных от цифровых датчиков и связь с ПК осуществляются с помощью микроконтроллера STM32. Программа снабжена интуитивно понятным интерфейсом. Программа может работать на любом ПК типа IBM PC с операционной системой Windows XP или выше.

В настоящее время осуществляется апробация разработанной системы в составе стенда для тепловых испытаний инерциальных датчиков.

### **Библиографический список**

1. Мишин В.Ю. , Молчанов А.В., Чиркин М.В. Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах// Приборы. 2013. №1. С.33 -38.
2. Молчанов А.В., Белокуров В.А., Чиркин М.В., Кошелев В.И., Мишин В.Ю., Морозов Д.А. Прецизионный лазерный гироскоп с цифровым каналом для обработки квадратурных сигналов // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 25-27 мая, 2015. С. 266-273.
3. Запотько Н.Р., Катков А.А., Недзвецкая А.А. Пьезокорректор для компенсации тепловых вариаций длины оптического пути резонатора лазерного гироскопа // Оптический журнал. 2011. №10(78).С.10-12.
4. Климаков В.В., Молчанов А.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В. Исследование теплового режима навигационной системы на кольцевых газоразрядных лазерах // Вестник РГРТУ. 2012. № 39-2. С.48-52.
5. Климаков В.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В., Молчанов А.В. Оценка предельной температуры кольцевых лазеров в условиях конвективного теплообмена внутри бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Решетневские чтения. 2012. Т. 1. № 16. С.152-153.
6. Климаков В.В., Молчанов А.В., Улитенко А.И., Чиркин М.В. Перспективы применения тепловых труб в бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Приборы. 2013. №1. С.24 -33.
7. Шитиков А. Цифровые датчики температуры от DallasSemiconductor // Компоненты и технологии. 2001. №2. С.1-4.

УДК 004.9 ГРНТИ 47.61

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА**

**М.В. Борисов\***, **В.Ю. Мишин\*\***, **А.Е. Серебряков\*\***, **М.В. Чиркин\*\***

*\* АО «Московский институт электромеханики и автоматики»,*

*Россия, Москва, miea.otd442@yandex.ru*

*\*\*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, sea89s@yandex.ru*

Аннотация. Оцениваются составляющие случайных шумов выходного сигнала лазерного гироскопа методом вариации Аллана.

*Ключевые слова.* Лазерный гироскоп, дисперсия Аллана, случайные шумы.

## **APPLICATION OF ALLAN VARIANCE METHOD FOR OUTPUT SIGNAL ANALYSIS IN A LASER GYRO**

**M.V. Chirkin\***, **M.V. Borisov\*\***, **V.Y. Mishin\***, **A.E. Serebryakov\***

*\* The Ryazan State Radio Engineering University,*

*Russia, Ryazan, sea89s@yandex.ru*

*\*\* JSC "Moscow Institute of Electromechanics and Automatics, Moscow,*

*Russia, miea.otd442@yandex.ru*

Abstract. Evaluated components of the laser gyro random noise by Allan variance

*Keywords.* Laser gyro, Allan variance, random noise.

В системах инерциальной навигации в качестве датчиков угловых скоростей и угловых перемещений в настоящее время широко используются лазерные гироскопы (ЛГ) [1]. Точность навигационной информации в значительной степени определяется случайными погрешностями входящих в ее состав трех ЛГ. Источники случайной погрешности лазерного гироскопа классифицируют следующим образом [1,2]:

1. Шум квантования, возникающий в результате дискретизации первичных оптических сигналов ЛГ, которые имеют аналоговую форму.

2. Ошибка вследствие неполного удаления из выходного сигнала колебаний на частоте знакопеременной подставки – так называемая погрешность «недовычета».
3. Случайные блуждания регистрируемого углового положения вследствие ошумления частотной подставки, а также естественных флуктуаций лазерного излучения.
4. Нестабильность дрейфа информационных сигналов ЛГ.
5. Нестабильность масштабного коэффициента.

Каждая из составляющих характеризуется специфической зависимостью от времени усреднения отсчетов выходного сигнала. Возможность применения ЛГ в системах навигации различных классов точности определяется его случайной погрешностью и временем усреднения, необходимым для достижения приемлемой ее величины [3]. В качестве адекватного данной задаче математического аппарата для анализа выходного сигнала ЛГ применяется метод вариации Аллана [4]. В настоящей работе этот метод использован применительно к ЛГ, в котором вычет из выходного сигнала колебаний на частоте подставки осуществляется с помощью принудительной синхронизации отсчетов угловой скорости с механическими колебаниями кольцевого лазера относительно корпуса ЛГ. Цель исследований заключается в определении степени эффективности мер, направленных на минимизацию случайной погрешности ЛГ, и в поиске возможностей увеличить частоту обновления выходных отсчетов угловой скорости.

Эксперименты выполнены с использованием лазерного гироскопа на основе серийно выпускаемого кольцевого лазера КЛ-3, конструкция которого аналогична описанной в работе [3]. В процессе регистрации информационных сигналов функционировала система стабилизации периметра кольцевого резонатора. Условия измерений исключили переходы лазерной генерации на другую продольную моду кольцевого резонатора, что обеспечило стабильность масштабного коэффициента ЛГ. Для компенсации эффекта синхронизации встречных волн (явления захвата) кольцевой лазер совершал вращательные механические колебания относительно корпуса ЛГ с частотой 415 Гц, амплитуда и фаза которых принудительно изменялись случайным образом. Система регистрации позволяла фиксировать изменения разности фаз встречных волн, генерируемых КЛ, на величины, кратные  $\pi/2$  радиан.

Для выполнения экспериментов ЛГ был расположен на фундаменте, изолированном от корпуса здания. Перед измерениями ЛГ был ориентирован в пространстве таким образом, чтобы плоскость кольцевого резонатора оказалась в горизонтальном положении. В таких условиях после вычитания колебаний на частоте подставки ЛГ регистрирует проекцию на вертикаль вектора угловой скорости вращения Земли.

На рис. 1 представлен временной ряд зафиксированных отсчетов угловой скорости  $\omega$  при интервале времени для усреднения выходных данных, равном 1 с. Среднее значение  $\omega$  соответствует величине вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли на широте  $52^{\circ}43'$ .

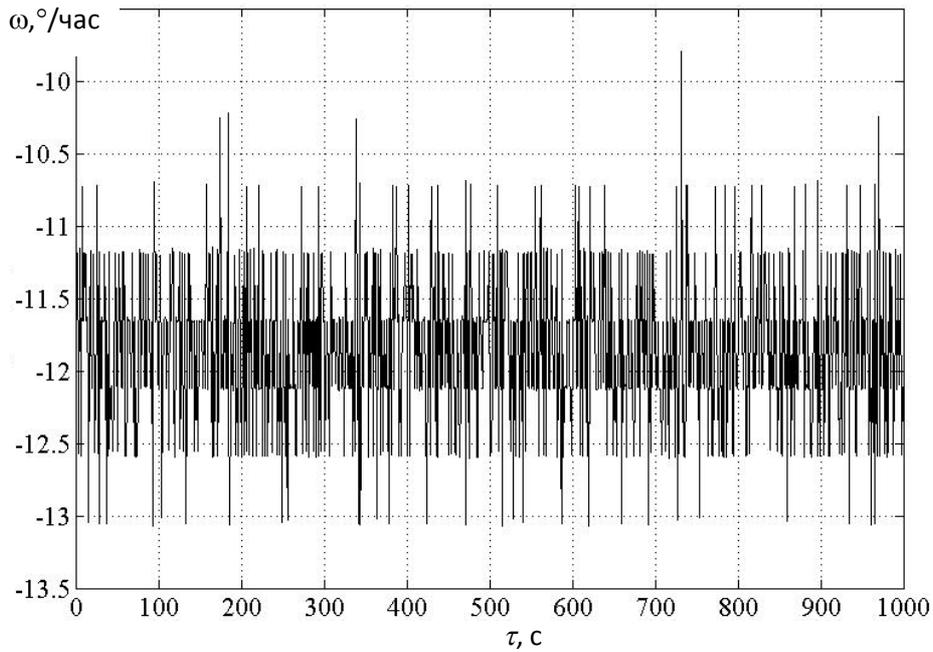


Рис. 1. Временной ряд отсчетов угловой скорости вращения лазерного гироскопа

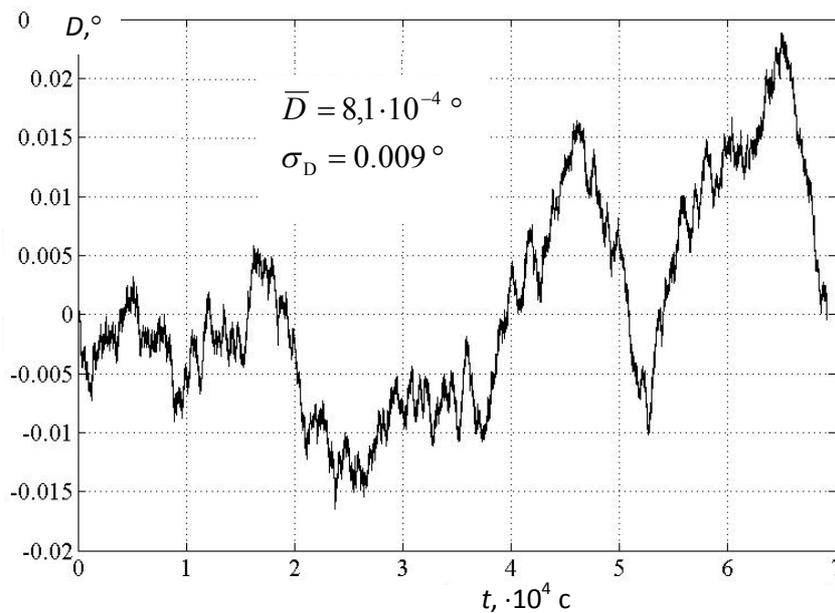


Рис. 2. Случайные блуждания зарегистрированного углового положения.  $\bar{D}$  - среднее значение,  $\sigma_D$  - среднеквадратический разброс

После вычитания из зарегистрированных отсчетов среднего значения угловой скорости, полученного для всей реализации, было выполнено их суммирование с накоплением. Результат этой процедуры позволяет охарактеризовать пределы случайных блужданий зарегистрированного угла из-за флуктуаций выходного сигнала ЛГ (рис. 2).

Стандартами IEEE для идентификации структуры шумов ЛГ рекомендовано применение метода вариации Аллана [4]. Для этого последовательность отсчетов угловой скорости разбивают на  $K = 2N/M$  не перекрывающихся кластеров по  $M$  отсчетов в каждом:

$$\underbrace{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M}_{k=1}, \underbrace{\omega_{M+1}, \dots, \omega_{2M}}_{k=2}, \dots, \underbrace{\omega_{2N-M}, \dots, \omega_{2N}}_{k=K}, \quad (1)$$

где  $2N$  - число отсчетов последовательности угловой скорости  $\omega$ .

Для кластеров вычисляют средние значения:

$$\overline{\omega}_k(M) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \omega_{(m-1)M+k}; \quad k = 1 \dots K \quad (2)$$

и вариацию Аллана  $\sigma_A^2$ :

$$\sigma_A^2(M) = \frac{1}{2(K-1)} \sum_{k=1}^{K-1} (\overline{\omega}_{k+1}(M) - \overline{\omega}_k(M))^2. \quad (3)$$

На рис. 3 приведена зависимость корня из вариации Аллана от времени усреднения  $\tau$ . Различные источники случайной погрешности приводят к разным зависимостям от времени усреднения  $\tau$ .

1. Шум квантования:

$$\sigma_1 \approx Q_z \cdot \frac{\sqrt{3}}{\tau} \text{ °/час}, \quad (4)$$

где  $Q_z$  – коэффициент шума квантования, теоретическая оценка нижнего предела которого составляет:

$$Q_z = \frac{360 \cdot \lambda \cdot \Delta\psi_1}{\pi^2 \cdot l \sqrt{12}} \text{ (°·с/час)}, \quad (5)$$

где  $l = 0,28$  м – периметр кольцевого резонатора,  $\lambda = 0,06328$  мкм – длина волны излучения, генерируемого КЛ,  $\Delta\psi_1 = \pi/2$  – минимальное изменение разности фаз встречных волн, на которое реагирует используемая сервисная электроника.

Подставляя (5) в (4), получим теоретическую оценку этого эффекта:

$$\sigma_{1\text{теор}} = \frac{0,232}{\tau} \text{ (°/час)}, \quad (6)$$

где время усреднения  $\tau$  следует подставлять в секундах.

2. Погрешность, связанная со случайными блужданиями регистрируемого углового положения:

$$\sigma_{2\text{теор}} = \frac{\omega_L}{\sqrt{\tau K \omega_d}} = \frac{0,1}{\sqrt{\tau}} \text{ (°/час)}, \quad (7)$$

где  $K = 2\pi l/\lambda$  – масштабный коэффициент,  $\omega_d = 2 \cdot \pi \cdot f_D \cdot \alpha_D \cdot \pi/180$ ,  $f_D = 415$  Гц и  $\alpha_D = 2,2'$  – частота и средняя амплитуда колебаний кольцевого лазера,  $\omega_L = 0.03$  °/с.

3. Вклад нестабильности дрейфа выходного сигнала, вызванного фликкер-шумом, не зависит от времени интегрирования.

Анализ изменений наклона графика, построенного в логарифмическом масштабе (см. рис. 3), позволяет разделить составляющие погрешности. Для этого зависимость вариации Аллана от времени усреднения была аппроксимирована следующим соотношением:

$$\sigma^2 = \left(\frac{A}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{B}{\sqrt{\tau}}\right)^2 + C^2. \quad (8)$$

Аппроксимация проводилась с помощью нелинейной регрессии по методу наименьших квадратов с использованием метода Гаусса – Ньютона. Значения коэффициентов составили  $A = 0,26$  °·с/час,  $B = 0,11$  °·с<sup>1/2</sup>/час =  $0.0018$  °·час<sup>1/2</sup>,  $C = 0,007$  °/час. Коэффициент  $A$  определяет величину шума квантования,  $B$  – случайное блуждание угла,  $C$  – нестабильность дрейфа.

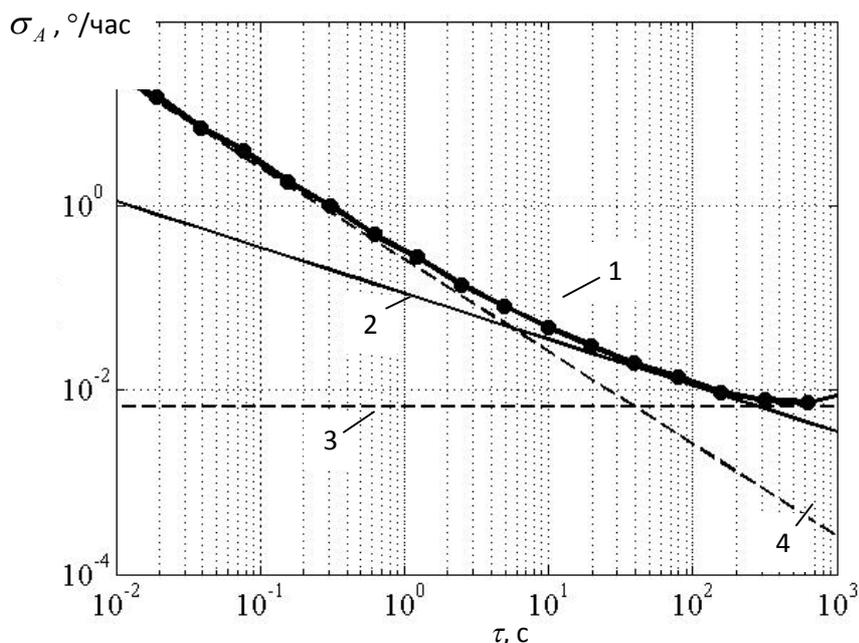


Рис. 3. Корень из дисперсии Аллана (1) для отсчетов угловой скорости вращения лазерного гироскопа и составляющие случайной погрешности: 2 – случайные блуждания угла, 3 – нестабильность дрейфа, 4 – шум квантования

В работе [5] исследовался ЛГ со значением минимального изменения разности фаз встречных волн, на которое реагирует используемая сервисная электроника,  $\Delta\psi_1 = \pi$ . Значения аппроксимирующих коэффициентов такого ЛГ составили:  $A = 0,87 \text{ }^\circ\cdot\text{с}/\text{час}$ ,  $B = 0,082 \text{ }^\circ\cdot\text{с}^{1/2}/\text{час}$ ,  $C = 1,5\cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{час}$ . Двукратное уменьшение величины  $\Delta\psi_1$  привело к снижению вклада блуждания угла в случайную ошибку ЛГ в три раза.

Однако построение навигационных систем 2-го класса точности предполагает использование ЛГ с точностью измерения составляющей угловой скорости не хуже  $0,008 \text{ }^\circ/\text{час}$ , а величина случайного блуждания угла не должна превышать  $0,0015 \text{ }^\circ\cdot\text{час}^{1/2}$  [3]. Указанная точность достигается при времени усреднения в сотни секунд.

Задача построения ЛГ с повышенной частотой вывода информации об угловых перемещениях классическими методами обработки первичных сигналов кольцевого лазера крайне затруднительна. Снижение уровня шумов возможно путем уменьшения порога синхронизации встречных волн, что достигается подавлением обратного рассеяния лазерного излучения на основе повышения качества оптических поверхностей элементов кольцевого резонатора. Альтернативный путь – использование цифровых методов обработки первичных сигналов кольцевого лазера [5].

### Библиографический список

1. Aronowitz F. Fundamentals of the ring laser gyro // Optical gyros and their application, - RTO-AG-339,1999, p.3-1 – 3-45.
2. Tehrani M.M. Ring laser gyro data analysis with cluster sampling technique// Prog. IEEE, 1983, v. 412, - p. 207-222
3. Kuznetsov A.G., Molchanov A.V., Chirkin M.V., Izmailov E.A. Precise laser gyroscope for autonomous inertial navigation// Quantum Electronics, - v. 45:1, 2015. - p. 78–88
4. Аллан Д.У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения// Гироскопия и навигация. № 4(91). 2015. С. 3-28.
5. Chirkin M.V. Mishin V. Yu., Morozov D.A. Ring laser digital signal processing in evaluating laser gyro characteristics// 17<sup>th</sup> Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, - 2010. – p. 60 -62.

## **КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ ДЛЯ СОСТАВА АКТИВНОЙ СРЕДЫ ОТПАЯННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРОВ С ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ С РАЗРЯДНЫМ КАНАЛОМ, ПОЛНОСТЬЮ ОГРАНИЧЕННЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СТЕНКАМИ**

**И.Г. Веснов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, vsnvi@rambler.ru*

*Аннотация.* Установлено, что отношение площади разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, к его объёму однозначно определяет химический состав активной среды в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазерах с ВЧ возбуждением; найдены простые аналитические выражения для степени диссоциации CO<sub>2</sub> и содержания атомарного кислорода как функций от данного отношения.

*Ключевые слова.* Критерий подобия, отпаянный волноводный CO<sub>2</sub> лазер с ВЧ возбуждением, степень диссоциации двуокиси углерода, атомарный кислород.

## **SIMILARITY CRITERION FOR ACTIVE MEDIUM MIXTURE IN RF-EXCITED SEALED-OFF CO<sub>2</sub> WAVEGUIDE LASERS WITH DISCHARGE CHANNEL FORMED BY FOUR DIELECTRIC WALLS**

**I.G. Vesnov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, vsnvi@rambler.ru*

*Abstract.* It was found that the  $S/V$  ratio where  $S$  is area of discharge channel formed by four dielectric walls and  $V$  is discharge channel volume definitively determines active medium composition in RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide lasers. Simple analytical expressions for the degree of carbon dioxide dissociation and the content of atomic oxygen as functions of  $S/V$  have been obtained.

*Keywords.* Similarity criterion, RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide laser, degree of carbon dioxide dissociation, atomic oxygen.

В [1÷4] была разработана теоретическая модель, описывающая кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных CO<sub>2</sub> лазеров с поперечным ВЧ возбуждением. В этих работах установлено, что расчёт содержания CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> и O в активной среде такого типа лазеров требует решения самосогласованной системы следующих уравнений: 1) кинетического уравнения Больцмана для электронов; 2) уравнения теплопроводности для газовой смеси; 3) уравнений непрерывности для CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>; 4) уравнений баланса по углероду и кислороду. Анализ численного решения этой системы уравнений для различных условий поддержания разряда и начального состава активной среды показал, что разложение и регенерация двуокиси углерода пространственно разделены: диссоциация CO<sub>2</sub> в результате прямого электронного удара происходит в объёме активной среды, а регенерация – преимущественно на диэлектрической поверхности разрядного канала. Диэлектрическая поверхность в реакции рекомбинации  $CO + O + M \rightarrow CO_2 + M$  играет роль третьего тела (M), необходимого для соблюдения законов сохранения энергии и импульса.

Будем называть разрядный канал волноводного CO<sub>2</sub> лазера полностью ограниченным диэлектрическими стенками, если две его боковые стенки изготовлены из керамики (например, из алюмооксидной керамики АИ-1), а металлические электроды покрыты слоем из диэлектрического материала (например, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Для расчёта состава активной среды таких лазеров в упомянутую выше самосогласованную систему уравнений в качестве параметра удобно ввести отношение  $S/V$ , где  $S$  – площадь диэлектрической поверхности разрядного канала,  $V$  – объём разрядного канала [4]. Очевидно, что с ростом этого отношения степень диссоциации двуокиси углерода и относительное содержание атомарного кислорода в активной среде должны уменьшаться.

Экспериментальное и теоретическое изучение диссоциации двуокиси углерода в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазерах выявило [1÷5] крайне слабую зависимость её степени

от условий поддержания разряда (удельной мощности накачки, характера возбуждения активной среды, давления) и начального состава активной среды при неизменной конструкции разрядного канала. Следовательно, относительные содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{O}$  в активной среде работающего лазера с разрядным каналом, полностью ограниченным диэлектрическими стенками, зависят главным образом от отношения  $S/V$ . В лазерах с металлокерамическим волноводом состав активной среды является функцией двух переменных – отношения  $S/V$  и межэлектродным расстоянием  $d$ .

На рис. 1, 2 представлены расчётные зависимости степени диссоциации двуокиси углерода и относительного содержания атомарного кислорода соответственно в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров с металлокерамическими волноводами от  $S/V$  для различных межэлектродных расстояний  $d$ . При расчётах принималось во внимание, что изменение геометрии разрядного канала влечёт изменение удельной мощности накачки [5, 6]. Ввиду отмеченной выше слабой зависимости степени диссоциации  $\text{CO}_2$  от условий поддержания разряда и начального состава активной среды, результаты расчёта остаются практически неизменными (с точностью не хуже 5%) при варьировании удельной (на единицу площади электродов) мощности накачки от 8 до 16 Вт/см<sup>2</sup> и относительного содержания  $\text{CO}_2$  в газовой смеси при наполнении лазера от 10 до 20%.

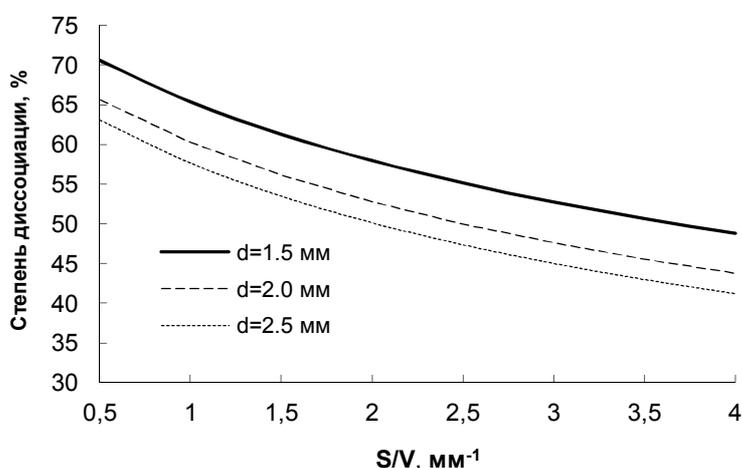


Рис. 1. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров с металлокерамическими волноводами от  $S/V$  для различных межэлектродных расстояний  $d$

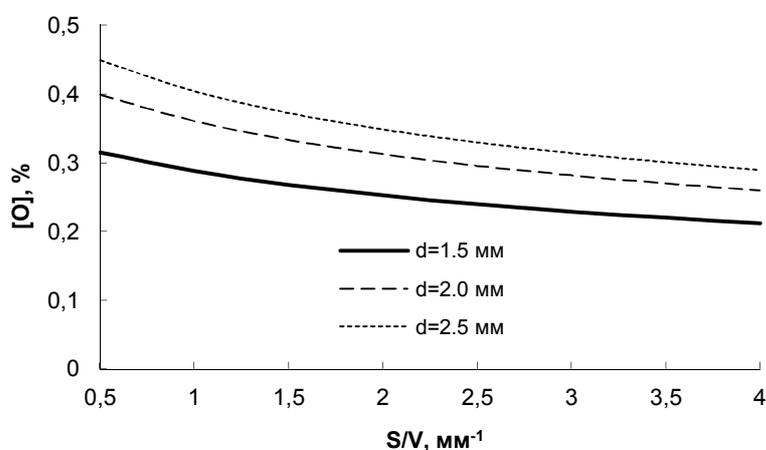


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации атомарного кислорода в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров с металлокерамическими волноводами от  $S/V$  для различных межэлектродных расстояний  $d$

Результаты расчёта подтверждают понятное из качественных соображений уменьшение степени диссоциации  $\text{CO}_2$  и относительного содержания атомарного кислорода с ростом отношения  $S/V$ . Однако зависимости этих величин от межэлектродного расстояния  $d$  носят противоположный характер. Это объясняется тем, что на поверхности металлов скорость гибели атомарного кислорода с образованием  $\text{O}_2$  обратно пропорциональна  $d^2$  и существенно превышает скорость протекание реакции гетерогенной рекомбинации  $\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$  [4, 5].

На рис. 3 представлены результаты расчёта степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением в зависимости от отношения  $S/V$  разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками.

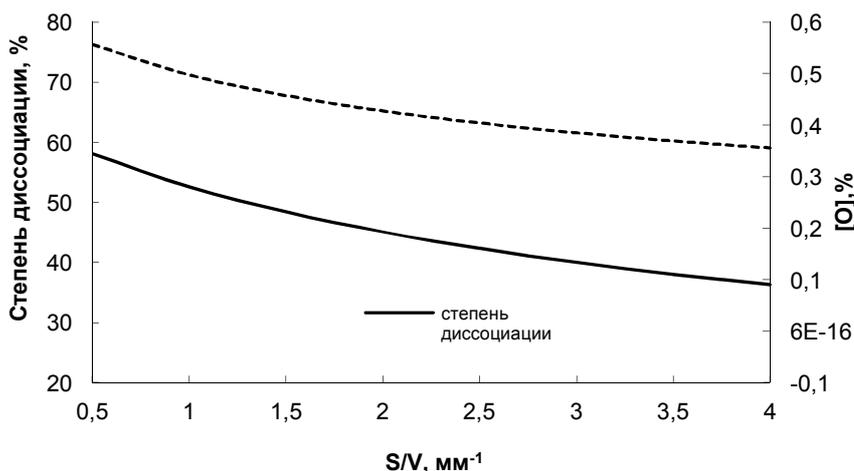


Рис. 3. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода  $[O]$  в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением от параметра  $S/V$  разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками

Результаты расчётов подтвердили вывод, полученный в [1,3,5], что использование разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, позволяет снизить степень диссоциации  $\text{CO}_2$  на 20÷25% по сравнению с таковой в лазерах с металлокерамическими волноводами. Кроме того, подтвердились и очевидные из качественных соображений зависимости степени диссоциации  $\text{CO}_2$  и относительного содержания атомарного кислорода от отношения  $S/V$ .

Поскольку самосогласованный расчёт состава активной среды отпаянного  $\text{CO}_2$  с разрядным каналом, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, для конкретных условий поддержания разряда и начального состава активной среды достаточно сложен, а результаты расчёта являются монотонно убывающими функциями отношения  $S/V$ , то для оперативной оценки степени диссоциации  $\alpha$  и относительного содержания атомарного кислорода  $[O]$  будем аппроксимировать зависимости на рис. 3 выражениями вида  $\exp[a - b \cdot (S/V) - c \cdot (S/V)^2]$ . Используя метод наименьших квадратов для нахождения коэффициентов  $a, b$  и  $c$ , получим, что при  $S/V = 0.5 \div 4 \text{ мм}^{-1}$ , справедливы следующие аппроксимационные формулы:

$$\alpha = \exp[4.17 - 0.22 \cdot (S/V) + 0.02 \cdot (S/V)^2], \%$$

$$[O] = 10^{-2} \cdot \exp[4.14 - 0.25 \cdot (S/V) + 0.03 \cdot (S/V)^2]. \%$$

Очевидно, что  $S/V$  можно рассматривать как критерий подобия с точки зрения состава активной среды, то есть каковы бы ни были условия поддержания разряда и начальный состав активной среды лазера при одинаковой величине отношения  $S/V$  состав активной среды будет неизменен.

Таким образом, в работе показано, что отношение площади разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, к его объёму однозначно определяет химический состав активной среды в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазерах с ВЧ возбуждением; найдены простые аналитические выражения для степени диссоциации CO<sub>2</sub> и содержания атомарного кислорода как функций от  $S/V$ .

### **Библиографический список**

1. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуокиси углерода в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub>-лазерах с высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1. С. 55-57.
2. Cherezov V.M., Kyun V.V., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Sipaylo A.A., Stepanov V.A., Vesnov I.G. CO<sub>2</sub> dissociation in sealed-off RF-excited CO<sub>2</sub> waveguide lasers. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2000. С. 100-110.
3. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Dissociation of carbon dioxide in sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide lasers with radio-frequency excitation. Quantum Electronics. 2000. Т. 30. № 1. С. 15-19.
4. Веснов И.Г. Кинетика диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных CO<sub>2</sub>-лазеров с поперечным высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 310-313.
5. Веснов И.Г. Стабилизация состава активной среды отпаянных лазеров на углекислом газе с поперечным высокочастотным возбуждением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань, 2001.
6. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Optimization of the thermal regime in RF CO<sub>2</sub> lasers with large-area planar electrodes. Quantum Electronics. 1999. Т. 29. № 4. С. 337-338.

УДК 621.373.826; ГРНТИ 29.33.15

## **СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ СТЕПЕНИ ДИССОЦИАЦИИ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА И СОДЕРЖАНИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ ЩЕЛЕВЫХ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРОВ С ПОПЕРЕЧНЫМ ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

**И.Г. Веснов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, vsnvi@rambler.ru*

*Аннотация.* Установлено, что уменьшение степени диссоциации двуокиси углерода и содержания атомарного кислорода в активной среде щелевых CO<sub>2</sub> лазеров с поперечным возбуждением может быть достигнуто нанесением на металлические электроды диэлектрического (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или каталитического (Au) покрытий и заменой N<sub>2</sub> на CO в исходной газовой смеси лазеров с гетерогенными катализаторами.

*Ключевые слова.* CO<sub>2</sub> лазер с поперечным ВЧ возбуждением, степень диссоциации двуокиси углерода, атомарный кислород, гетерогенный катализатор.

## **METHODS OF DECREASE OF THE DEGREE OF CARBON DIOXIDE DISSOCIATION AND THE ATOMIC OXYGEN CONTENT IN TRANSVERSE RF- EXCITED SLIT CO<sub>2</sub> LASER ACTIVE MEDIUM**

**I.G. Vesnov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, vsnvi@rambler.ru*

*Abstract.* It was found that decrease of the degree of carbon dioxide dissociation and the atomic oxygen content in transverse RF-excited slit CO<sub>2</sub> laser active medium may be achieved with dielectric (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) or catalytic (Au) coating of metal electrodes and substitution CO for N<sub>2</sub> in initial gas mixture of lasers with heterogonous catalyts.

*Keywords.* Transverse RF-excited CO<sub>2</sub> laser, degree of carbon dioxide dissociation, atomic oxygen, heterogonous catalyts.

Переход от возбуждения активной среды в волноводе квадратного сечения к возбуждению в щелевой разрядной структуре позволяет не только повысить выходную мощность CO<sub>2</sub> лазеров без увеличения их продольных размеров, но и проявить преимущества поперечного ВЧ разряда, позволяющие реализовать однородное возбуждение активной среды без контрагирования разряда. При этом требуется снижение как объёмной плотности мощности ВЧ накачки (примерно в 2.5 раза), так и общего давления газовой смеси (примерно на 30%) [1,2]. Кроме того, начиная с восьмикратного соотношения сторон

разрядного канала прямоугольного сечения, последующее увеличение этого соотношения уже не требует соответствующего снижения мощности накачки [2].

Однако, несмотря на снижение удельной мощности накачки и давления газовой смеси, степень диссоциации  $\alpha$  двуокиси углерода в активной среде щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением весьма велика и составляет  $0.7 \div 0.8$ , что примерно на 30÷40% больше, чем в активных средах отпаянных волноводных  $\text{CO}_2$  лазеров с разрядным каналом квадратного сечения [3, 4, 5]. Поэтому с целью улучшения выходных энергетических характеристик щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением возникает необходимость уменьшения степени диссоциации двуокиси углерода в активной среде.

Другой важнейшей задачей стабилизации состава активной среды щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением является оптимизация содержания атомарного кислорода. Присутствие последнего, необходимое для эффективной регенерации углекислого газа и обеспечения приемлемой величины степени диссоциации, вызывает снижение инверсии населённостей и мощности генерации лазера. Так, в [6] отмечается, что содержание атомарного кислорода в активной среде на уровне 0.5% приводит к снижению выходной мощности лазера на 30%.

Трудоёмкость прямых экспериментальных исследований влияния на степень диссоциации двуокиси углерода условий поддержания разряда и конструктивных особенностей разрядного канала щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением, а также отсутствие методики определения концентрации атомарного кислорода в подобного типа лазерах, обуславливают необходимость использования адекватной теоретической модели, описывающей кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода.

В работах [3, 7] такая теоретическая модель была разработана. Показано, что расчёт содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  и  $\text{O}$  в активной среде отпаянных волноводных  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением требует решения самосогласованной системы следующих уравнений: 1) кинетического уравнения Больцмана для электронов; 2) уравнения теплопроводности для газовой смеси; 3) уравнений непрерывности для  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ ; 4) уравнений баланса по углероду и кислороду. В [7] впервые был предложен способ расчёта состава активной среды  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным ВЧ возбуждением при использовании в них гетерогенного катализатора (покрытие слоем золота) для снижения степени диссоциации двуокиси углерода.

На рис. 1 представлены результаты расчёта степени диссоциации  $\alpha$  двуокиси углерода и относительной концентрации  $[\text{O}]$  атомарного кислорода от межэлектродного расстояния  $d$  в щелевых  $\text{CO}_2$  лазерах с металлическими электродами на основе упомянутой выше теоретической модели. При расчётах учитывалось, что при изменении  $d$  должен соблюдаться критерий подобия для щелевых лазеров  $pd = 15$  Торр-см [1, 2]. Кроме того, ввиду установленной в [2] для отпаянных волноводных  $\text{CO}_2$  лазерах с поперечным ВЧ возбуждением крайне слабой зависимости  $\alpha$  от

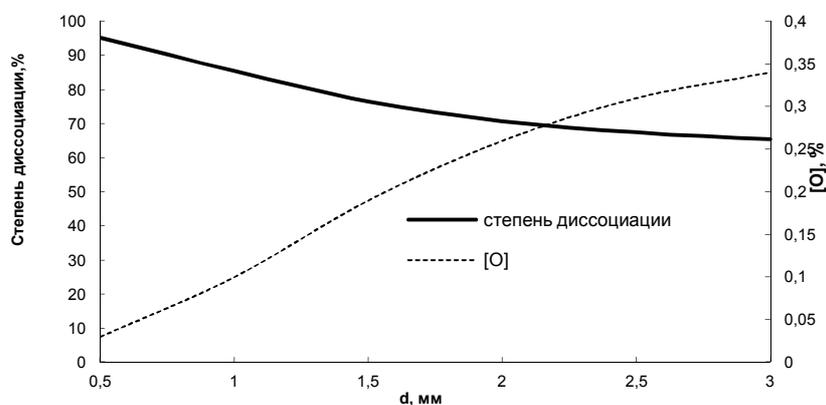


Рис. 1. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода от межэлектродного расстояния  $d$  в щелевых  $\text{CO}_2$  лазерах с металлическими электродами

удельной мощности накачки и состава активной среды при наполнении лазера, результаты расчёта остаются справедливыми с точностью не хуже 5% при варьировании удельной (на единицу площади электродов) мощности ВЧ накачки от 4 до 6 Вт/см<sup>2</sup> и относительного содержания CO<sub>2</sub> в активной среде при наполнении лазера от 10 до 20%. Из рисунка 1 видно, что степень диссоциации CO<sub>2</sub> и относительное содержание атомарного кислорода достаточно велики и противоположно друг другу изменяются с увеличением  $d$ .

На рис. 2 представлены результаты расчёта  $\alpha$  и [O] от межэлектродного расстояния  $d$  в щелевых CO<sub>2</sub> лазерах с покрытыми диэлектрическим слоем (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) металлическими электродами. Видно, что использование такого покрытия приводит к снижению степени диссоциации двуокиси углерода до величины 35÷40%, однако содержание атомарного кислорода всё ещё остаётся достаточно высоким. Поэтому в щелевых лазерах целесообразно использовать гетерогенные катализаторы.

На рис. 3 приведены расчётные зависимости  $\alpha$  и [O] в активной среде отпаянного щелевого CO<sub>2</sub> лазера с покрытыми слоем золота электродами от расстояния между ними. Расчёты показывают, что использование золотого покрытия обоих электродов позволяет снизить степень диссоциации CO<sub>2</sub> и относительное содержание атомарного кислорода до уровня 20% и 0.1÷0.15% соответственно.

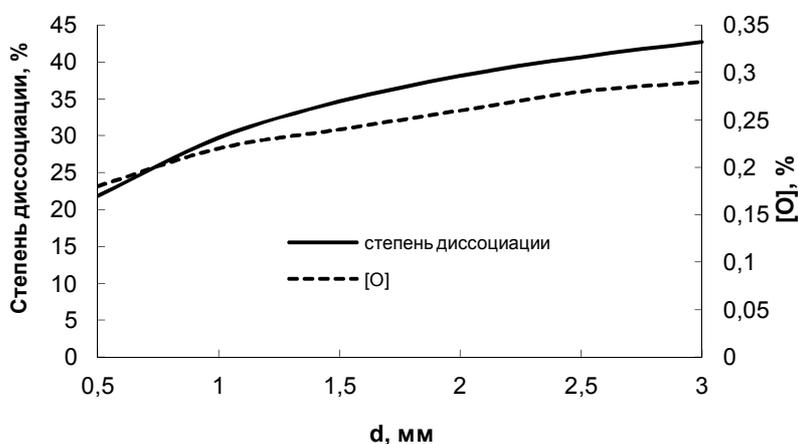


Рис. 2. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода от межэлектродного расстояния  $d$  в щелевых CO<sub>2</sub> лазерах с покрытыми диэлектрическим слоем металлическими электродами

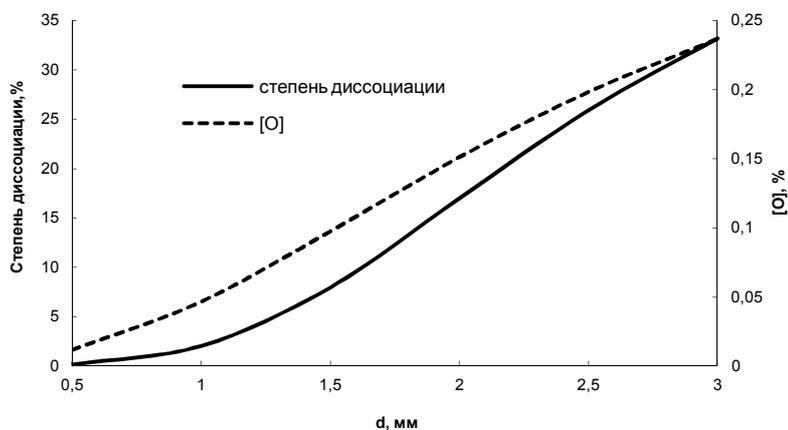


Рис. 3. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода в активной среде отпаянного щелевого CO<sub>2</sub> лазера с позолоченными электродами от расстояния  $d$  между ними

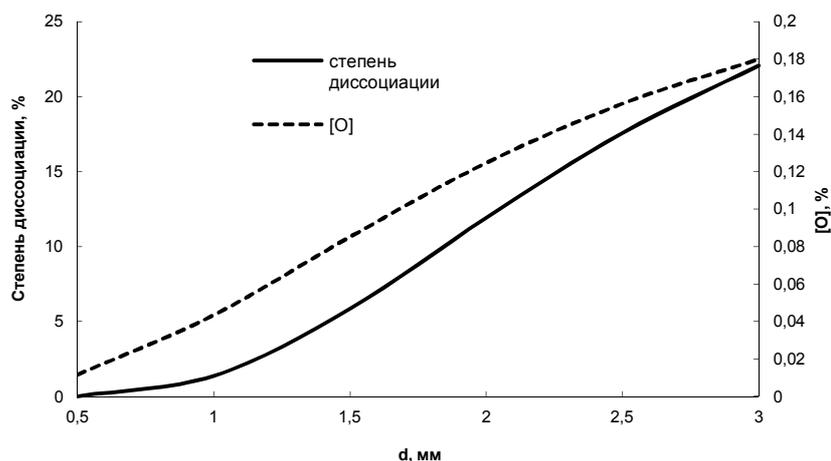


Рис. 4. Зависимость степени диссоциации двуокиси углерода и относительной концентрации атомарного кислорода в активной среде отпаянного щелевого  $\text{CO}_2$  лазера с позолоченными электродами от расстояния  $d$  между ними при замене  $\text{N}_2$  на  $\text{CO}$  в лазерной смеси

Поскольку колебательно-возбужденные молекулы  $\text{CO}$  наряду с  $\text{N}_2$  участвуют в заселении верхнего лазерного уровня ( $00^01$ ) молекулы  $\text{CO}_2$ , то в конструкциях щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с гетерогенным катализатором представляется интересным замена в исходной газовой смеси  $\text{N}_2$  на  $\text{CO}$ . Идея данного технического решения заключается в том, чтобы ещё до начала работы лазера на поверхности катализатора сформировался слой адсорбированных из газовой фазы молекул  $\text{CO}$ . Это позволит увеличить скорость регенерации  $\text{CO}_2$  не только на поверхности электродов, но и в объёме активной среды в результате протекания реакций вида:  $\text{CO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{M}$ .

На рис. 4 приведены результаты расчёта зависимостей  $\alpha$  и  $[\text{O}]$  в активной среде щелевого  $\text{CO}_2$  лазера с позолоченными электродами от расстояния между ними при замене  $\text{N}_2$  на  $\text{CO}$  в газовой смеси при наполнении лазера. Видно, что замена  $\text{N}_2$  на  $\text{CO}$  приводит к снижению  $\alpha$  и  $[\text{O}]$  примерно на 30%.

Таким образом, установлено, что уменьшение степени диссоциации двуокиси углерода и содержания атомарного кислорода в активной среде щелевых  $\text{CO}_2$  лазеров с поперечным возбуждением может быть достигнуто нанесением на металлические электроды диэлектрического ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) или каталитического ( $\text{Au}$ ) покрытий и заменой молекулярного азота на монооксид углерода в исходной газовой смеси лазеров с гетерогенными катализаторами.

### Библиографический список

1. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Optimization of the thermal regime in RF  $\text{CO}_2$  lasers with large-area planar electrodes. *Quantum Electronics*. 1999. Т. 29. № 4. С. 337-338.
2. Веснов И.Г. Стабилизация состава активной среды отпаянных лазеров на углекислом газе с поперечным высокочастотным возбуждением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань, 2001.
3. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуокиси углерода в отпаянных волноводных  $\text{CO}_2$ -лазерах с высокочастотным возбуждением. *Квантовая электроника*. 1999. Т. 27. № 1. С. 55-57.
4. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Dissociation of carbon dioxide in sealed-off  $\text{CO}_2$  waveguide lasers with radio-frequency excitation. *Quantum Electronics*. 2000. Т. 30. № 1. С. 15-19.
5. Cherezov V.M., Kyun V.V., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Sipaylo A.A., Stepanov V.A., Vesnov I.G.  $\text{CO}_2$  dissociation in sealed-off RF-excited  $\text{CO}_2$  waveguide lasers. В сборнике: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2000*. С. 100-110.
6. В.Я. Витteman, Б.И. Илюхин, И.В. Кочетов, В.Н. Очкин, П.Я. Петерс, Ю.Б. Удалов, М.Б. Хеэман-Илиева. Исследование и оптимизация волноводного  $\text{CO}_2$  лазера с ВЧ возбуждением. Препринт ФИАН № 38. – Москва, 1994.
7. Веснов И.Г. Кинетика диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных  $\text{CO}_2$ -лазеров с поперечным высокочастотным возбуждением. *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40. № 4. С. 310-313.

# ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КИНЕТИКЕ ДИССОЦИИ И РЕГЕНЕРАЦИИ ДВУОКСИ УГЛЕРОДА В АКТИВНОЙ СРЕДЕ ОТПАЯННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРОВ С ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

И.Г. Веснов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, vsnvi@rambler.ru*

*Аннотация.* Установлены важнейшие объёмные и поверхностные физико-химические процессы, влияющие на диссоциацию и регенерацию двуокиси углерода в активной среде отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазеров с ВЧ возбуждением.

*Ключевые слова.* Активная среда, скорость протекания химической реакции, диссоциация двуокиси углерода, регенерация двуокиси углерода, отпаянный волноводный CO<sub>2</sub> лазер с ВЧ возбуждением.

## MAIN PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN KINETICS OF CARBON DIOXIDE DISSOCIATION AND REGENERATION IN RF-EXCITED SEALED-OFF CO<sub>2</sub> WAVEGUIDE LASERS

I.G. Vesnov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, vsnvi@rambler.ru*

*Abstract.* Main volume and surface physico-chemical processes affecting on kinetics of carbon dioxide dissociation and regeneration in RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide lasers have been found.

*Keywords.* Active medium, the rate of chemical reaction, dissociation of carbon dioxide, regeneration of carbon dioxide, RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide laser.

В низкотемпературной плазме активной среды CO<sub>2</sub> лазеров, а также на стенках разрядного канала протекает огромное число различных физико-химических процессов. Так как учесть вклад всех этих процессов в формирование состава активной среды работающего CO<sub>2</sub> лазера принципиально невозможно, то значительная их часть должна быть отброшена из рассмотрения. Процессы, которыми можно пренебречь, определяются не только условиями поддержания разряда и начальным химическим составом активной среды, но и существом вопроса, на который мы хотим получить ответ, проанализировав протекание различных плазмохимических реакций.

Отбор физико-химических процессов, протекание которых вносит существенный вклад в кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазеров с ВЧ возбуждением ( $p = 45 \div 120$  Торр, CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He:Xe = 1:1:3:0.25, 1:1:6:0.3, 6:3.75:25:2,  $W_{rf} = 75 \div 600$  Вт,  $\nu_{rf} = 81.36$  МГц), удобно провести в несколько этапов. На первом этапе пренебрежём:

1) ионно-молекулярными реакциями, так как концентрация заряженных частиц много меньше концентрации нейтральных компонент плазмы;

2) гибелью CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в реакции диссоциативного прилипания, так как константы скорости реакций диссоциации электронным ударом данных молекул много больше таковых для реакций диссоциативного прилипания [1÷5];

3) реакцией CO<sub>2</sub> + O → CO + O<sub>2</sub>, так как скорость её протекания составляет менее 3% от скорости диссоциации электронным ударом [1÷5].

На втором этапе отбор реакций, протекающих в объёме активной среды, проведём на основе сравнения скоростей их протекания. В отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазерах с ВЧ возбуждением типичные значения относительных концентраций некоторых из нейтральных компонент таковы [5]: [CO<sub>2</sub>]/ $n \approx 10$  %, [CO]/ $n \approx 10$  %, [O<sub>2</sub>]/ $n \approx 4$  %, [O]/ $n \approx 0.4$ %, [N<sub>2</sub>]/ $n \approx 11$ %, [NO]/ $n \approx 0.02$  %, [He]/ $n \approx 60$  %, где  $n$  – общая концентрация частиц.

Рассмотрим реакции вида O + CO + M → CO<sub>2</sub> + M. Константы скоростей [5] этих реакций и соответствующие им приведённые скорости  $k[O][CO][M]/n^3$  для различных молекул M приведены в таблице 1.

Таблица 1

M	$k, \text{см}^6\text{с}^{-1}$	$k[\text{O}][\text{CO}][\text{M}]/n^3, \text{см}^6\text{с}^{-1}$
N <sub>2</sub>	$8.13 \cdot 10^{-35}$	$\approx 3 \cdot 10^{-39}$
O <sub>2</sub>	$4.88 \cdot 10^{-34}$	$\approx 8 \cdot 10^{-39}$
CO	$1.22 \cdot 10^{-34}$	$\approx 5 \cdot 10^{-39}$
CO <sub>2</sub>	$2.91 \cdot 10^{-34}$	$\approx 3 \cdot 10^{-39}$

Ввиду незначительного различия в скорости протекания реакций, приведенных в таблице 1, все они должны быть учтены в кинетике регенерации CO<sub>2</sub>.

Константы скоростей [5] реакций вида  $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$  и соответствующие им приведённые скорости  $k[\text{O}]^2[\text{M}]/n^3$  для различных молекул M приведены в таблице 2.

Таблица 2

M	$k, \text{см}^6\text{с}^{-1}$	$k[\text{O}]^2[\text{M}]/n^3, \text{см}^6\text{с}^{-1}$
CO <sub>2</sub>	$5.6 \cdot 10^{-32}$	$\approx 1 \cdot 10^{-37}$
He	$1.29 \cdot 10^{-36}$	$\approx 1 \cdot 10^{-41}$
N <sub>2</sub>	$6.62 \cdot 10^{-34}$	$\approx 1 \cdot 10^{-39}$
O	$3 \cdot 10^{-33}$	$\approx 2 \cdot 10^{-40}$
CO	$1.16 \cdot 10^{-34}$	$\approx 2 \cdot 10^{-40}$
O <sub>2</sub>	$3 \cdot 10^{-33}$	$\approx 2 \cdot 10^{-39}$

Легко видеть, что из всех рассмотренных реакций вида  $\text{O} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O}_2 + \text{M}$  наибольшую скорость протекания имеет реакция  $\text{O} + \text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2$ , поэтому именно она вносит основной вклад в образование O<sub>2</sub> в активном объёме лазера.

Рассмотрим теперь реакции, которые приводят к уменьшению концентрации O и O<sub>2</sub> вследствие образования озона (O<sub>3</sub>). Константы скоростей [5] реакций вида  $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$  и соответствующие им приведённые скорости  $k[\text{O}][\text{O}_2][\text{M}]/n^3$  для различных молекул M приведены в таблице 3.

Таблица 3

M	$k, \text{см}^6\text{с}^{-1}$	$k[\text{O}][\text{O}_2][\text{M}]/n^3, \text{см}^6\text{с}^{-1}$
He	$3.98 \cdot 10^{-34}$	$\approx 6 \cdot 10^{-39}$
N <sub>2</sub>	$2.95 \cdot 10^{-34}$	$\approx 5 \cdot 10^{-39}$
O <sub>2</sub>	$2.76 \cdot 10^{-34}$	$\approx 4 \cdot 10^{-39}$
CO	$4.33 \cdot 10^{-34}$	$\approx 7 \cdot 10^{-40}$

Видно, что скорость гибели атомарного кислорода в реакциях вида  $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$  существенно меньше таковой в реакции  $\text{O} + \text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2$ . Поэтому можно считать, что реакции, приводящие к образованию озона, вносят незначительный вклад в кинетику диссоциации и регенерации CO<sub>2</sub>.

Оценим скорость убыли атомарного кислорода в реакциях вида  $\text{O} + \text{NO} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{M}$ . Константы скоростей [5] этих реакций и соответствующие им приведённые скорости  $k[\text{O}][\text{NO}][\text{M}]/n^3$  для различных молекул M приведены в таблице 4.

Таблица 4

M	$k, \text{см}^6\text{с}^{-1}$	$k[\text{O}][\text{NO}][\text{M}]/n^3, \text{см}^6\text{с}^{-1}$
He	$6.7 \cdot 10^{-32}$	$\approx 3 \cdot 10^{-38}$
N <sub>2</sub>	$5.76 \cdot 10^{-32}$	$\approx 5 \cdot 10^{-39}$
O <sub>2</sub>	$5.76 \cdot 10^{-32}$	$\approx 2 \cdot 10^{-39}$
NO	$5.76 \cdot 10^{-32}$	$\approx 1 \cdot 10^{-43}$

Поскольку скорость гибели атомарного кислорода в реакциях из таблицы 4 существенно меньше, чем в реакции  $\text{O} + \text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{O}_2 + \text{CO}_2$ , то реакции вида  $\text{O} + \text{NO} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{M}$  также не оказывают существенного влияния на кинетику разложения и регенерации CO<sub>2</sub>.

В работе [6] (1971 г.) отмечается, что в активной среде CO<sub>2</sub> лазеров должна эффективно протекать реакция  $\text{N}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{N}_2$ , которая, с одной стороны, приводит к

постоянству концентрации  $N_2$  в разряде, а с другой стороны, приводит к дополнительному окислению  $CO$  до  $CO_2$ . Однако в работе [7] (1996 г.) показано, что конечные продукты этой реакции другие:

$N_2O + CO \rightarrow CO + O + N_2$ . Поэтому наличие в активной среде  $N_2O$  не оказывает заметного влияния на окисление  $CO$  до  $CO_2$ . Кроме того, учитывая, что константа скорости реакции  $O + N_2 + M \rightarrow N_2O + M$  равна  $1.4 \cdot 10^{-45} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$  [8], то приведённая скорость убыли атомарного кислорода в результате протекания последней реакции порядка  $10^{-49} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ , что на 12 порядков меньше скорости убыли атомарного кислорода в реакции  $O + O + CO_2 \rightarrow O_2 + CO_2$ . Следовательно, процесс образования  $N_2O$  также не вносит заметного вклада в кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных волноводных  $CO_2$  лазеров с ВЧ возбуждением.

Помимо процессов, рассмотренных выше и протекающих в активном объёме лазера, важнейшую роль в регенерации  $CO_2$  играют реакции гетерогенной рекомбинации, протекающие на стенках разрядного канала. В [4, 5] установлено, что реакция  $CO + O \xrightarrow{\text{wall}} CO_2$  эффективно протекает на диэлектрических поверхностях и на поверхности гетерогенного катализатора (Au), адсорбирующего  $CO$  из газовой фазы. Реакция  $O + O \xrightarrow{\text{wall}} O_2$  наиболее эффективно протекает на поверхности металлов, причём протекает столь быстро, что концентрация атомарного кислорода вблизи металлической поверхности практически равна нулю.

Таким образом, основными физико-химическими процессами в кинетике диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных волноводных  $CO_2$  лазеров с ВЧ возбуждением являются следующие:

$CO_2 + e \rightarrow CO + O + e$  (диссоциация  $CO_2$  электронным ударом в активном объёме лазера);

$O_2 + e \rightarrow O + O + e$  (диссоциация  $O_2$  электронным ударом в активном объёме лазера);

$CO + O \xrightarrow{\text{wall}} CO_2$  (гетерогенная рекомбинация  $CO$  и  $O$  на стенке разрядного канала);

$O + O \xrightarrow{\text{wall}} O_2$  (гетерогенная рекомбинация  $O$  на стенке разрядного канала);

$O + O + CO_2 \rightarrow CO_2 + O_2$  (рекомбинация  $O$  в активном объёме лазера);

$O + CO + CO \rightarrow CO_2 + CO$  (рекомбинация  $CO_2$  в активном объёме лазера);

$O + CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O_2$  (рекомбинация  $CO_2$  в активном объёме лазера);

$O + CO + N_2 \rightarrow CO_2 + N_2$  (рекомбинация  $CO_2$  в активном объёме лазера);

$O + CO + CO_2 \rightarrow CO_2 + CO_2$  (рекомбинация  $CO_2$  в активном объёме лазера).

### Библиографический список

1. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуокиси углерода в отпаянных волноводных  $CO_2$ -лазерах с высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1. С. 55-57.
2. Cherezov V.M., Kyun V.V., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Sipaylo A.A., Stepanov V.A., Vesnov I.G.  $CO_2$  dissociation in sealed-off RF-excited  $CO_2$  waveguide lasers. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2000. С. 100-110.
3. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Dissociation of carbon dioxide in sealed-off  $CO_2$  waveguide lasers with radio-frequency excitation. Quantum Electronics. 2000. Т. 30. № 1. С. 15-19.
4. Веснов И.Г. Кинетика диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных  $CO_2$ -лазеров с поперечным высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 310-313.
5. Веснов И.Г. Стабилизация состава активной среды отпаянных лазеров на углекислом газе с поперечным высокочастотным возбуждением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань, 2001.
6. А. В. Елецкий, Б. М. Смирнов. Газовые лазеры. – М.: Атомиздат, 1971. – 152 с.
7. M. Rohrig, E.L. Petersen, D.F. Davidson, and R.K. Hanson. The pressure dependence of the thermal decomposition of  $N_2O$ . International Journal of Chemical Kinetics. 1996. V. 28. P. 599-608.
8. К. Смит, Р. Томсон. Численное моделирование газовых лазеров. – М.: Мир, 1981. – 516 с.

## РЕЛАКСАЦИЯ СТЕПЕНИ ДИССОЦИАЦИИ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ НАКАЧКИ В ОТПАЯННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРАХ С ВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

И.Г. Веснов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, vsnvi@rambler.ru*

*Аннотация.* Проведён расчёт изменения с течением времени концентраций CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> и O в активной среде отпаянного волноводного CO<sub>2</sub> лазера с ВЧ возбуждением после отключения накачки. Установлено, что в состоянии равновесия относительное уменьшение степени диссоциации двуокиси углерода существенно меньше погрешности её измерения.

*Ключевые слова.* Отпаянный волноводный CO<sub>2</sub> лазер с ВЧ возбуждением, степень диссоциации двуокиси углерода, релаксация.

## RELAXATION OF THE DEGREE OF CARBON DIOXIDE DISSOCIATION AFTER SWITCHING OFF THE PUMPING IN RF-EXCITED SEALED-OFF CO<sub>2</sub> WAVEGUIDE LASERS

I.G. Vesnov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, vsnvi@rambler.ru*

*Abstract.* Change in concentrations of CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> and O with respect to time in active medium of the RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide laser after switching off the pumping has been calculated. It was found that fractional decrease of the degree of carbon dioxide dissociation is significantly less its measuring inaccuracy at equilibrium.

*Keywords.* RF-excited sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide laser, degree of carbon dioxide dissociation, relaxation.

Трудоёмкость прямых экспериментальных исследований влияния на степень диссоциации  $\alpha$  двуокиси углерода условий поддержания разряда и конструктивных особенностей разрядного канала отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазеров с ВЧ возбуждением обуславливает необходимость создания адекватной теоретической модели, описывающей кинетику диссоциации и регенерации двуокиси углерода. Адекватность теоретической модели определяется степенью согласия результатов расчёта, выполненного на её основе, с экспериментальными данными. Основная проблема, возникающая при сопоставлении экспериментально измеренных и теоретически вычисленных значений  $\alpha$  заключается в том, что расчёт проводится в активной среде работающего лазера, а измерения – после окончания его работы. Обосновать правомерность сравнения величин  $\alpha$ , характеризующих разложение двуокиси углерода в физически различных условиях, можно лишь установлением того факта, что релаксация химического состава активной среды после отключения накачки приводит к изменению  $\alpha$ , не превышающему погрешность её измерений. Другими словами, необходимо провести расчёт переходного процесса изменения содержания CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> и O в активной среде после отключения накачки.

В [1÷6] разработана теоретическая модель, описывающая кинетику диссоциации и регенерации CO<sub>2</sub> в активной среде отпаянных волноводных CO<sub>2</sub> лазеров с ВЧ возбуждением. Показано, что расчёт содержания CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> и O в активной среде требует решения самосогласованной системы следующих уравнений: 1) кинетического уравнения Больцмана для электронов; 2) уравнения теплопроводности для газовой смеси; 3) уравнений непрерывности для CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>; 4) уравнений баланса по углероду и кислороду. Так как после отключения накачки реакции диссоциации молекул CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> электронным ударом в активном объёме лазера больше не происходят, то система уравнений 3 и 4 приобретает вид [6]:

$$\frac{d[CO_2]}{dt} = \frac{2}{d^2} D_0 [O] \beta + \left( \frac{S}{V} \right) k_3 [O]_w [CO]_w \gamma + k_5 [O][CO]^2 + k_6 [O][CO][O_2] + k_7 [O][CO][N_2] + k_8 [O][CO][CO_2]$$

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \frac{2}{d^2} D_0 [O] \delta + k_4 [O]^2 [CO_2], \quad \frac{d[CO]}{dt} = -\frac{d[CO_2]}{dt}, \quad \frac{d[O]}{dt} = -\frac{d[CO_2]}{dt} - 2 \frac{d[O_2]}{dt},$$

где  $[CO_2]$ ,  $[CO]$ ,  $[O_2]$  и  $[O]$  – концентрации  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  и  $O$  соответственно, нижним индексом  $w$  обозначены пристеночные концентрации,  $D_0$  – коэффициент диффузии атомарного кислорода в газовой смеси, коэффициенты  $k_4 \div k_8$  – константы скоростей протекания реакций  $O + O + CO_2 \rightarrow CO_2 + O_2$ ,  $O + CO + CO \rightarrow CO_2 + CO$ ,  $O + CO + O_2 \rightarrow CO_2 + O_2$ ,  $O + CO + N_2 \rightarrow CO_2 + N_2$ ,  $O + CO + CO_2 \rightarrow CO_2 + CO_2$  соответственно, значение  $k_3$  для алюмооксидной керамики и  $Al_2O_3$  найдено в [5],  $d$  – межэлектродное расстояние,  $S$  – площадь поверхности разрядного канала,  $V$  – объём разрядного канала, коэффициент  $\beta$  равен 1 или 0 в зависимости от наличия или отсутствия соответственно покрытия слоем катализатора металлических электродов, коэффициент  $\gamma$  равен либо 1 для разрядного канала, полностью ограниченного диэлектрическими стенками, либо  $1 - (2/d) \cdot (S/V)^{-1}$  для металлокерамического разрядного канала, коэффициент  $\delta$  равен 0 или 1 в зависимости от наличия или отсутствия соответственно технологического (диэлектрического или каталитического) покрытия электродов. Начальные условия для данной системы дифференциальных уравнений – концентрации  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$  и  $O$  непосредственно перед выключением накачки – определим из решения самосогласованной системы уравнений [5, 6]:

$$\begin{aligned} \frac{2}{d^2} D_0 [O] \beta + \left( \frac{S}{V} \right) k_3 [O]_w [CO]_w \gamma + k_5 [O] [CO]^2 + k_6 [O] [CO] [O_2] + \\ + k_7 [O] [CO] [N_2] + k_8 [O] [CO] [CO_2] - k_1 n_e [CO_2] = 0, \\ \frac{2}{d^2} D_0 [O] \delta + k_4 [O]^2 [CO_2] - k_2 n_e [O_2] = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [CO_2] + [CO] = [CO_2]^*, \\ \frac{[CO_2] + [CO]}{2[CO_2] + [CO] + 2[O_2] + [O]} = \frac{1}{2}, \\ \frac{\partial f_0}{\partial t} = \frac{e^2 E^2(t)}{3m^2} \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{v^2}{v_m} \frac{\partial f_0}{\partial v} \right) + St f_0, \end{aligned}$$

$$\text{div}(\lambda \text{ grad } T) + Q = 0,$$

где  $[CO_2]^*$  – исходная концентрация молекул углекислого газа,  $k_1$ ,  $k_2$  – константы скорости протекания реакций  $CO_2 + e \rightarrow CO + O + e$  и  $O_2 + e \rightarrow O + O + e$  соответственно,  $n_e$  – концентрация электронов,  $f_0$  – симметричная составляющая функции распределения электронов по энергиям,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $E(t) = E_0 \sin(\omega t)$  – напряжённость электрического поля,  $v$  – модуль скорости электрона,  $v_m$  – частота релаксации импульса,  $St f_0$  – интеграл столкновений,  $T$  – температура газовой смеси,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газовой смеси,  $Q$  – объёмная плотность мощности тепловыделения.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчёта зависимостей  $\alpha$  и  $[O]$  соответственно от времени, прошедшего после выключения накачки, для волноводного  $CO_2$  лазера с разрядным каналом, полностью ограниченным диэлектрическими стенками и размером  $2.2\text{мм} \times 2.2\text{мм} \times 580\text{мм}$ ,  $p = 100$  Торр,  $CO_2:N_2:He:Xe = 1:1:3:0.25$ ,  $W_{rf} = 200$  Вт,  $\nu_{rf} = 81.36$  МГц. Видно, что после выключения накачки время установления равновесного значения степени диссоциации двуокиси углерода определяется временем уменьшения до нуля содержания атомарного кислорода и составляет примерно 20 мс. При этом относительное уменьшение  $\alpha$  не превышает 0.5%, что существенно меньше относительной погрешности измерений. Последний вывод обосновывает правомерность сравнения рассчитанных и измеренных величин степени диссоциации двуокиси углерода.

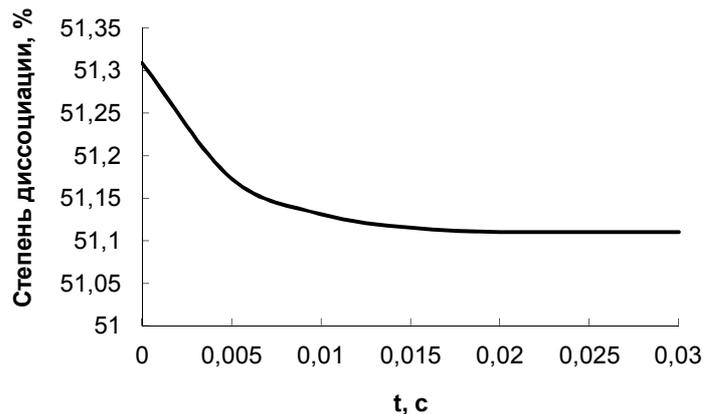


Рис. 1. Уменьшение степени диссоциации CO<sub>2</sub> после выключения накачки

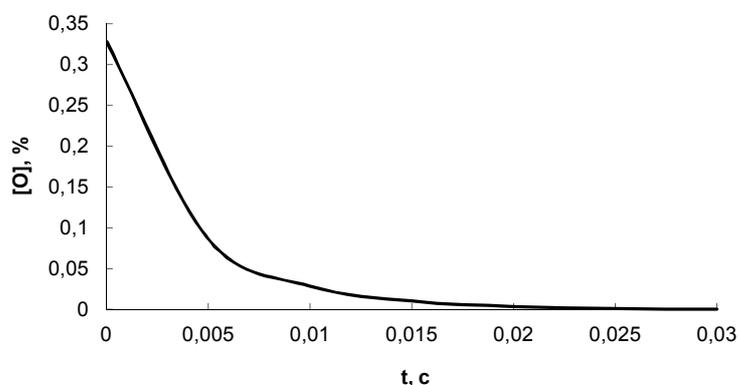


Рис. 2. Уменьшение содержания атомарного кислорода после выключения накачки

Таким образом, расчёт изменения с течением времени концентраций CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub> и O в активной среде отпаянного волноводного CO<sub>2</sub> лазера с ВЧ возбуждением после отключения накачки показал, что в состоянии равновесия относительное уменьшение степени диссоциации двуокиси углерода существенно меньше погрешности её измерения.

#### Библиографический список

1. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. Диссоциация двуокиси углерода в отпаянных волноводных CO<sub>2</sub>-лазерах с высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 1. С. 55-57.
2. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Optimization of the thermal regime in RF CO<sub>2</sub> lasers with large-area planar electrodes. Quantum Electronics. 1999. Т. 29. № 4. С. 337-338.
3. Cherezov V.M., Kyun V.V., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Sipaylo A.A., Stepanov V.A., Vesnov I.G. CO<sub>2</sub> dissociation in sealed-off RF-excited CO<sub>2</sub> waveguide lasers. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2000. С. 100-110.
4. Vesnov I.G., Mol'kov S.I., Stepanov V.A., Shishkanov E.F. Dissociation of carbon dioxide in sealed-off CO<sub>2</sub> waveguide lasers with radio-frequency excitation. Quantum Electronics. 2000. Т. 30. № 1. С. 15-19.
5. Веснов И.Г. Кинетика диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных CO<sub>2</sub>-лазеров с поперечным высокочастотным возбуждением. Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 4. С. 310-313.
6. Веснов И.Г. Стабилизация состава активной среды отпаянных лазеров на углекислом газе с поперечным высокочастотным возбуждением. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Рязань, 2001.

## СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»

УДК 621.38/ 53.08/57.088.5; ГРТНИ 29.19.22/59.35.33/34.05.17

### ПРИМЕНЕНИЕ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИООБЪЕКТОВ

Н.М. Толкач\*, Н.В. Вишняков\*\*

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, \*nikketos@gmail.com, \*\*rcpm-rgrtu@yandex.ru*

*Аннотация.* Рассматривается методика подготовки и настройки атомно-силового микроскопа к исследованию биологических объектов и органических материалов. Продемонстрировано применение методики и атомно-силового микроскопа для изучения формы ДНК плазмиды pUC19 и волокнистого бактериофага M13, клеток эритроцитов и бактерий стафилококка.

*Ключевые слова.* Атомно-силовая микроскопия, сканирование, зонд, пробподготовка, биообъект бактерии, вирусы, клетки, ДНК, эритроцит, стафилококк.

### APPLICATION OF AN ATOMIC-FORCE MICROSCOPY FOR RESEARCH OF BIOLOGICAL OBJECTS

N.M. Tolkach\*, N.V. Vishnikov\*\*

*Ryazan state radio engineering university,  
Russia, Ryazan, \*nikketos@gmail.com, \*\*rcpm-rgrtu@yandex.ru*

*Abstract.* In the article deals a method of preparation and adjustment of an atomic force microscope to study of biological and organic materials. Applications of a method and atomic force microscope to study forms of circular plasmid DNA pUC19 and filamentous bacteriophage M13, cells of erythrocyte and cells of bacteria staphylococcus are shown.

*Keywords.* Atomic-force microscopy, scanning, tip, sample preparation, biological object, bacteria, virus, cells, DNA, erythrocyte, staphylococcus.

Применение атомно-силовой микроскопии (АСМ) открывает достаточно широкий круг возможностей для изучения биологических объектов и органических материалов. В сравнении с традиционными оптическими методами исследования АСМ позволяет добиться нанометрового разрешения. В последние два десятилетия АСМ был достигнут значительный прогресс и данный метод приобретает все большую популярность.

Большой интерес представляет собой изучение с помощью АСМ живых биологических объектов – бактерий, вирусов, клеток. Уделяется значительное внимание возможности применения биологических структур для создания новых материалов, биодатчиков и биосовместимых электронных устройств. Именно поэтому важной задачей современной науки является исследование морфологии биологических объектов, так как именно размеры и форма во многом определяют принцип их функционирования [1, 2]. Проведение АСМ исследований возможно как на воздухе, так и в жидкой среде, не требует специализированной пробподготовки. Однако, несмотря на простоту подготовки биологических образцов, перед измерением необходимо соблюдение соответствующей методики при установке и настройке АСМ оборудования.

Для проведения исследований биологических объектов была использована установка на базе АСМ микроскопа “Ntegra Aura”. Процесс подготовки АСМ микроскопа проводился в следующей последовательности.

**Во-первых**, для измерения необходимо определиться со средой, в которой осуществляется сканирование. Различают два способа сканирования – на воздухе или в жидкости. Реализация сканирования в воздушной среде является существенно менее трудоемкой по сравнению с жидкостной и обеспечивает следующие преимущества:

- высокое разрешение;
- позволяет наблюдать целостность и характер повреждений мембраны клеток.

Измерения в жидкости позволяют сохранить биоматериал в неизменной, жизнеспособной форме, предотвратить его высушивание.

**Во-вторых**, необходимо выбрать подходящий режим сканирования по контактному взаимодействию зонда АСМ микроскопа и исследуемого объекта. В АСМ различают 3

основных вида контактного взаимодействия – бесконтактный, контактный, полуконтактный. Почти все биообъекты обладают малой механической жесткостью, поэтому при исследовании необходимо свести до минимума возможность контакта зонда с их поверхностью. Наиболее оптимальным является применение бесконтактного режима, но связи со сложностью его реализации можно использовать полуконтактный режим.

**В-третьих**, исследуемый биоматериал необходимо иммобилизовать на ровной поверхности подложки, устанавливаемой в АСМ микроскоп. Как правило, для начала необходимо определиться с материалом подложки. Варьировать здесь можно в широких пределах в зависимости от поставленных задач. Традиционно в качестве субстрата используются атомно-гладкие подложки из слюды, графита и других слоистых материалов, а также различные стёкла, полимерные материалы и металлические поверхности [3]. Выбор подложки определяется природой иммобилизуемого объекта. Основные требования, предъявляемые к подложкам:

- поверхность должна быть ровной;
- исследуемые объекты должны хорошо адсорбироваться;
- подложка не должна оказывать влияния на свойства поверхности.

Способ функционализации поверхности подбирается исходя из вида исследуемых биообъектов. Для ДНК-исследований чаще всего применяется обработка ионами двухвалентного металла ( $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ), полилизинном, полиаргинином, силанизирование поверхности с использованием 3-аминопропилтриэтоксисилана. Для молекул белков и нуклеиновых кислот проводится ковалентная иммобилизация; при иммобилизации крупных объектов, обладающих множеством точек связывания с поверхностью, используют физическую сорбцию.

Для корректной характеристики взаимодействия зонд - образец методом АСМ следует минимизировать влияние иммобилизации на реакционные свойства молекул, что означает выполнение следующих требований:

- сохранение нативной структуры и функциональности взаимодействующих реагентов;
- унифицированное присоединение взаимодействующих реагентов к поверхностям (подложка, кантилевер).

Для исследований структур ДНК целесообразно выбрать слюдяные подложки, модифицированные ионами  $Ni^{2+}$ .

Основные преимущества таких подложек:

- слюда используется при работе с любыми незаряженными или положительно заряженными образцами, допускает несложную дополнительную обработку для работы с отрицательно заряженными объектами, например с ДНК;
- является идеальной основой для приготовления подложек из напыленного металла, например золота, что является одним из направлений дальнейшего исследования.

Для исследования клеток можно использовать стеклянные подложки со шлифованными краями. Стекло подходит для исследований клеток, так как не меняет их форму, не оказывает химического воздействия и является недорогим.

**В-четвертых**, биообъекты необходимо предварительно зафиксировать. Фиксация способствует закреплению материала на стекле, даёт возможность изучать материал. Наиболее распространенные фиксаторы: глутаровый альдегид, метиловый спирт, жидкость Никифорова (смесь равных частей спирта и эфира), пары фенола (по Сюткину, для фиксации мазков), раствор формалина, водные растворы катионов двухвалентной меди, 72% раствор диметилсульфоксид (для нуклеиновых кислот).

**В-пятых**, существенным является тип кантилевера (балка с зондом) АСМ микроскопа при взаимодействии с биообъектами. В современной зондовой микроскопии выделяют следующие параметры кантилеверов:

- жесткость;
- резонансные частоты;
- добротность;

- радиус кривизны зонда;
- форма иглы;
- тип покрытия на поверхности иглы кантилевера (магниточувствительные слои, проводящие слои, диэлектрические покрытия, твердые покрытия).

При выборе зондов для исследований выбирают между остротой зонда, присущей зондам из Si, и низкими константами жесткости балок, свойственными кантилеверам из SiN. При работе с мягкими образцами в жидкости (биологические материалы в буфере) использование относительно жестких кремниевых кантилеверов оказывается неприемлемым, и даже при работе в резонансном режиме используют кантилеверы из SiN. Также кантилеверы из этого материала позволяют измерить упругость объекта без его повреждения.

Для АСМ спектроскопии при измерении упругости лучше использовать зонды с «мягкой балкой», константа жесткости для них составляет  $10^{-2} - 10^{-1}$  Н/м, что позволяет исследовать мягкие биологические объекты. Однако основным недостатком такого подхода является малый радиус острия зонда АСМ микроскопа, который может легко проткнуть и нарушить целостность биологической мембраны. Таким образом, для исследований в режиме прерывистого контакта применяются кремниевые кантилеверы с резонансной частотой в диапазоне 350-380 кГц.

Наиболее подходящими по заданным свойствам являются кантилеверы серии NSG фирмы «NT-MNT» [4].

Также для мягких образцов можно использовать кантилеверы с «шариком». Они представляют собой специальные зонды со сферическими частицами, калиброванными размером и закрепленными на самом конце наконечника иглы [5]. У диаметра частиц размеры 250 нм, 650 нм и 900 нм, что дает возможность сохранить разрешение АСМ на уровне 5 нм.

Придерживаясь такой последовательности методики, был проведен ряд экспериментов по изучению биообъектов.

Для первого эксперимента был выбран образец с молекулами ДНК круговой плазмиды pUC19 и нитевидного бактериофага M13. Биообразец с молекулами ДНК (рисунок 1) был размещен на поверхности свежего скола слюды, модифицированной и обработанной катионами металлов. Фиксация молекул ДНК производилась при помощи 2.5% раствора глутарового альдегида. Сканирование проводилось в полуконтактном режиме с использованием кантилевера марки NSG10 с жесткостью 0.4 Н/м.

Плазмида pUC19 – одна из наиболее широко используемых векторных молекул и имеет 2686 пар двойных спиралей ДНК. Ожидаемая длина контура молекулы плазмиды составляет 800 нм. Бактериофаг M13 широко используется в нанотехнологии.

Ожидаемая длина контура бактериофага составляет 900 нм [6]. Ожидаемые размеры молекул ДНК подтверждаются результатами исследований, проведенных на АСМ микроскопе, и продемонстрированы на рисунке 1.

Второй эксперимент проводился с использованием суспензии клеток крови. На стеклянной подложке размещалась капля кровяного раствора. Образец высушивался, и

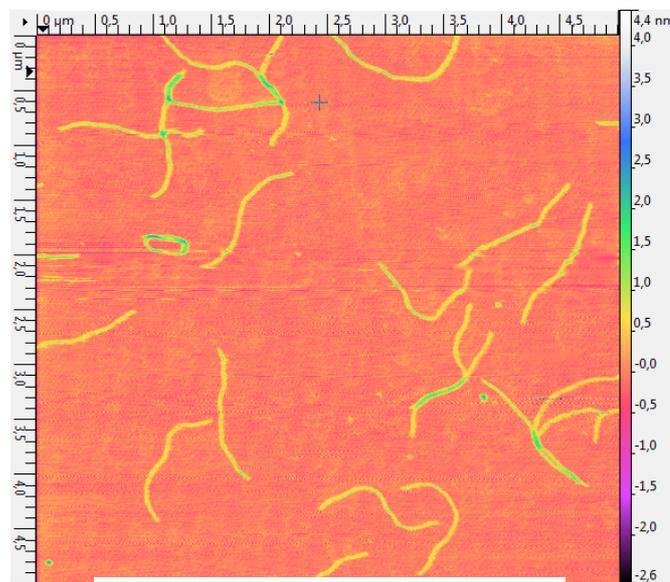


Рис. 1 – АСМ изображение с молекулами ДНК образца

проводилось АСМ сканирование в полуконтактном режиме с использованием зонда DCP20. Результаты сканирования представлены на рисунке 2.

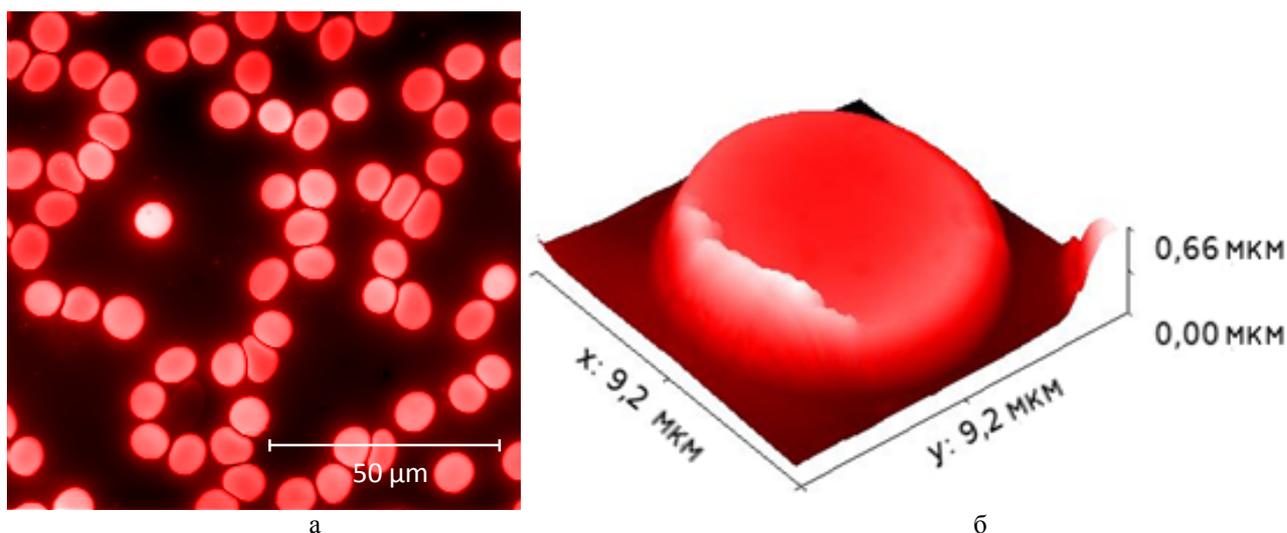


Рис. 2 –На рисунке (а) показано изображение клеток эритроцитов.  
На рисунке (б) показано изображение одиночного эритроцита

Для третьего эксперимента был использован образец с бактериями золотистого стафилококка. Бактерии были нанесены на стекло тонким равномерным слоем. Пробподготовка не проводилась. АСМ сканирование выполнялось в полуконтактном режиме с использованием зонда DCP20. Результаты сканирования представлены на рисунке 3.

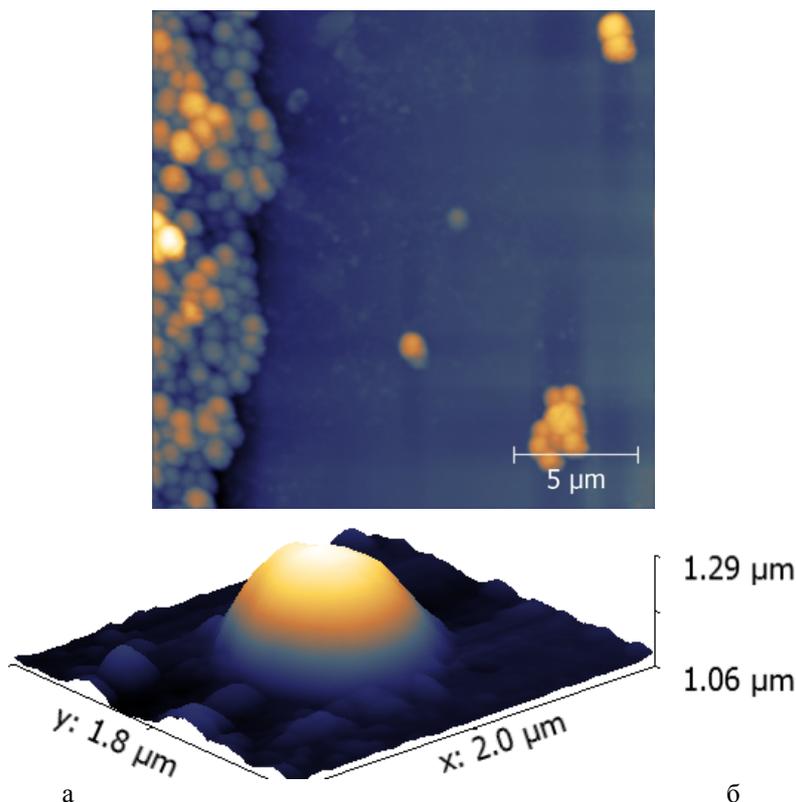


Рис. 3 –На рисунке (а) показано изображение бактерий золотистого стафилококка.  
На рисунке (б) показано изображение одиночной бактерии кокки

Таким образом, разработанная методика подготовки и настройки АСМ микроскопа показала высокую эффективность для задач изучения биообъектов. Применение методики универсально для различных биообъектов, клеток, бактерий, вирусов и молекул ДНК, позволяет выбрать оптимальный, наименее токсичный и безопасный для человека способ

пробоподготовки, снизить трудоемкость, обеспечить высокое разрешение сканированных АСМ изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ на оборудовании Регионального центра зондовой микроскопии РЦЗМкп РГРТУ.

### Библиографический список

1. Поляков В.В., Рубашкина М.В., Смирнов В.А. Исследование параметров биологических объектов методом атомно-силовой микроскопии //Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4 – С. 1-7.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2005. 144 с.
3. Maluchenko N.V., Agapov I.I., Tonevitsky A.G. et al. Detection of immune complexes using atomic force microscopy. Biofizika, 2004. – V. 49. – № 6. – P. 1008–1014.
4. Noncontact/Semiconduct probes. [Электронный ресурс]  
URL: <http://ntmdt-tips.com/products/group/non> (дата обращения 10.02.2016).
5. Colloidal probes CSG30 series. - [Электронный ресурс]  
URL: <http://www.ntmdt-tips.com/products/view/cpcsg30> (дата обращения 10.02.2016).
6. The sample BS01 contains a circular plasmid DNA pUC19 and a filamentous bacteriophage M13. - [Электронный ресурс]  
URL: <http://www.ntmdt-tips.com/products/view/bs01> (дата обращения 10.02.2016)

УДК 621.382.3 ГРНТИ 47.33.29

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВОЛЬТ-ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

**А.Р. Семенов, Т.А.Холомина**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, sem-a-sem@mail.ru*

*Аннотация.* Проведены анализ и сопоставление формы опубликованных разными авторами экспериментальных вольт-шумовых характеристик полупроводниковых барьерных структур, а также аппроксимация кривых суммой двух экспоненциальных функций. Сделан вывод о возможности прогнозировать надежность и пороговый уровень параметров полупроводниковых приборов по форме вольт-шумовых характеристик.

*Ключевые слова.* Низкочастотный шум, барьерная структура, вольт-шумовая характеристика, аппроксимация.

### SEMICONDUCTOR DEVICES RELIABILITY PREDICTION ON VOLT-NOISE CHARACTERISTIC PARAMETERS

**A.R. Semenov, Khololina T.A.**

*Ryazan state radio engineering university,  
Russia, Ryazan, sem-a-sem@mail.ru*

*Abstract.* The analysis and comparison of published authors experimental different forms volt-noise characteristics of semiconductor barrier structures, and curve fitting the sum of two exponential functions. The conclusion about the possibility to predict the reliability and threshold parameters of semiconductor devices in the form volt-noise characteristics.

*Keywords.* Low-frequency noise, barrier structure, the volt-noise characteristics, approximation.

Развитие микроэлектроники и повышение требований к качеству и надежности полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов и интегральных схем требуют создания диагностических методов отбраковки потенциально ненадежных изделий в дополнение к существующим технологическим отбраковочным испытаниям.

Температурные измерения параметров с целью диагностики, как правило, занимают много времени и требуют стационарного оборудования, что ограничивает их применение для экспресс-анализа характеристик полупроводниковых приборов. В настоящее время для анализа образцов полупроводниковых барьерных структур, как правило, исследуют их вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Указанные исследования не занимают много времени, однако информативность их невысока [1,2].

Шумовые характеристики полупроводниковых приборов являются неразрушающим и одним из наиболее эффективных и информативных источников сведений о протекающих в структуре процессах. Их изучение позволяет судить о надежности и долговечности приборов. Шумовые характеристики являются основными параметрами для таких приборов,

как датчики и сенсоры, так как определяют их пороговую чувствительность [1]. Однако важность исследования шумов полупроводниковых материалов и приборов далеко не ограничивается указанными примерами.

Обнаружение связи параметров шумов с пространственно-временными характеристиками полупроводниковых материалов и приборов позволяет применить их для исследования развивающихся в последнее время процессов самоорганизации физических, биологических и других объектов.

Наиболее распространенным методом анализа шумовых процессов является представление их в виде спектральной плотности мощности шума (СПМШ) [1], которую можно измерить с помощью панорамных приборов или найти с помощью фурье-преобразования временного ряда шумового сигнала. Особенно информативны данные по низкочастотным шумам, которые имеют частотную зависимость типа  $1/f^\gamma$ , где  $\gamma$  изменяется в пределах 0,3...3,0, и переходят при некоторой частоте в независимый от частоты тепловой, дробовой или генерационно-рекомбинационный шум. Шум со спектральной зависимостью типа  $1/f^\gamma$  получил название "фликкер-шума" или "шума типа  $1/f^\gamma$ ".

Во многих работах по изучению шума в полупроводниковых приборах приводятся экспериментальные результаты, свидетельствующие о зависимости СПМШ низкочастотного (НЧ) шума в полупроводниковых барьерных структурах с глубокими уровнями (ГУ) от приложенного напряжения обратного смещения. При обратном смещении в полупроводниковых приборах НЧ шум проявляется значительно интенсивнее, чем при прямом. Помимо прочего, в ряде работ предлагается оценивать надежность и другие параметры полупроводниковых барьерных структур по форме и коэффициентам математических функций, которыми аппроксимируют вольт-шумовые характеристики (ВШХ).

Однако широкое применение указанных методов затрудняет отсутствие единого мнения исследователей о механизмах формирования низкочастотного шума.

Целью настоящей работы явились анализ и сопоставление формы опубликованных разными авторами экспериментальных ВШХ полупроводниковых барьерных структур, а также аппроксимация кривых путём математического моделирования в среде Mathcad.

Проведем анализ некоторых работ, посвященных изучению зависимости параметров НЧ шума полупроводниковых барьерных структур от напряжения обратного смещения. В монографии В.М. Придорогина [3] указано, что одним из основных источников фликкер-шума в биполярных транзисторах является шум обратного смещенного коллекторного перехода. При увеличении напряжения на коллекторном переходе наблюдался значительный рост мощности НЧ шума. О росте интенсивности НЧ шума при увеличении коллекторного напряжения на транзисторе свидетельствуют и экспериментальные результаты, приведенные в книге А.К. Нарышкина и А.С. Врачева [4]. Повышение величины обратного смещения, приложенного к  $n^+p$ -переходу на кремнии, по данным А.М. Светличного и др. [5], приводило к увеличению мощности НЧ-шума. В [6] Г. Босманом и Р. Джильстра получено, что интенсивность НЧ-шума кремниевых планарных  $p^+p^+$ -структур пропорциональна квадрату приложенного напряжения. При повышении обратного смещения на диодах с барьером Шоттки [7,8] наблюдался рост СПМ избыточного шума. Указанный рост СПМ шума оказался тем большим, чем ниже была частота измерительного сигнала.

Напряжением, формирующим обедненную область полевых транзисторов, является напряжение на затворе. Зависимости интенсивности НЧ-шума таких приборов от смещения на затворе приведены в [9-13] и др. Ф. Клаасен в [13] указал, что интенсивность НЧ-шума является функцией разности между энергиями квазиуровня Ферми и глубокого уровня, а также напряжения смещения на затворе.

Из экспериментальных результатов, приведенных в работе А.И. Хатунцева [12], следует, что с ростом обратного смещения интенсивность НЧ шума увеличивалась, а частота перегиба спектра смещалась в более низкочастотную область, соответствующую проявлению ГУ с большей энергией ионизации. Ч. Сурия и Т. Цианг в [11] указали, что

повышение напряжения на затворе при фиксированной температуре увеличивает «активную» часть ловушек, термическая активация носителей с которых приводит к генерации избыточного шума. Р.Халлгрен [9] обнаружил, что интенсивность НЧ шума полевого транзистора с затвором Шоттки увеличивалась с ростом напряжения на затворе и толщины ОПЗ. Отмечено, что изгиб зон, создаваемый конкретным напряжением на затворе, зондирует вполне определенные ГУ, ответственные за генерацию НЧ шума. В [9] получено, что СПМ НЧ шума пропорциональна  $W^4$  ( $W$ - толщина ОПЗ по [9]), а толщина ОПЗ определяется величиной напряжения на затворе транзистора.

В работах М.И. Горлова, Д.Ю. Смирнова и др. [14] поставлена задача исследования зависимости параметров НЧ шума от тока и напряжения смещения, подаваемых на различные выходы интегральных схем.

Показано, что по измерению среднеквадратичного значения напряжения НЧ шума изделия при заданном токе смещения в одной точке вольт - шумовой характеристики нельзя с необходимой (не менее 0,95) достоверностью диагностировать потенциально ненадежные полупроводниковые приборы. Экспериментально обоснована разработка новых эффективных диагностических методов на основе измерений среднеквадратичных значений напряжения и тока НЧ шума в окрестности различных частот в двух и более точках ампер – шумовой характеристики при различных внешних воздействиях.

Анализ и сопоставление опубликованных результатов показали (например, данные, приведенные на рис. 1,2), что форма ВШХ барьерных структур в большинстве опубликованных работ выглядит идентично: как кривая с резким начальным ростом, переходящая в участок насыщения [15-17]. В работах [1,17] произведено сопоставление СПМШ НЧ шума с параметрами приборов и предложено использовать вольт-шумовые характеристики для отбраковки потенциально ненадежных приборов. Авторы [17] указали, что зависимость мощности шума от приложенного обратного смещения фотодиодов в диапазоне от 1 до 10 В описывается степенной функцией  $I_{ш} \sim U_{ш}^{\gamma}$ .

Установлено, что показатель степени  $\gamma$  может являться параметром отбраковки приборов по совокупности значений падения напряжения при прямом включении, напряжения пробоя и обратного тока при комнатной температуре. Величина  $\gamma$ , большая 0,3, свидетельствовала, по данным авторов, о том, что прибор не удовлетворяет техническим нормам по какому-либо параметру.

Результаты исследований показали, что вольт-шумовые характеристики фотодиодов более чутко реагируют на первые признаки деградации по сравнению с ВАХ и являются надёжным инструментом отбраковки потенциально ненадёжных приборов.

В [18] установлено, что при изучении особенностей СПМШ с помощью вейвлет-анализа вычисленные коэффициенты асимметрии и эксцесса зависимости средней пиковой плотности мощности от масштаба вейвлета коррелируют с качеством приборов.

В работе Вербицкой [16], посвященной изучению характеристик детекторов ядерного излучения на основе полуизолирующего арсенида галлия, для исследования шума использовалась методика, развитая в работах [19,20].

Методика заключалась в анализе характера шума диода в зависимости от тока подсветки образца при нескольких фиксированных значениях напряжения. При этом была использована аппаратура амплитудного анализа. Величина шума определялась по размытию линии генератора стабильной амплитуды. Согласно анализу работы [20], ширина линии генератора стабильной амплитуды на половине ее высоты соответствовала дробовому характеру шума, а появление нелинейности указывало на возникновение фликкер-шума.

В [16] значительное внимание уделено изучению ВШХ приборов. Полученная авторами зависимость имела вид кривой, интенсивно растущей на начальном участке, который при дальнейшем увеличении напряжения переходил в участок более слабого роста (рис. 1).

В [15,21] указано, что, начиная с определенного напряжения обратного смещения на барьерном слое, происходило насыщение величины СПМ НЧ-шума. Кроме того, отмечено,

что процессы релаксации заряда в высокоомной базе прибора происходили с постоянной времени максвелловской релаксации. Эти результаты, наряду с отмеченными ранее, подтверждают представления об особенностях процессов генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах, изложенные в [2,22].

В работе Кострюкова [15] проведён анализ зависимости ВШХ детекторов заряженных частиц и рентгеновского излучения на основе Al/i-GaAs от их свойств и сделана попытка аппроксимировать участок кривой функцией вида  $A \cdot e^{aU}$  (рис. 2).

Наличие точки, в которой происходила смена коэффициента  $a$ , объясняется следующим образом. При некоторой напряженности поля создаются условия для генерации с ГУ и дрейфа носителей заряда при условии пересечения глубокого уровня уровнем Ферми в области пространственного заряда барьерной структуры.

Увеличение напряжённости поля приводит к тому, что увеличивается часть активированных с ГУ носителей, пролетевших слой ОПЗ, что в результате приводит к увеличению амплитуды шумовой составляющей обратного тока структуры.

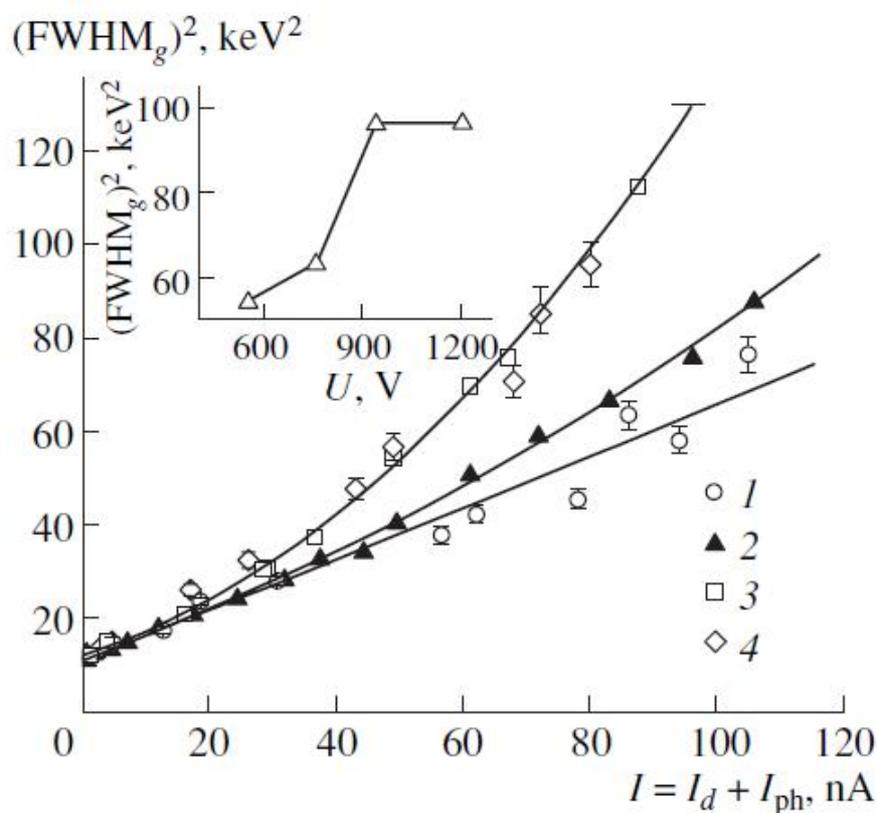


Рис. 1. Зависимость шума от величины тока при вариации напряжения на детекторе.  $U$ , кВ: 1 — 0,55, 2 — 0,76, 3 — 0,94, 4 — 1,2. На вставке — зависимость шума от напряжения при токе 80 нА [16]

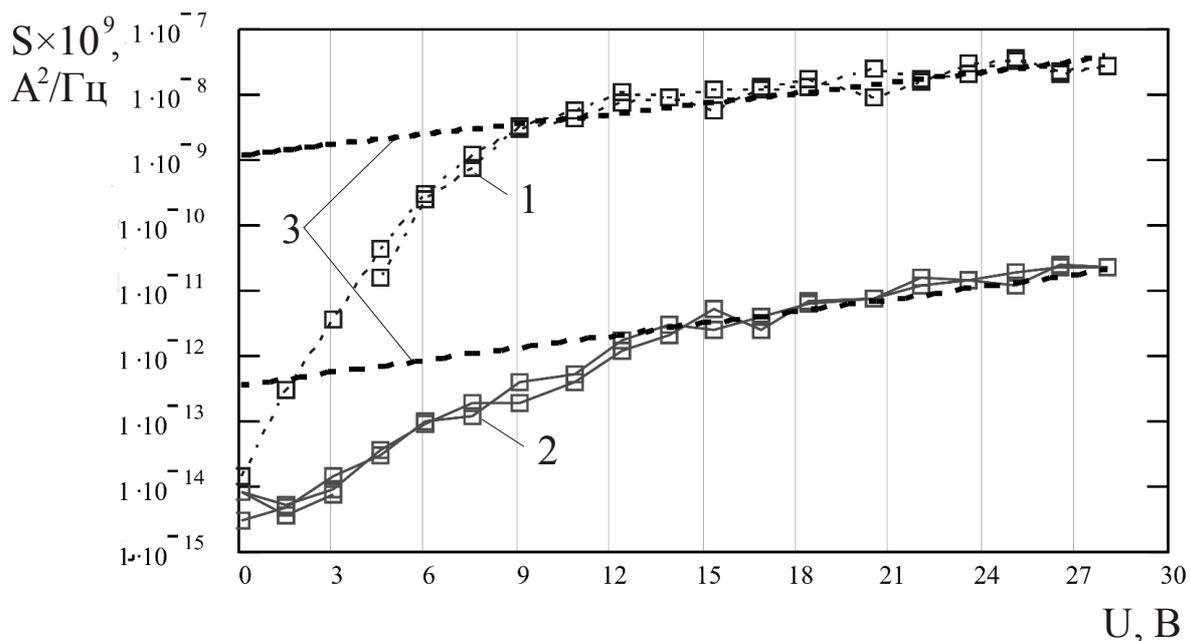


Рис. 2. Зависимости СПМ шума от напряжения смещения для образцов группы №2–кривая 1, №3 –кривая 2, аппроксимация экспоненциальной зависимостью – прямые 3 [15]

Согласно эффекту Френкеля, увеличение напряжённости электрического поля приводит к понижению потенциального барьера для отдельного атома, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества активированных с ГУ носителей. Одновременное действие электрического поля как на дрейфовую, так и на генерационную составляющие приводит к резкому росту числа носителей, достигших области базы и давших вклад в общий шумовой ток.

Переход к более "пологой" зависимости (к меньшему значению  $\alpha$ ) происходит за счёт исключения одного из компонентов механизма формирования импульсов тока. Высказано предположение, что происходит "насыщение" или "истощение" количества активированных с ГУ носителей заряда, в то время как количество достигших область базы носителей заряда продолжает расти под действием увеличивающейся напряжённости поля.

Основным практическим применением полученных результатов является возможность более точного расчета энергии ионизации ГЦ по спектральным характеристикам НЧ-шума, а также возможность экспресс-анализа барьерных структур на наличие и суммарную концентрацию электрически активных ГЦ по форме ВШХ.

Форму ВШХ диодов Шоттки при обратном смещении можно аппроксимировать двумя функциями вида  $A \cdot e^{aU}$ , смещёнными друг относительно друга по оси напряжений, что позволяет связать особенности экспериментальных кривых с параметрами барьерных структур. На рис. 3 приведена аппроксимация кривой 1, изображенной на рис.2, и представлены полученные в среде Mathcad математические соотношения, описывающие эту зависимость.

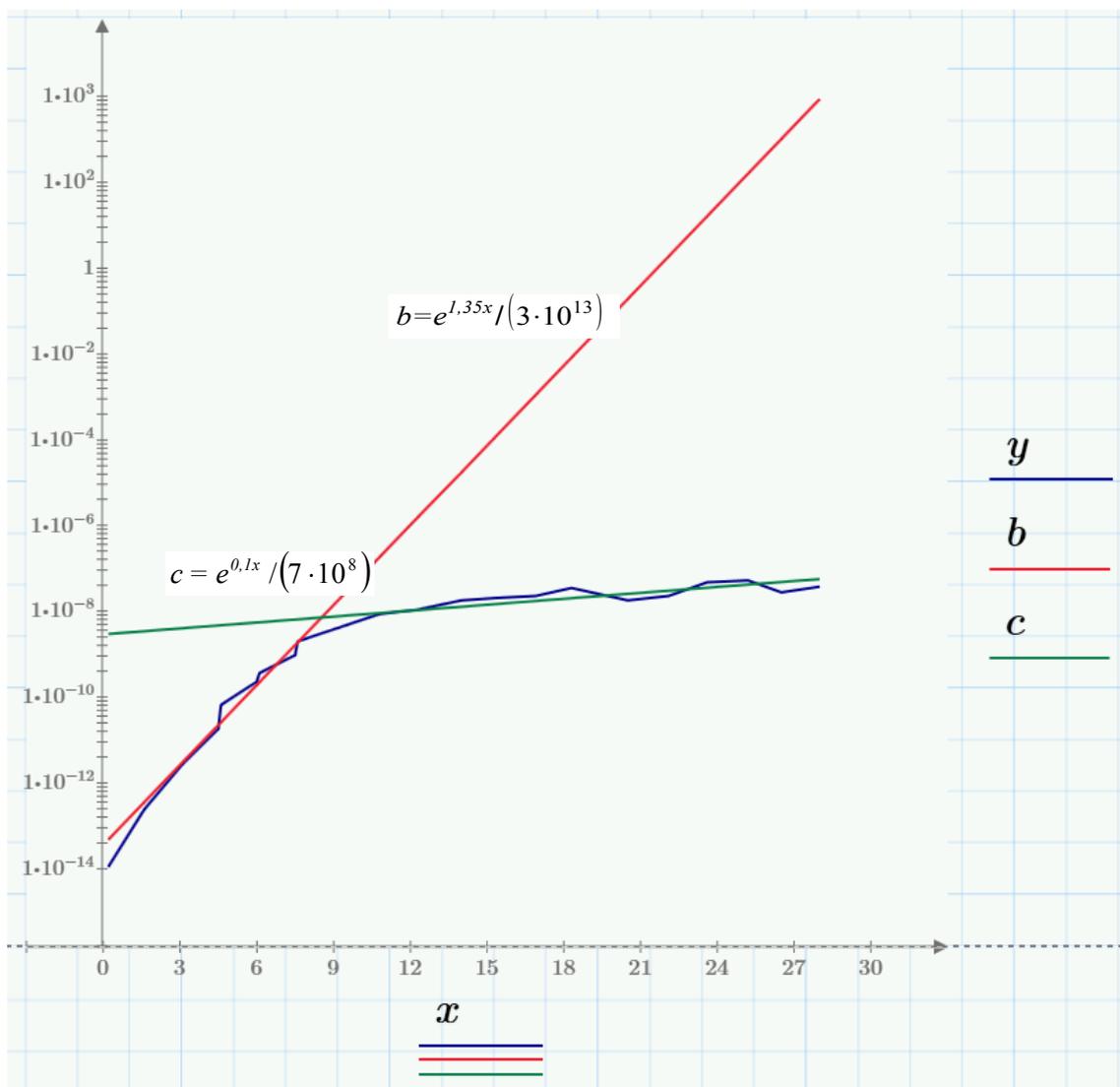


Рис. 3. Аппроксимация ВШХ двумя функциями вида  $A \cdot e^{ax}$ : по оси ординат приведено изменение СПМШ,  $A^2/\text{Гц}$ , по оси абсцисс – напряжение обратного смещения, В

В ряде работ [21,23] также отмечен факт, что уровень шума структур, изготовленных в едином технологическом цикле и расположенных в непосредственной близости друг от друга, может различаться на несколько порядков. При этом ВАХ и вольт-фарадные характеристики таких структур идентичны. В большинстве случаев форма ВШХ одинакова, различаются значения напряжения перехода от первого участка ко второму и коэффициенты, характеризующие наклон каждого из участков. Это говорит о более высокой, по сравнению с методами ВАХ и C-V, чувствительности, информативности и перспективности метода вольт-шумовых характеристик. Исследования авторов показывают, что вид ВШХ определяется, в первую очередь, состоянием границы раздела металл-полупроводник. По нашему мнению, наличие на границе раздела тонкой диэлектрической прослойки вызывает перераспределение электрического поля в барьерной структуре, что вызывает изменение соотношения между напряжением смещения и значением напряженности электрического поля, при которой реализуется участок насыщения ВШХ. Это, в свою очередь, вызовет смещение точки перехода от первого участка ко второму по оси напряжений.

В заключение сделаем вывод, что, несмотря на сходство формы ВШХ, полученных экспериментально разными авторами, для их аппроксимации применяются разные функции – степенная либо показательная. Дальнейшее изучение формы ВШХ и проведение анализа кривых с вычислением соответствующих коэффициентов могут позволить прогнозировать надежность и пороговый уровень параметров полупроводниковых приборов.

## Библиографический список

10. Жигальский Г.П., Холомина Т.А. Избыточные шумы и глубокие уровни в детекторах ядерных частиц и ионизирующего излучения на основе GaAs// Радиотехника и электроника.2015. Т. 60. № 6. С. 553–581.
11. Холомина Т.А. Физический механизм нестационарной спектроскопии глубоких уровней и генерации низкочастотного шума в барьерных слоях // Изв. вузов. Электроника. 1998. № 2. С. 22-26.
12. Придорогин В.М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах. М.: Энергия, 1976. 160 с.
13. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. М.: Энергия, 1972. 153 с.
14. Шум диодов с избыточной плотностью линейных дефектов /А.М.Светличный, Л.А.Коледов, А.И.Пекарев и др. //Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1982. Вып. 4 (155). С. 41-46.
15. Bosman G., Zijlstra R.J.J. Generation-recombination noise in *p*-type silicon //Solid-State Electron. 1982. Vol. 25. № 4. P. 273-280.
16. Hsu S.T. Low-frequency excess noise in metal-silicon Schottky barrier diodes //IEEE Trans. Electron. Devices. 1970. Vol. ED-17. № 7. P. 496-506.
17. Cowley A.M., Zettler R.A. Shot noise in silicon Schottky barrier diodes //IEEE Trans. Electron. Devices. 1968. Vol. ED-15. № 10. P. 761-769.
18. Hallgren R.B. Low-bias-noise spectroscopy of field-effect transistor channels: depletion-region trap models and spectra //Solid-State Electron. 1990. Vol. 33. № 8. P. 1071-1080.
19. Duh K.H., Zhy X.C., Van der Ziel A. Low-frequency noise in gallium arsenide MOSFET's //Solid-State Electron. 1984. Vol. 27. № 11. P. 1003-1013.
20. Surya C., Hsiang T.Y. A thermal activation model for  $1/f^{\alpha}$  noise in *Si*-MOSFET's //Solid-State Electron. 1988. Vol. 31. № 5. P. 959-964.
21. Хатунцев А.И. Исследование влияния режима на частотную зависимость напряжения шума генерации-рекомбинации полевого транзистора с *p-n*-переходом для случая одноуровневого центра //Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1975. Вып. 3 (95). С. 9-15.
22. Klaassen F.M. Characterization of low  $1/f$  noise in MOS transistors //IEEE Trans. Electron. Devices. 1971. Vol. ED-18. № 10. P. 887-891.
23. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Золотарева Е.А. Способы разделения полупроводниковых приборов по надежности с использованием низкочастотного шума и рентгеновского облучения// Микроэлектроника. 2011. Т.40. №1. С. 52 – 56.
24. Кострюков С.А. Автореферат дис. канд физ.-мат наук. Рязань: РГРГУ. 2007. 16 с.
25. Характеристики детекторов ядерного излучения на основе полуизолирующего арсенида галлия / Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Иванов и др.// Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 4. С. 490-497.
26. Шумовые методы контроля высоковольтных силовых диодов / А.Д. Геленко, А.М. Гуляев, И.Ю. Кукоев, И.Н. Мирошникова и др. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докладов науч.-метод. семинара. М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1996. С. 185-190.
27. Вейвлет- и фурье-анализ электрических флуктуаций в полупроводниковых и электрохимических системах/ Е.Ю. Будников, И.Ю. Кукоев, А.В. Максимычев, И.Н. Мирошникова, С.Ф. Тимашев, А.М. Гуляев. //Измерительная техника. 1999. №11. С. 40-44.
28. Иванов А.М., Строкан Н.Б. Исследование шумов  $p^+$ -*n*-детекторов жестких излучений техникой амплитудного анализа // ЖТФ. 2000. Т.70. №2. С. 139-142.
29. Устойчивость кремниевых планарных детекторов к рентгеновскому излучению./ М.Е. Бойко, В.К. Еремин, А.М. Иванов, Н.Б. Строкан, С.А. Голубков, Н.Н. Егоров, К.А. Коньков, А.И. Сидоров //ПТЭ. 2000. Т. 3. № 2. С. 111-115.
30. Ильичев Э.А.,Кострюков С.А., Жигальский Г.П., Холомина Т.А., Литвинов В.Г. Избыточные шумы в GaAs детекторах ионизирующих излучений, геттерированных иттербием// Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 74-78.
31. Oreshkin P.T. Barrier layers as resonators on deep centers // Phys. stat. sol. (a). 1991. – Vol. 123. – №2. – P. 483-491.
32. Кострюков С.А., Холомина Т.А., Лактюшкин А.С. Влияние обратного электрического смещения на параметры низкочастотного шума барьеров Шоттки // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы междунар. науч.-метод. семинара. М.: МНТО РЭС им. А.С. Попова, МЭИ. 2009. С. 77-82.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} / \text{GaAs}$

А.В. Баскакова<sup>1</sup>, М.В. Грачев<sup>1</sup>, А.А. Бауков<sup>1</sup>, А.Б. Дюбуа<sup>1,2</sup>, Т.И. Левцова<sup>1</sup>, С.Н. Машнина<sup>1</sup>,  
А.С. Сафoshкин<sup>1,2</sup>, Е.Ю. Щигорев<sup>1</sup>, С.И. Кучерявый<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

<sup>2</sup>Институт теоретической физики РАН

<sup>3</sup>Обнинский институт атомной энергетики

Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

*Аннотация.* Работа направлена на выяснение вклада внутрисубзонной и межподзонной электрон-электронной релаксации в затухание квантования Ландау осцилляций поперечного магнитосопротивления. Для сильнолегированного гетероперевода, аппроксимированного треугольным потенциальным профилем, когда заполнены основная и возбужденная подзоны размерного квантования, получены выражения параметрических зависимостей от температуры, которые объясняют экспериментальные зависимости.

*Ключевые слова.* Электрон-электронные взаимодействия, гетеропереход, метод хаотических фаз.

## INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE TIME OF ELECTRON-ELECTRON INTERACTION IN THE HETEROJUNCTION $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} / \text{GaAs}$

A.V. Baskakova<sup>1</sup>, M.V. Grachev<sup>1</sup>, A.A. Baukov<sup>1</sup>, A.B. Dubois<sup>1,2</sup>, T. I. Levtsova<sup>1</sup>, S. N. Mashnina<sup>1</sup>,  
A.S. Safoshkin<sup>1,2</sup>, E.Y. Shchigorev<sup>1</sup>, S.I. Kucheryavyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radioengineering University

<sup>2</sup>Institute for Theoretical Physics RAS

<sup>3</sup>Obninsky Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Research University MEPI

*Abstract.* The work is aimed at identifying the contribution intrasubband and intersubband electron - electron relaxation oscillation damping Landau quantization of the transverse magnetoresistance. For heavily doped heterojunction approximated by a triangular potential profile when ground and excited subband are filled, parametric expressions depending on the temperature are obtained, which explain the experimental dependence.

*Keywords.* Electron-electron interactions, heterojunction, the method of the random phase.

Рассмотрим процесс взаимодействия частиц с импульсом  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{p}$ . В результате взаимодействия получаются частицы с импульсами  $\mathbf{k}+\mathbf{q}$  и  $\mathbf{p}-\mathbf{q}$ . Вероятность такого процесса пропорциональна интегралу столкновений

$$\sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \delta(E_j(\mathbf{k}+\mathbf{q})+E_l(\mathbf{p}-\mathbf{q})-E_i(\mathbf{k})-E_k(\mathbf{p})) f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1-f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}})(1-f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}), \quad (1)$$

где  $f$  — функция распределения Ферми — Дирака. Индексы  $i, j, k, l$  обозначают следующее: электрон, находящийся в состоянии  $i$ , взаимодействует с электроном в состоянии  $k$ , в результате чего происходят переходы соответственно в состояния  $j$  и  $l$ . С точностью до второго члена разложения внешнего возмущающего потенциала теории возмущений выражение для времени “e-e” взаимодействия может быть представлено в виде

$$\frac{1}{\tau_{ij}^{ee}} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{m}} \sum_{\mathbf{q}} |V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)|^2 \sum_{\mathbf{k}, \mathbf{p}} \delta(E_j(\mathbf{k}+\mathbf{q})+E_l(\mathbf{p}-\mathbf{q})-E_i(\mathbf{k})-E_k(\mathbf{p})) \times f_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{p}} (1-f_{\mathbf{k}+\mathbf{q}})(1-f_{\mathbf{p}-\mathbf{q}}), \quad (2)$$

где  $V_{tot}^{ijkl}(\mathbf{q}, \omega)$  — матричный элемент полного потенциала экранирования. В ряде экспериментальных работ по исследованию особенностей осцилляций поперечного магнитосопротивления Шубникова – де Гааза (ШдГ) в широком диапазоне температур и магнитных полей для объемных 3D и двумерных 2D электронов обнаружены некоторые аномалии, имевшие определенную общность в качественном сходстве, но и существенные различия. Например, была обнаружена – осциллирующая зависимость температуры Дингла  $T_D$  от температуры  $T$ , а следовательно, и времени малоугловой релаксации  $\tau_q$  от  $T$  [2]. Эти осцилляции  $T_D(T)$  и  $\tau_q(T)$  были обнаружены для сильнолегированных гетеропереходов (

$n_s > 8.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ), в которых заполнена основная и вторая возбужденная подзона размерного квантования. Была установлена однозначная связь этих аномалий с сильным (для вырожденных 3D и 2D электронов) электрон-электронным взаимодействием. Для качественного и количественного объяснения наблюдаемых эффектов необходимо рассмотрение каналов электрон-электронных («e-e») взаимодействий в сложной системе 2D вырожденных электронов (рис. 1).

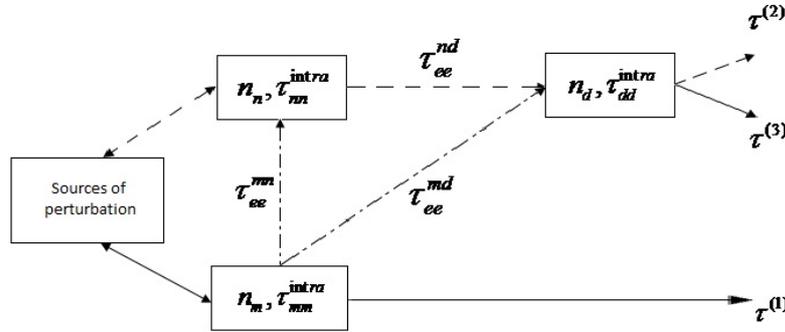


Рис. 1. Схема-модель каналов прохождения возмущения от источников. Комментарии в тексте

Рассмотрим возможные сценарии восприятия возмущения от источников и формирование за счет «e-e» взаимодействия  $\tau_q(T)$  - фактора столкновительного уширения уровней Ландау:

1) возмущение воспринимает массив 2D электронов  $n_m$  на основном уровне размерного квантования. Это взаимодействие характеризуется временем  $\tau_{ee}^{(1)}$ . За счет сильного «e-e» внутривозбудного взаимодействия возмущение охватывает всю электронную систему и на опыте измеряется  $\tau_q^{\text{exp}}(\tau_{ee}^{(1)})$ . Траектория этого механизма показана на рис. 1 сплошными линиями:

$$\tau^{(1)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{mm}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{md}, \tau_{ee}^{mn}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{nn}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{nd}) = \tau_{ee}^{(1)}. \quad (3)$$

2) второй сценарий возможен, если возмущение воспринимает спутник  $n_n$  на уровне  $E_p$  размерного квантования. В этом случае  $n_n$  непосредственно взаимодействуют с  $n_d$  и с  $n_m$  - 2D электронами. Следовательно, время разрушения квантования формируется так:

$$\tau^{(2)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{nn}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mm}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{md}) \Rightarrow \tau_{ee}^{(2)}. \quad (4)$$

Этот сценарий на схеме представлен штриховой траекторией.

3) если возмущение воспринимают 2D электроны на уровне  $E_m$ , то за счет взаимодействия со временем  $\tau_{ee}^{mn}$  с  $n_n$  («n-спутником»), а  $n_n$  за время  $\tau_{ee}^{nd}$  распространяют возмущение на  $n_d$ , так что формируется  $\tau_q^{\text{exp}}$  в цепочке

$$\tau^{(3)} \Rightarrow (\tau_{ee}^{mm}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{mn}, \tau_{ee}^{md}) \Rightarrow (\tau_{ee}^{nn}, \tau_{ee}^{dd}, \tau_{ee}^{nd}) \Rightarrow \tau_{ee}^{(3)}. \quad (5)$$

На схеме эта версия представлен штрих - пунктирной траекторией. Окончательные зависимости рассчитывались в соответствии с правилом Маттиссена

$$(\tau_{ee}^{\text{th}})^{-1} = \sum_i (\tau_{ee}^i)^{-1}. \quad (6)$$

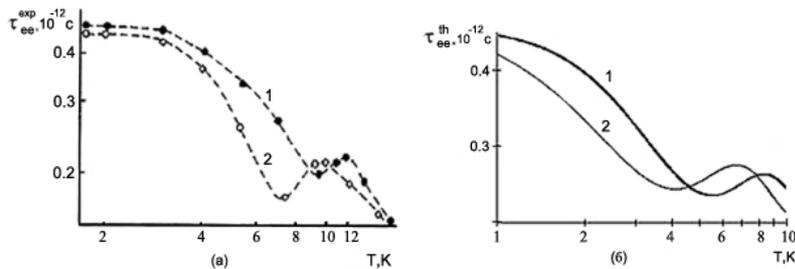


Рис 2. Сравнение экспериментальных кривых  $\tau_{ee}^{\text{exp}}(T)$  (а) и расчетных кривых  $\tau_{ee}^{\text{th}}(T)$  (б) для различных концентраций плотности электронов  $m$  - подзоны: 1 -  $9,1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ , 2 -  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных и рассчитанных кривых времени разрушения квантования Ландау для нескольких гетероструктур, в которых заполнены только две нижние зоны размерного квантования. Первое, на что следует обратить внимание, это количественное «попадание» расчетов в интервал величин  $\tau$  в температурном интервале  $2 \leq T \leq 12K$  для реальных плотностей  $n_m \approx 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $n_d = 0.1n_m$ ,  $n_n = 0.01n_m$  и  $d_p / d_m = 3$ .

Из всех рассмотренных сценариев схемы-модели (рис. 1) случай (3) наиболее отвечает одной из кривых, рассчитанной как раз для этого случая и изображенной на рис. 2,б. Кроме этого, можно отметить, что при низких температурах ( $T < 5K$ ) затухание квантования Ландау определяется  $n_s$ -электронами, а численный анализ разложения диэлектрических функций показывает появление немонотонностей  $\tau_{ee}^{th}(T, n_s)$  при  $n_m > 8 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  и  $T > 5K$ . Это позволяет утверждать, что характерные осцилляции  $\tau_{ee}^{th}(T)$  возникают только после заполнения электронами второй подзоны размерного квантования и отклика на температурное воздействие при  $T > 5K$ . Вторым результатом – это роль  $n_n$ - сателлита в возбуждении осцилляций, при этом независимо от того, какой компонент 2D электронной системы воспринимает возмущение, что показано на рис. 1 каналом  $\tau^{(3)}$ . Непосредственно это видно, если предположить  $n_n = 0$  и тогда только  $\tau_{mm}^{intra}(T)$  и  $\tau_{dd}^{intra}(T)$  будут отличаться от нуля и осцилляции  $\tau_{ee}^{th}(T)$  не возникают. Таким образом, экспериментально наблюдаемые зависимости  $\tau_{ee}^{exp}(T)$  при  $T < 5K$  связаны только с внутриподзонами «e-e» переходами. При более высоких температурах реализуется смешанный механизм разрушения квантования Ландау:

$$\tau_q^{exp}(T) \approx \tau_q^{(3)} \left[ \left( \tau_{ee}^{mn} \right)^{-1} = \left( \tau_{mm}^{intra} \right)^{-1} + \left( \tau_{mm}^{inter} \right)^{-1}; \left( \tau_{ee}^{nd} \right)^{-1} = \left( \tau_{nn}^{intra} \right)^{-1} + \left( \tau_{nd}^{inter} \right)^{-1} \right].$$

### Библиографический список

1. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе// Вестник РГРТУ. – 2013. – №3(45). – С. 88-92.
2. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhensky K.V., Dubois A., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. – Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction. – Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. – 2014. – Vol. 5, Issue 3. – pp 343-353.

УДК 621.315.592; ГРТНИ 29.19.31

## РАСЧЕТ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} / \text{GaAs}$

А.В. Баскакова<sup>1</sup>, М.В. Грачев<sup>1</sup>, А.А. Бауков<sup>1</sup>, А.Б. Дюбуа<sup>1,2</sup>, Т.И. Левцова<sup>1</sup>, С.Н. Машнина<sup>1</sup>,  
А.С. Сафoshкин<sup>1,2</sup>, Е.Ю. Щигорев<sup>1</sup>, С.И. Кучерявый<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет

<sup>2</sup>Институт теоретической физики РАН

<sup>3</sup>Обнинский институт атомной энергетики

Национального исследовательского ядерного университета МИФИ

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

*Аннотация.* Рассмотрен расчет зонной структуры гетероперехода  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}/\text{GaAs}$  самосогласованным решением уравнений Шредингера и Пуассона. Также приведена аппроксимация профиля потенциальной ямы гетероперехода, которая используется в расчете времени электрон-электронного взаимодействия.

*Ключевые слова.* Гетеропереход, потенциальная яма, уравнение Шредингера, уравнение Пуассона.

## THE CALCULATION OF THE BAND STRUCTURE OF A GETEROJUNCTION

### $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x} / \text{GaAs}$

A.V. Baskakova<sup>1</sup>, M.V. Grachev<sup>1</sup>, A.A. Baukov<sup>1</sup>, A.B. Dubois<sup>1,2</sup>, T.I. Levtsova<sup>1</sup>, S.N. Mashnina<sup>1</sup>,  
A.S. Safoshkin<sup>1,2</sup>, E.Y. Shchigorev<sup>1</sup>, S.I. Kucheriavyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ryazan State Radio Engineering University

<sup>2</sup>Institute for Theoretical Physics RAS

<sup>3</sup>Obninsk Institute of Atomic Energy of the National Research Nuclear University MEPhi

e-mail: safoshkin.a.s@rsreu.ru

*Abstract.* The article describes the calculation of the band structure of the heterojunction AlxGa1-x / GaAs by the self-consistent solution of the Schrödinger and Poisson. Profile also shows an approximation of the potential well of the heterojunction, which is used in the calculation of the electron-electron interaction.

*Keywords.* Heterojunction, the potential well, the Schrödinger equation, Poisson equation.

Зонные диаграммы исследованных наноструктур рассчитаны методом самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + E(z) \right] \psi_j(z) = E_j \psi_j(z); \quad -\frac{d^2 V}{dz^2} = \frac{4\pi\rho(z)}{\chi} \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\psi_j(0) = 0, \quad \psi_j(\infty) = 0, \quad V(z = \infty) = 0, \quad eV(z = 0) = E_0. \quad (2)$$

Самосогласованное решение системы (1) с граничными условиями (2) представляет определенные трудности из-за неопределенности распределения плотности заряда  $\rho(z)$ . В ряде работ предприняты попытки расчета зонных структур гетеропереходов, однако авторы ограничились численным методом и не получили аналитического решения. Кроме того, в решении системы (1) могут возникнуть разного рода расходимости, существенно влияющие на конечный результат. Так как суммарный интеграл

$$Q = \int_0^{\infty} \rho(z) dz = 0, \quad (3)$$

то в первом приближении в яме должны существовать две области положительного и отрицательного зарядов:  $z < D$  и  $z > D$  с условием  $\rho(z = D) = 0$ . Так как  $\rho(z = 0) = eN_0^{3/2}$  ( $N_0$  - уровень легирования), то простейшая аппроксимация, позволяющая получить численный результат, удобный для интегрирования интегро-дифференциального уравнения Больцмана, имеет вид:

$$\begin{cases} \rho(z) = eN_0^{3/2} \left( 1 - \frac{z}{D} \right), & z < D, \\ \rho(z) = -A(z - D) \exp(-(z - D)/a), & z > D. \end{cases} \quad (4)$$

Подставляя систему (4) в (3) и интегрируя, получаем:

$$A = \frac{eN_0^{3/2} D}{2a}.$$

Далее, подставив (4) в (1), после простых преобразований [1] получим распределение потенциала:

$$V(z) = -\frac{2\pi}{\chi} \left[ eN_0^{3/2} \left( z^2 - \frac{z^3}{3D} \right) \right] + \frac{4\pi eN_0^{3/2}}{\chi} \left( \frac{1}{3} D^2 + \frac{1}{2} Da \right), \quad z < D, \quad (5)$$

$$V(z) = \frac{2\pi eN_0^{3/2} D}{\chi} a \exp(-(z - D)/a), \quad z > D. \quad (6)$$

Моделирование потенциала имеет существенный недостаток: «произвол» в определении постоянных  $a$  и  $D$ . Кроме того, используя метод, не удастся решить уравнение Шредингера (1). В определенной мере произвол можно снять граничным условием (2):

$$E(0) = -eV(z = 0) = -\frac{4\pi e^2 N_0^{3/2} \left( \frac{1}{3} D^2 + \frac{1}{2} aD \right)}{\chi}. \quad (7)$$

Откуда следует связь

$$a = \frac{\chi E(0)}{2\pi e^2 N_0^{3/2} D} + \frac{2}{3} D.$$

Для дальнейшего использования расчетов необходима аппроксимация профиля потенциальной ямы. Для этого решение системы может быть получено в виде

$$V(z) = -V_0 \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \beta^n e^{-(n+1)\lambda z}}{\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \beta^n}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  и  $\beta$  - некоторые подгоночные параметры [2].

Очевидно, что ряд в (10) является равномерно сходящимся, поэтому с точностью до 2-го члена разложения имеем

$$V(z) \cong -\frac{V_0}{1-\beta} (e^{-\lambda z} - \beta e^{-2\lambda z}). \quad (9)$$

Аппроксимация может быть использована для дальнейших расчетов времени электрон-электронного взаимодействия [1].

Решим уравнение Шредингера, преобразовав его к виду

$$\left( -\frac{d^2}{d\tilde{z}^2} + \varphi(\tilde{z}) - k^2 \right) \psi_k^+(\tilde{z}) = 0. \quad (10)$$

Запишем решение уравнения (10) в виде

$$\psi_k^+(z) = \exp(i(kz + \eta(k))) \sum_{j=0}^{\infty} b_j(k) \exp(-j\lambda z) \quad (11)$$

и после подстановки в уравнение (10) и сокращения на фазовый множитель получим уравнение

$$\sum b_j(k) \left( \frac{j^2 \lambda^2 - 2ikj\lambda}{P(1-\beta)} + 1 \right) = 0. \quad (12)$$

Тогда при  $b_0 = 1$  и фазовом сдвиге

$$\sum_{j=0} b_j(k) = -\exp(-i\eta(k)) \quad (13)$$

получим:

$$b_j(k) = -\frac{P(b_{j-1} - \beta b_{j-2})}{\lambda^2 j^2 - 2ikj\lambda}. \quad (14)$$

В случае умеренно легированного гетероперехода  $Al_x GaAs_{1-x}(Si)/GaAs$ , когда заполнена одна подзона размерного квантования [3] ( $k=1$ ), волновая функция будет иметь вид

$$\psi_1^+(\tilde{z}) = \exp(i\tilde{z}) \sum_{j=0}^{\infty} b_j(1) \exp(-j\lambda \tilde{z}). \quad (15)$$

Уравнение (10) может быть приведено к виду

$$\frac{d^2 \chi}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{d\chi}{dy} + \left( c^2 - \frac{q^2}{y^2} \right) \chi = 0, \quad (16)$$

где  $c = \sqrt{\frac{8mV_0 a^2}{\hbar^2}}$ ,  $q = \sqrt{\frac{8mEa^2}{\hbar^2}}$ ,  $\chi = \psi z$ ,  $y = e^{-z/2a}$ .

Уравнение (16) может быть решено с помощью функций Бесселя, решение будет записано в виде

$$\chi = c_1 J_q(cy) + c_2 J_{-q}(cy). \quad (17)$$

Причем при  $y \rightarrow 0$  ( $z \rightarrow \infty$ ) имеем  $J_{-q} \propto y^{-q} \rightarrow \infty$ , отсюда  $c_2 = 0$ .

Следовательно,  $\chi = c_1 J_q(cy)$ , т.е.

$$\psi = \frac{1}{z} J_q(c \cdot e^{-z/2a}). \quad (18)$$

### Библиографический список

1. Дюбуа А.Б., Зилотова М.А., Кучерявый С.И., Сафoshкин А.С. Кинетические процессы в умеренно легированном гетеропереходе // Вестник РГРТУ. 2013. № 3(45). С. 88-92.
2. Ambartsumyan V.A., Andryushchenko E.A., Bukhenskyu K.V., Dubois A., Dvoretzkova E.A., Gordova T.V., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Channels of electron-electron interactions in highly doped heterojunction // Nanosystems: physics, chemistry, mathematics. 2014. Vol. 5, Issue 3. pp 343-353.
3. Bukhenskyu K.V., Dubois A.B., Gordova T.V., Kucheryavyu S.I., Mashnina S.N., Safoshkin A.S. Electron-electron Interactions in Highly Doped Heterojunction // Physics Procedia. 2015. Vol. 71. pp. 359-363.

УДК 621.378.324; 47.09.48

## ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКТОРЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО СИНТЕЗА ФУЛЛЕРЕНОВ

Н.Т. Май, Б.А. Козлов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, foton@rsreu.ru*

*Аннотация.* Настоящая работа посвящена установлению взаимосвязи температуры газовой среды в разрядном промежутке с величиной электрической мощности. Уравнение теплового баланса включало в себя электрическую мощность и тепловые потери на излучение и теплопроводность по электродам. Потери мощности на теплопроводность по разреженному газу не учитывались. Получена графическая зависимость температуры газовой среды в разрядном промежутке в диапазоне от 1000 до 5000 градусов от электрической мощности.

*Ключевые слова.* Наноструктуры, углерод, графит, фуллерены, электродуговой метод, плазмохимическое осаждение, лазерное испарение.

## THERMAL PROCESSES IN THE REACTOR FOR ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF FULLERENES

N.T. Mai, B.A. Kozlov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, foton@rsreu.ru*

*Abstract.* The present work is devoted to relationship of the temperature of the gas medium in the discharge gap with the amount of electric power. The heat balance equation include electric power and heat losses by radiation and thermal conductivity on the electrodes. Power losses on the thermal conductivity in rare gas was not taken into account. Obtained graphical dependence of the temperature of the gas medium in the discharge gap in the range of from  $1 \cdot 10^3$  to  $5 \cdot 10^3$  K from electrical power.

*Keywords.* Nanostructures, carbon, graphite, fullerenes, electric arc method, PECVD, laser vaporization.

Нанотехнологии - это "самые высокие" современные технологии, на развитие которых ведущие экономические державы тратят сегодня миллиарды долларов. По прогнозам ученых нанотехнологии в XXI веке произведут такую же революцию в манипулировании материей, какую в XX веке произвели компьютеры в манипулировании информацией, а их развитие изменит жизнь человечества больше, чем освоение письменности, паровой машины или электричества.

Особенность нанотехнологий заключается в том, что рассматриваемые процессы и совершаемые действия происходят в нанометровом диапазоне пространственных масштабов. В этом диапазоне размеров сырьем являются отдельные атомы, молекулы, молекулярные системы, а не привычные в традиционной технологии микронные или макроскопические

объёмы материала, содержащие, по-крайней мере, миллиарды атомов и молекул. В отличие от традиционной технологии, для нанотехнологии характерен индивидуальный подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как бездефектные материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологическими свойствами, так и новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами.

Существует множество методов синтеза фуллеренов. Наиболее известными являются три из них. Это метод распыления графитовых электродов в плазме дугового разряда, метод лазерного испарения и метод плазмохимического осаждения из паровой фазы. Первоначально фуллерены получали методом электродугового распыления графита и последующей конденсацией в среде инертного газа. Метод основан на образовании фуллеренов при термическом распылении графитового электрода в электродуговом разряде.

Основные параметры, характеризующие эти методы получения фуллеренов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Дуговой метод	Лазерный метод	Метод плазмохимического осаждения
$I_{\text{разр}} = 100-200 \text{ A}$ , $U_{\text{ак}} = 10-20 \text{ B}$ , $J = 250 \text{ A/cm}^2$ , $P_{\text{разр}} = 1.4 \text{ кВт}$ , $P_{\text{He}} = 100-500 \text{ Торр}$ , Производительность $\approx 10 \text{ г/ч}$	$f_{\text{имп}} = 10 \text{ Гц}$ , $t_{\text{имп}} = 10 \text{ нс}$ , $p_{\text{Ar}} = 500 \text{ Торр}$ , Требуется нагрев до $T = 1200^\circ\text{C}$ $P_{\text{имп}} = 500 \text{ мДж}$ Производительность $\approx 2.8 \text{ г/ч}$	Предварительный нагрев до $T = 250^\circ\text{C}$ . Затем нагрев до $T = 900^\circ\text{C}$ . Обязательное присутствие катализатора. Производительность высокая
Среди наноструктур преимущественно имеет место выход фуллеренов. Качество наноструктур высокое	Среди наноструктур преимущественно получают нанотрубки среднего качества	Среди наноструктур преимущественно получают нанотрубки низкого качества

Схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок электродуговым методом приведена на рис. 1.

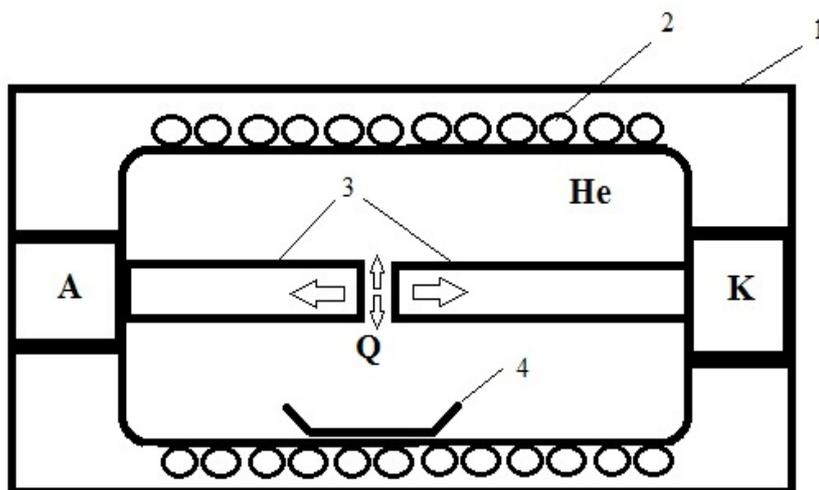


Рис. 1. Схема установки для получения фуллеренов и нанотрубок электродуговым методом: 1 – медный кожух, 2 – охлаждаемая медная шина, 3 – графитовые электроды, 4 – сборник сажи

Реактор, в котором осуществляется синтез фуллеренов и нанотрубок углерода, должен выдерживать подводимую мощность до 10 кВт, при этом температура оболочки не должна превышать  $100^\circ\text{C}$ . Подвод напряжения к графитовым электродам в газе низкого давления должен сопровождаться принятием мер по исключению зажигания газового разряда между шинами и корпусом реактора. Для этого применялись защитные экраны цилиндрической формы из керамики 22ХС.

С целью получения основных взаимосвязей между подводимой к разрядному промежутку электрической мощностью и температурой газовой среды в промежутке решалось

уравнение теплового баланса в диапазоне температур до 5000 К.

$$P_{эл} = P_{катода} + P_{анода} + P_{газа} + P_{плазма}, \quad (1)$$

$$P_{анода} = \lambda_{графита} \cdot F_1 \cdot \Delta T / L_1, \quad (2)$$

$$P_{катода} = P_{анода}, \quad (3)$$

$$P_{газа} = \lambda_{He} \cdot F_2 \cdot \Delta T / L_2, \quad (4)$$

$$P_{плазма} = F_3 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{гор}^4 - T_{хол}^4), \quad (5)$$

где  $\lambda_{графита}$ ,  $\lambda_{He}$  – коэффициенты теплопроводности графита и гелия [ $\lambda_{графита} = 359.6$  Вт/(м.К);  $\lambda_{He} = 0.2$  Вт/(м.К)];

$F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  – площади охлаждаемых поверхностей ( $F_1 = \pi \cdot d^2 / 4$ , где  $d$  – диаметр электродов ( $d = 1$  см);  $F_2 = F_3 = L_1 \cdot \pi \cdot d$ );

$\Delta T$  – разность температур охлаждаемой поверхности и теплоносителя ( $\Delta T = 3700$  К);

$L_1$  – длина электродов ( $L_1 = 10$  см),  $L_2$  – расстояние от плазмы до охлаждаемых стенок реактора ( $L_2 = 6$  см);

$\varepsilon$  – степень черноты ( $\varepsilon \approx 1$ );

$\sigma$  – постоянная Стефана - Больцмана ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Дж.с<sup>-1</sup>.м<sup>-2</sup>.К<sup>-4</sup>);  $T_{хол} = 100$  К.

После подстановки числовых значений в приведенные уравнения выражение, связывающее электрическую мощность с температурой, принимает вид

$$P_{эл} = 3,563 \cdot 10^{-12} \cdot T_{гор}^4 + 2,091 \cdot 10^3, \quad (6)$$

где  $T_{гор}$  – температура газовой среды в межэлектродном промежутке.

Количественные данные, полученные на основании уравнения (6), приведены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

$T_{гор}, К$	0	2765	3470	3892	4208	4463	4684	4874	5080
$P_{эл}, кВт$	2	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4

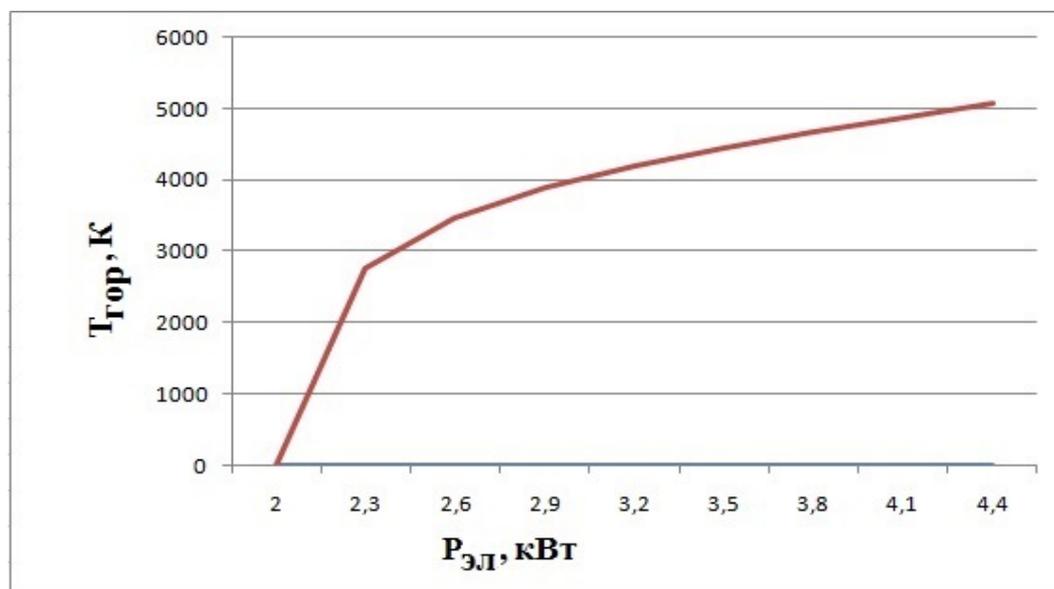


Рис. 2. График зависимости температуры газовой среды в разрядном промежутке от вводимой в разряд электрической мощности

Проанализированы относительные вклады теплового излучения и тепловых потоков по электродам и по разреженному газу к охлаждаемым стенкам реактора для электродугового синтеза фуллеренов в общие потери тепловой мощности. В диапазоне температур свыше  $2,5 \cdot 10^3$  К, где значения теплопроводности графита неизвестны, использовалась аналитическая аппроксимация этой зависимости от температуры, в связи с

относительно малым вкладом теплового потока по газовой среде (гелий при давлениях до 100 мм рт.ст). В уравнении теплового баланса учитывались тепловые потери за счет теплового излучения и теплопроводности по графитовым электродам. Для электродов из графита диаметром 10 мм и длиной по 10 см получена графическая зависимость температуры газовой среды (гелий и углеродный пар) в межэлектродном промежутке в диапазоне температур от  $1 \cdot 10^3$  К до  $5 \cdot 10^3$  К. Для достижения рабочих температур в области  $(4 \div 4,4) \cdot 10^3$  К требуются электрические мощности порядка  $3,3 \div 3,7$  кВт.

### Библиографический список

1. Мастеров В. Ф. Физические свойства фуллеренов// Соровский образовательный журнал. №1. 1997.
2. Палкина С. М. Углеродные нанотрубки. Описание лабораторных работ. Н. Новгород, 2006. 12 с.
3. Елецкий А. В., Смирнов Б. М. Фуллерены и структуры углерода// Успехи физических наук. 1995. № 9.
4. Сысун В. И. Фуллерены, синтез, методы получения. Петрозаводск: НОЦ Плазма, 2002. 23 с.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА В ГОМОПЕРЕХОДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Н.В. Вишняков, А.Д. Маслов, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, Maslov.a.d@mail.ru*

*Аннотация.* Работе рассматриваются методы определения напряжения холостого хода в фотоэлектрических преобразователях на основе гомоперехода. По представленным методам сделаны выводы об их достоинствах и ограничениях и проведен оценочный расчет. Определен наиболее универсальный метод, заключающийся в определении напряжения холостого хода через взаимосвязь между квазиуровнями Ферми и собственной концентрацией носителей в контактирующих полупроводниках.

*Ключевые слова.* Солнечные элементы, эффективность, напряжение холостого хода, разница квазиуровней Ферми.

## ANALYSIS OF CALCULATION METHODS OF DETERMINATION OF OPEN-CIRCUIT VOLTAGE IN HOMOJUNCTION SOLAR CELLS

N.V. Vishnyakov, A.D. Maslov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, Maslov.a.d@mail.ru*

*Abstract.* In this paper the non-contact methods of determination of open-circuit voltage in homojunction solar cells are considered. The conclusions about their advantages and limits and calculation results are represented. The common method of determination of open-circuit voltage based on the relation between the separation of quasi-Fermi levels and intrinsic concentration in semiconductors is defined.

*Keywords.* Solar cells, efficiency, open-circuit voltage, separation of quasi-Fermi levels.

Для оптимизации параметров и конструкции солнечных элементов необходимо знать их ключевые характеристики. Одной из таких характеристик является напряжение холостого хода  $U_{xx}$ . Целью данной работы является анализ существующих способов определения значения напряжения разомкнутой цепи и пределов их применимости для расчета в гомопереходных фотоэлектрических преобразователях.

Для оценки эффективности работы солнечного элемента  $\eta$  необходимо знать такие параметры, как напряжение холостого хода  $U_{xx}$ , ток короткого замыкания  $I_{кз}$  и коэффициент заполнения ВАХ  $FF$  [1]:

$$\eta = \frac{U_{xx} \cdot I_{кз} \cdot FF}{P_{in}}, \quad (1)$$

где  $P_{in}$  – мощность падающего на элемент солнечного излучения.

Для теоретического расчета напряжения холостого хода используют несколько подходов:

1. Определение  $U_{xx}$  из уравнения ВАХ.

Уравнение и вид ВАХ солнечного элемента (рисунок 1) имеет вид [2]:

$$J = J_s \left( e^{\frac{q \cdot U_{xx}}{k \cdot T}} - 1 \right) - J_f, \quad (2)$$

где  $J$  – полный ток, протекающий через СЭ,  $J_s$  – ток насыщения,  $q$  – элементарный заряд,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $I_f$  – фототок.

В режиме холостого хода, когда  $I=0$ , уравнение принимает вид:

$$U_{xx} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_f}{J_s} + 1\right). \quad (3)$$

Таким образом, зная значение фототока и тока насыщения, протекающего через p-n переход, можно оценить значение напряжения холостого хода. При этом уравнение справедливо для любых значений токов.

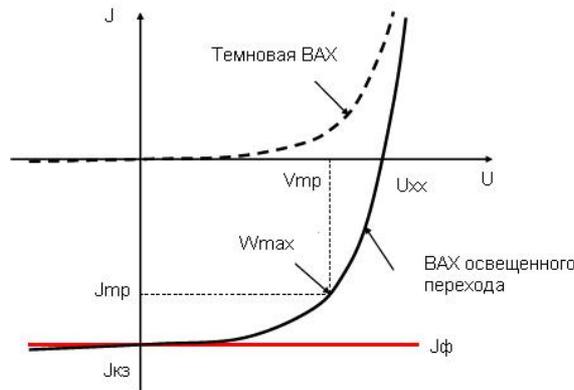


Рис. 1. ВАХ солнечного элемента

2. Определение  $U_{xx}$  как разницы между квазиуровнями Ферми в режиме холостого хода.

Под действием освещения или других явлений, например инжекции носителей заряда, равновесие в системе контактирующих полупроводников нарушается из-за появления неравновесных носителей заряда. При неравновесных условиях уровень Ферми заменяют на квазиуровень Ферми [3]. В разомкнутой цепи идеализированного солнечного элемента разница между квазиуровнями Ферми будет соответствовать напряжению холостого хода (рисунок 2).

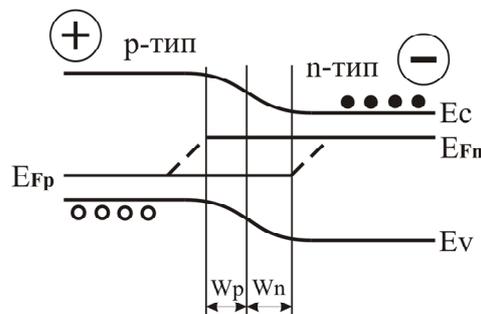


Рис. 2. Зонная диаграмма солнечного элемента в режиме холостого хода

Разницу между квазиуровнями Ферми можно определить несколькими способами:

1. Через «неравновесный закон действующих масс».

При равновесных условиях выполняется «закон действующих масс»:

$$p_0 \cdot r_0 = n_i^2, \quad (4)$$

где  $p_0$  – равновесная концентрация дырок,  $n_0$  – равновесная концентрация электронов,  $n_i$  – собственная концентрация носителей зарядов.

Однако при неравновесных условиях данное соотношение несправедливо. При этом связь концентрации дырок и электронов с собственной концентрацией определяют по следующим соотношениям [3]:

$$n = n_i \cdot e^{\frac{E_{\phi n} - E_i}{k \cdot T}}, \quad (5)$$

$$p = ni \cdot e^{-\frac{E_{\Phi p} - E_i}{k \cdot T}}, \quad (6)$$

где  $E_i$  – положение энергетического уровня, соответствующего середине запрещенной зоны полупроводника,  $E_{\Phi n}$  – положение квазиуровня Ферми для полупроводника  $p$ -типа,  $E_{\Phi p}$  – положение квазиуровня Ферми в полупроводнике  $n$ -типа. В данных соотношениях концентрации  $n$  и  $p$  определяются как:

$$n = \Delta n + n_0; \quad p = \Delta p + p_0, \quad (7)$$

$\Delta p$  – избыточная концентрация дырок,  $\Delta n$  – избыточная концентрация электронов.

Таким образом, произведение концентраций дает:

$$U_{xx} = E_{\Phi n} - E_{\Phi p} = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{n \cdot p}{ni^2}\right). \quad (8)$$

Полученное соотношение имеет наиболее универсальный характер, справедливо для любого уровня возбуждения и, следовательно, не имеет ограничений. Более того, уравнение справедливо не только для гомопереходных солнечных элементов, но и для гетеропереходных. Так, например, в работах [4,5] на основе данного соотношения определяли напряжение холостого хода в гетероструктурных фотоэлектрических преобразователях типа НІТ.

2. Через эффективную плотность состояний.

Выразим собственную концентрацию через эффективную плотность состояний:

$$ni^2 = n_0 \cdot p_0 = N_c \cdot N_v \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}}, \quad (9)$$

где  $E_g = E_c - E_v$  – ширина запрещенной зоны,  $N_c$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости,  $N_v$  – эффективная плотность состояний в валентной зоне.

При неравновесном состоянии общую концентрацию электронов и дырок можно определить как [3]:

$$n = N_c \cdot e^{-\frac{E_c - E_{\Phi n}}{k \cdot T}}, \quad (10)$$

$$p = N_v \cdot e^{-\frac{E_{\Phi p} - E_v}{k \cdot T}}. \quad (11)$$

Соответственно произведение концентраций позволяет получить разницу квазиуровней Ферми:

$$U_{xx} = E_{\Phi n} - E_{\Phi p} = E_g - k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_c \cdot N_v}{n \cdot p}\right). \quad (12)$$

Если подставить (9) в (12), получим (8). Однако между выражениями (8) и (12) есть принципиальная разница. Выражение (12) и сам подход справедливо применять только для солнечных элементов с известными значениями эффективных плотностей состояний. В некристаллических полупроводниках говорить о значении эффективной плотности состояний сложнее, поскольку нарушается упорядоченность в расположении атомов в полупроводнике.

Оценочный расчет разницы между квазиуровнями Ферми, проведенный по формулам (8) и (12), показал, что в кремниевых солнечных элементах при:

$$\Delta n = \Delta p = 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad Nd = 10^{15} \text{ см}^{-3}, \quad Na = 10^{18} \text{ см}^{-3}, \quad N_c = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, \\ N_v = 1.04 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, \quad ni = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

имеем  $U_{xx}$ , рассчитанное по (8), равно 0.777 В;  $U_{xx}$ , рассчитанное по (12), равно 0.791 В.

Разница в полученных значениях зависит от заданных значений  $N_c$  и  $N_v$ .

Таким образом, в работе был проведен анализ методов определения напряжения холостого хода. Был сделан вывод, что при определенных условиях применимы разные подходы. При этом соотношение (8), которое устанавливает взаимосвязь между положением квазиуровней Ферми и собственной концентрацией, имеет наиболее универсальный характер, позволяя рассчитывать  $U_{xx}$  как для кристаллических, так и для некристаллических полупроводников, гомо- и гетероструктурных солнечных элементов.

### Библиографический список

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент/ пер. с англ. под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 2: пер. с англ. – 2-е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Орешкин П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высшая школа. 1977. – 448 с.
4. А.В. Саченко, А.И. Шкретий, Р.М. Коркишко, В.П. Костылев, Н.Р. Кулиш, И.О. Соколовский. Особенности фотопреобразования в высокоэффективных кремниевых солнечных элементах// Физика и техника полупроводников, 2015. Т. 49, вып. 2. С. 271-277.
5. А.В. Саченко, Ю.В. Крюченко, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, А.С. Абрамов, А.В. Бобыль, И.Е. Панайотти, Е.И. Теруков. Метод оптимизации параметров гетеропереходных фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния// Физика и техника полупроводников, 2016. Т. 50, вып.2. С. 259-263.

УДК 681.512.001.56; ГРНТИ 28.17.23

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ ПРАКТИКУМАХ**

### **КАФЕДРЫ МИКРО-И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ РГРТУ**

**С.И. Мальченко, Т.А. Холомина, А.В. Шилин, М.В. Зубков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, malsj@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические особенности разработки программного обеспечения лабораторных практикумов для моделирования процессов в материалах и приборах электронной техники и экологического мониторинга. Обсуждаются примеры реализации лабораторных работ по ряду дисциплин в среде инженерного графического программирования LabVIEW, разработанных на кафедре МНЭЛ РГРТУ.

*Ключевые слова.* Лабораторная работа, виртуальная лаборатория, физические процессы.

## **APPLICATION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGY IN LABORATORY PRACTICAL CLASSES OF DEPARTMENT OF MICRO- AND NANOELECTRONICS OF RSREU**

**S.I. Malchenko, T.A. Khololina, A.V. Shilin, M.V. Zubkov**

*Ryazan state radio engineering university,  
Russia, Ryazan, malsj@mail.ru*

*Abstract.* Theoretical and practical features of software development for laboratory practical classes in order to simulate processes in materials, electronic devices and ecological monitoring are considered. Examples of implementation of laboratory practical work in different disciplines in a system-design platform and development environment for a visual programming language LabVIEW developed by department of micro- and nanoelectronics of RSREU are discussed.

*Keywords.* Laboratory practical work, virtual laboratory, physical processes.

В настоящее время в специализированной литературе, интернете, научных и педагогических кругах широко обсуждаются особенности применения виртуальных лабораторий (ВЛ) в различных сферах науки, техники и педагогики [1-3]. Для реализации таких лабораторий используют различные типы прикладного программного обеспечения (ПО). Согласно классификации [1] виртуальные лаборатории можно отнести к разряду учебно-исследовательского программного обеспечения.

Учебно-исследовательское ПО классифицируют по ряду признаков. По приложениям различают программы для механики твердого тела, гидравлики, теплофизики, электроники, электромеханики, архитектуры и строительства и др. Наряду с проблемно-ориентированными средствами существуют программы, инвариантные к приложениям, например некоторые программы оптимизации или математические пакеты типа Mathematica, Maple V, MathCAD.

По тематической направленности большинство программ ВЛ можно отнести к одной из следующих групп:

- математические пакеты;
- программы математического моделирования;
- системы машинной графики и геометрического моделирования;
- программы оптимизации, структурного синтеза и принятия решений;
- системы управления базами данных и знаний;
- средства CASE-технологий;

- средства CALS-технологий.

По характеру прав пользования различают программы коммерческие, т.е. доступные для приобретения на рынке; частные программы собственной разработки организации, предоставляющей образовательные услуги; свободно распространяемые средства.

Другими признаками классификации являются ориентация на ту или иную программно-аппаратную платформу, уровень требований к используемым аппаратным ресурсам, способ использования в среде распределенных вычислений и др.

К сожалению, в литературе и интернете не часто можно встретить обсуждение виртуальных лабораторий или лабораторных работ, проводимых в технических вузах, которые в настоящее время испытывают существенный недостаток материально-технического снабжения. Приобретение современных приборов и оборудования для проведения лабораторных работ в технических вузах существенно затруднено.

В этой связи преподаватели вузов стараются использовать прикладное программное обеспечение для создания различных виртуальных лабораторий и лабораторных работ. При этом возникают неоднозначные методические аспекты использования ВЛ и лабораторных работ. Вот как в [1] авторы рассматривают эти аспекты, с которыми трудно не согласиться.

«В учебном процессе переход к математическому моделированию часто порождает следующие возражения: во-первых, поскольку при использовании современных развитых программ моделирования обучаемый отстраняется от выбора формул, разработки алгоритма, выполнения промежуточных расчетов, то он не приобретает навыков в использовании традиционных расчетных методик, во-вторых, без выполнения ручных расчетов от его внимания могут ускользнуть имеющиеся связи между различными параметрами и факторами, в-третьих, обучаемый не приобретает навыков в работе с реальными измерительными приборами, установками и другими материальными объектами»

Первые два возражения легко парируются. Действительно, ориентировочные ручные расчеты и экспресс-оценки должны оставаться в учебном процессе, а математическое моделирование заменяет не столько простые расчеты, сколько физическое макетирование. При этом именно математическое моделирование, благодаря легкости варьирования исходными данными, позволяет более глубоко исследовать влияние различных параметров и факторов на характеристики процессов и объектов. Нужно лишь методически правильно спланировать серию экспериментов с математической моделью, включив в учебные задания изучение соответствующих зависимостей на модели, расчет коэффициентов чувствительности, формулировку выводов и т.п.

Третье возражение более серьезно, но оно не противопоставляет «ручные» расчетные методики и математическое моделирование, а лишь приводит к необходимости в учебных планах и программах сохранять некоторый необходимый объем практических работ как непосредственно на реальном оборудовании, так и в лабораториях удаленного доступа. Таким образом, применение виртуальных лабораторий и лабораторных работ, особенно в некоторых специфических дисциплинах технических вузов, в ряде случаев не имеет альтернативы.

В настоящее время предлагается широкий набор ПО для реализации математического моделирования и формирования виртуальных лабораторных работ. В РГРТУ приобретен пакет программ инженерного графического программирования LabVIEW американской фирмы National Instruments для использования этого ПО как в учебных, так и в научных целях [4], что позволило применять его при разработке виртуальных лабораторных работ.

На кафедре микро- и наноэлектроники (МНЭЛ) РГРТУ на протяжении ряда лет используются виртуальные лабораторные работы в дисциплинах «Материалы электронной техники», «Физика наносистем», «Методы исследования наноматериалов микро- и наносистем», «Экологические приборы и комплексы» и др.

При разработке таких лабораторных работ основное внимание было обращено на отображение измерительных приборов, с помощью которых студенты измеряют параметры и характеристики материалов и образцов, что позволяет более глубоко понять теорию процессов, протекающих в различных материалах и приборах. При этом основные расчеты полученных параметров и построение различных характеристик материалов студенты

выполняют самостоятельно с применением малой оргтехники или известных прикладных программ типа Excel.

Рассмотрим, например, виртуальную лабораторную работу по исследованию сопротивления твердых диэлектриков. Для ее аппаратной реализации в реальных условиях потребовался бы измеритель малых значений токов до  $10^{-15}$  А. Такие приборы используются обычно в научных исследованиях в условиях исключительной экранировки, а применение в учебных целях вызывает большие (в том числе материальные) сложности. В виртуальной лабораторной работе студентам предлагается широкий выбор «материалов», измерение удельного сопротивления которых в реальности провести достаточно сложно. На учебном стенде приведена краткая характеристика исследуемых материалов, как показано на рис. 1,а.

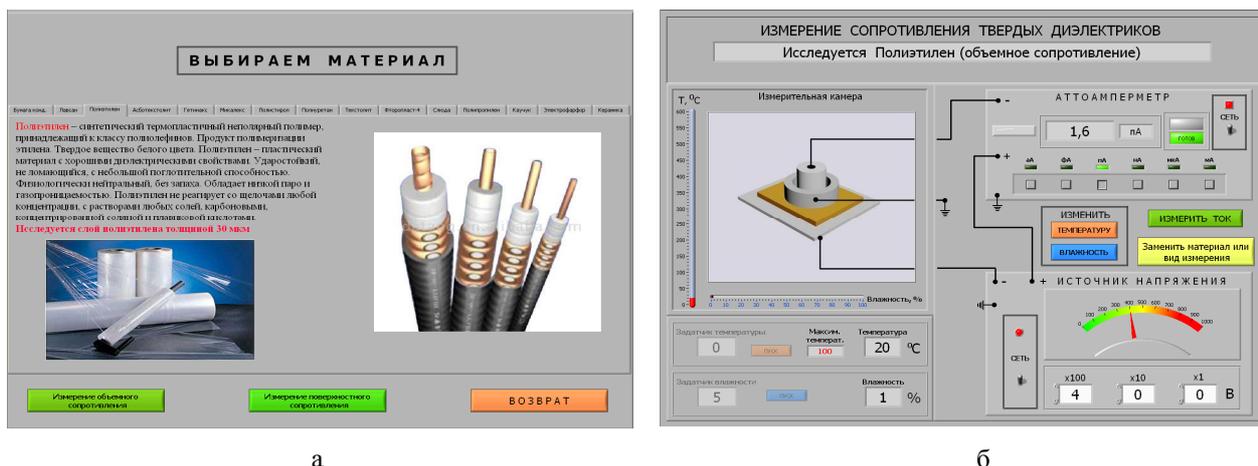


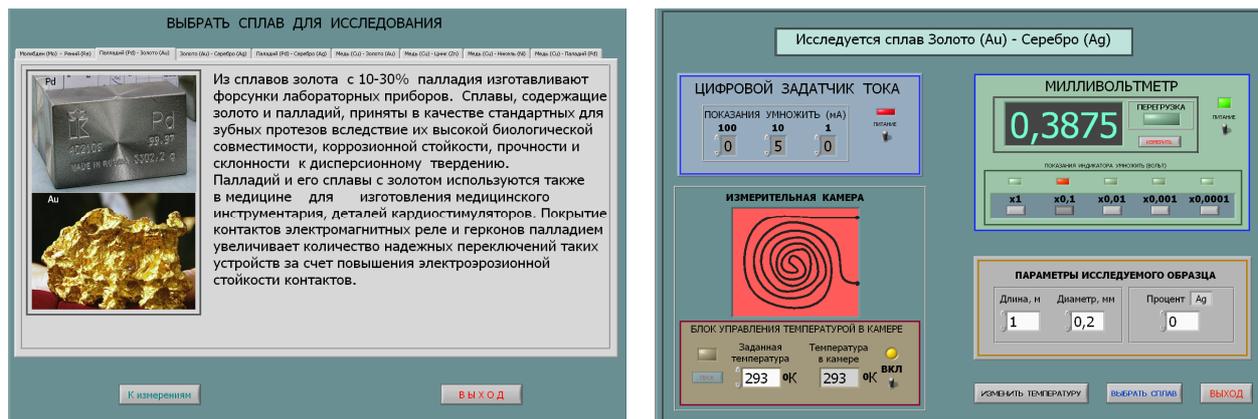
Рис. 1. Внешний вид окон в виртуальной лаборатории по исследованию сопротивления твердых

На рис. 1,б показаны измерительные приборы, которыми пользуются студенты, и виртуальная измерительная камера с электродами для измерения сопротивления. В этой лабораторной работе студенты исследуют температурную зависимость сопротивления диэлектриков с построением количественного графика  $\log(R)$  от  $1/T$  ( $R$  - сопротивление, образца.  $T$  - температура), по которому рассчитывают энергию активации проводимости диэлектрика, исследуют зависимость поверхностного сопротивления от влажности воздуха. Провести такие исследования в реальных условиях за время, отведенное на лабораторную работу, практически невозможно.

Математические модели зависимости параметров изучаемых материалов от температуры и влажности в этой лабораторной работе реализуются достаточно просто, т.к. описываются экспоненциальными зависимостями. В математическую модель дополнительно вводится случайный разброс параметров образцов материалов, отображающий погрешность приборов при проведении измерений. Параметры и характеристики «виртуальных» материалов соответствуют данным, приведенным в общеизвестной справочной литературе [5].

Другим примером виртуальной лабораторной работы является работа по исследованию удельного сопротивления металлов и сплавов от температуры и состава компонентов [6]. Провести такое исследование в реальных условиях сможет не каждая научная лаборатория. Необходимы экспериментальная камера с нагревательной и измерительной системами, работающими в диапазоне температур от единиц до нескольких сотен кельвинов, а также серии образцов металлических сплавов с различными концентрациями компонентов. На помощь приходит виртуальная лаборатория.

В этой лабораторной работе предполагается, что студенты изучают удельное сопротивление образца сплава в виде тонкой проволоки известного диаметра и длины при пропускании через нее тока заданной величины и измерении падения напряжения на образце с помощью образцового милливольтметра. При выборе материала сплавов на стенде приводятся их краткая характеристика и области применения. Такое окно виртуальной лабораторной работы показано на рис. 2,а., а приборы и измерительная камера на рис. 2,б.



а б  
Рис. 2. Внешний вид окон виртуальной лаборатории по исследованию температурной зависимости удельного сопротивления металлических сплавов

При заданной температуре студенты измеряют напряжение на образце и определяют сопротивление при известном значении тока. По известным геометрическим размерам (длина, диаметр) рассчитывают удельное сопротивление сплава. Затем строят графики зависимости удельного сопротивления сплава от температуры, а при постоянной температуре строят графики зависимости удельного сопротивления сплава от процентного содержания компонентов.

Еще одним примером виртуальной лабораторной работы является термический анализ металлических сплавов. Для проведения термического анализа в реальной лаборатории необходимо иметь серию металлических сплавов с вариацией концентраций компонентов от 0 до 100 %. Сплав конкретного состава необходимо довести до температуры плавления и затем в течение длительного времени подвергнуть медленному охлаждению (кристаллизации), соблюдая равновесный характер процесса. В процессе кристаллизации сплава необходимо контролировать его температуру и, построив график изменения температуры, отметить на нем характерные критические точки.

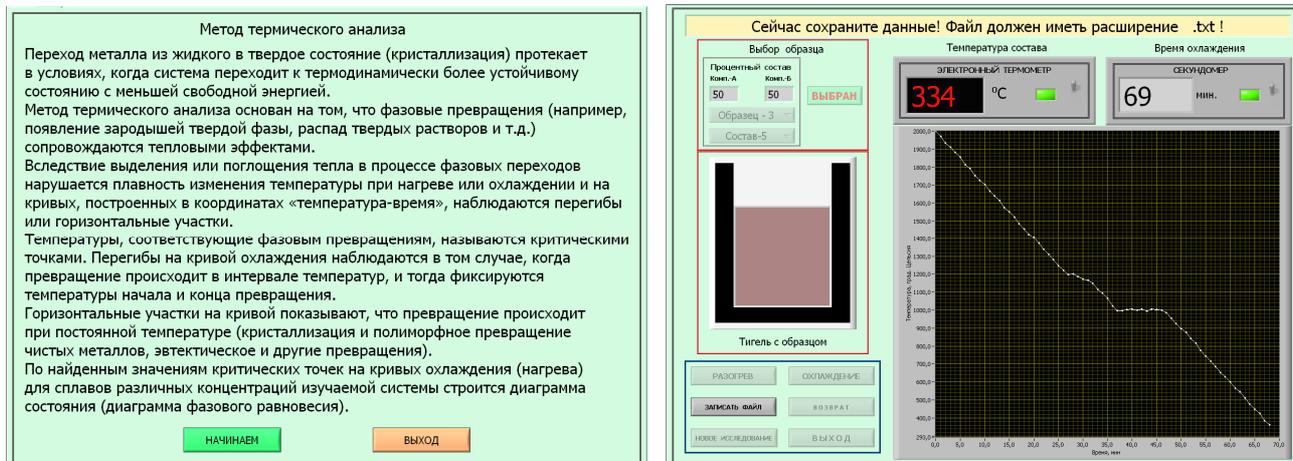
Затем такие же исследования необходимо провести со сплавом другого (третьего, четвертого и т.д.) состава и, получив несколько графиков изменения температуры в процессе кристаллизации расплава, построить диаграмму состояния – графическое изображение на плоскости фазового состава и критических точек сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов.

Постановка подобной лабораторной работы в помещениях вуза не просто затруднительна в силу значительных технических и аппаратных проблем, но сопряжена с проблемами охраны труда и техники безопасности в лаборатории. Однако знание теоретических и прикладных разделов металловедения необходимо каждому техническому работнику с высшим образованием. В этом случае выход из положения обеспечивает виртуальная лабораторная работа.

На кафедре МНЭЛ разработана подобная лабораторная работа на основе пакета программ инженерного графического программирования LabVIEW. Работа начинается описанием общих принципов термического анализа, как показано на рис. 3,а.

Затем происходит выбор образца сплава по заданию преподавателя, выбирается содержание компонентов и начинается нагревание сплава в тигле до температуры около 2000<sup>0</sup>С. Указанная температура обеспечивает расплавление всех имеющихся образцов сплавов. По окончании нагревания начинается охлаждение расплава и на графике, динамически появляющемся на графической панели стенда, отображается кривая изменения его температуры, как показано на рис. 3,б. В программе предусмотрен случайный разброс параметров температуры, отражающий погрешность приборов.

В учебных целях для анализа предлагается восемь различных составов одного сплава. Студенты могут записать массив данных графика конкретного состава в файл и затем провести его анализ в программе, например Excel. На основании этих восьми графиков обучающимся необходимо построить диаграмму состояния конкретного сплава.



а

б

Рис. 3. Внешний вид окон виртуальной лабораторной работы по термическому анализу металлических

В описанных выше виртуальных лабораторных работах можно было сразу выдать студентам заранее полученные экспериментальные данные и поставить задачу построения соответствующих характеристик, однако, на наш взгляд, это было бы методически неправильно. В разработанном лабораторном практикуме студенты экспериментально изучают на моделях необходимые зависимости и производят самостоятельные итоговые расчеты. Таким образом, виртуальная модель объекта используется как замена оборудования, использовать которое в учебных лабораториях вуза не всегда возможно, но дальнейший процесс выполнения виртуальной лабораторной работы ничем не отличается от традиционного.

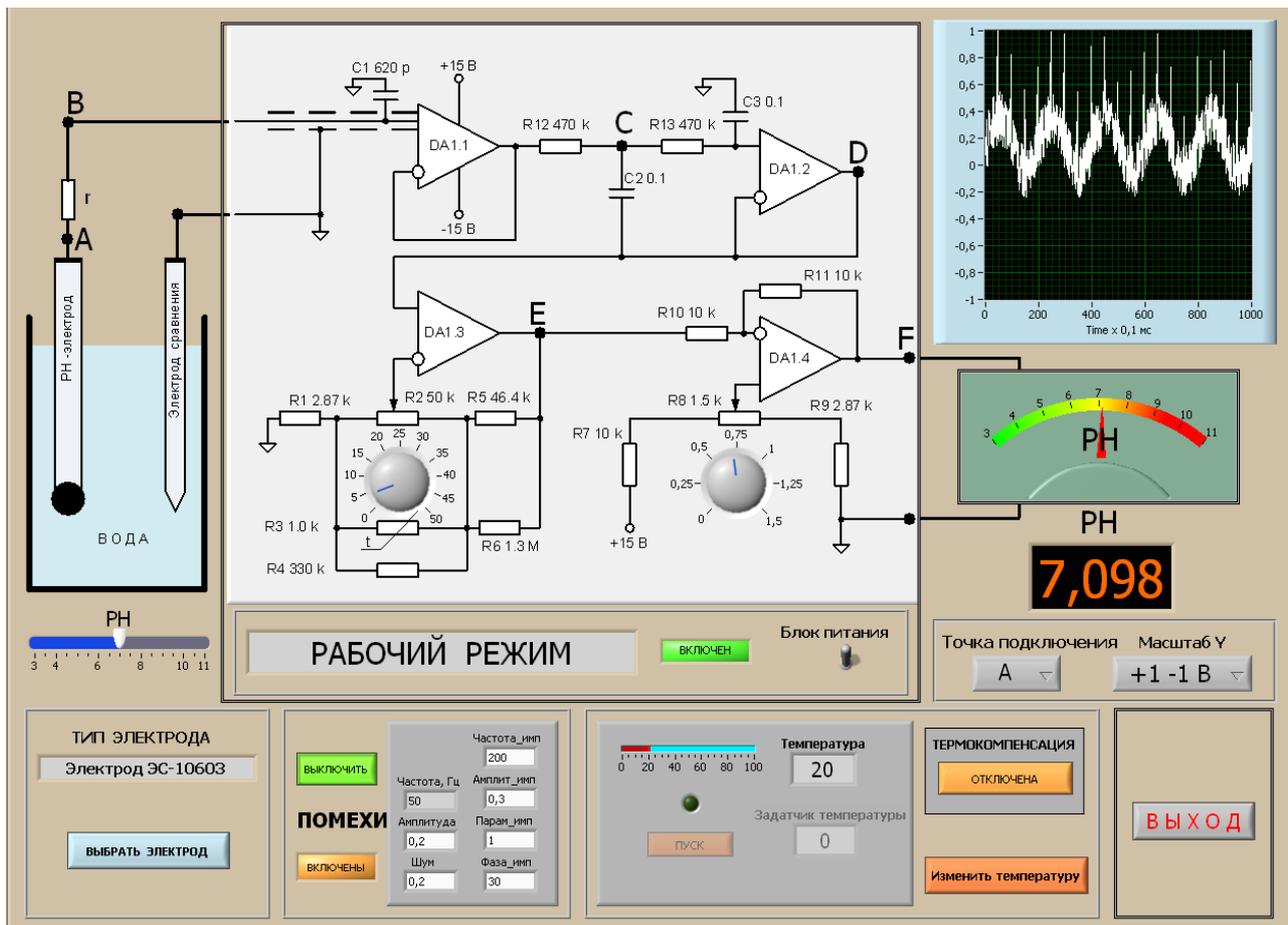
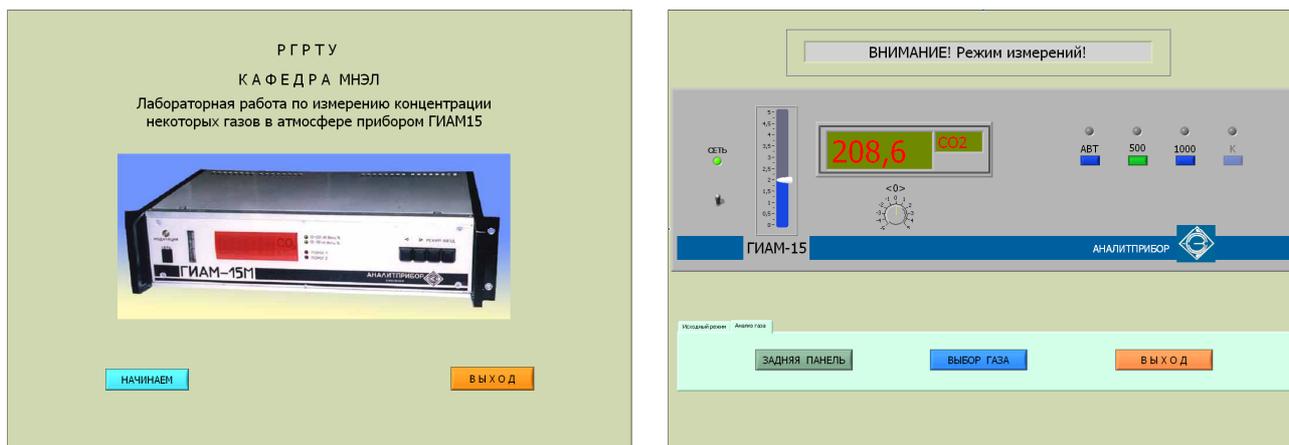


Рис. 4. Внешний вид экрана ПК виртуальной лабораторной работы «Исследование прибора Рн-метр»

Другой пример лабораторной работы несколько отличается от вышеописанных. Она предназначена для изучения принципов работы прибора *ph*-метр в курсе «Экологические приборы и комплексы». В этой лабораторной работе на экране ПК отображаются схема прибора и осциллограф, который можно подключить к разным точкам прибора (рис. 4). Студенты исследуют схему прибора, влияние помех различного вида на точность показаний прибора, влияние температуры на показания прибора с температурной компенсацией и без нее. Изменяется *ph* «виртуального раствора» и оценивается точность измерения прибора. Предусмотрена возможность использования различных электродов и измерения их параметров.

Поставить такую работу в реальных условиях в лаборатории вуза достаточно сложно. Необходимо купить прибор, создать растворы с разными значениями *ph*, сформировать воздействие различных помех на высокоимпедансный *ph* электрод, изменять температуру раствора и т.п. Все это выполнить достаточно сложно, но в виртуальной работе все это легко реализуется, и теоретическая подготовка студентов не страдает от «виртуализации» некоторых процессов.

Следующая лабораторная работа также разработана в среде LabVIEW и направлена на изучение выполнения измерений концентраций вредных газов в атмосфере выпускаемым отечественной промышленностью прибором типа ГИАМ-15. В начальном окне программы виртуальной лабораторной работы отображается внешний вид такого прибора (рис. 5,а), и затем происходит переход на переднюю панель с основными элементами управления, какие есть в реальном приборе (рис. 5б).



а

б

Рис. 5. Внешний вид экранов ПК виртуальной лабораторной работы по «измерению концентрации некоторых газов в атмосфере прибором ГИАМ-15»

Логика работы с виртуальным прибором в основном соответствует инструкции по эксплуатации реального прибора ГИАМ-15. К реальному прибору обязательно следует подключать специфическое газобаллонное оборудование. Последовательность подключения такого оборудования строго оговаривается в инструкции на такой прибор. Процесс измерения строго регламентирован инструкцией.

Можно представить себе, насколько сложно реализовать все это в рамках учебной лаборатории вуза. Однако в виртуальном режиме все достаточно просто. На рис. 6 представлено «виртуальное газобаллонное оборудование» лабораторной работы. Оно полностью моделирует работу реального оборудования, подключаемого к прибору ГИАМ-15.

Для проведения измерений полностью воспроизводится последовательность действий с элементами этого оборудования. В нужной последовательности следует открывать и закрывать клапаны в соответствующих баллонах, устанавливать расход газов, на передней панели прибора производить калибровку прибора и т.д. Неправильные действия студентов программа отслеживает, сообщает, предупреждает и подсказывает правильный вариант действий (рис. 7).

Эта лабораторная работа позволит студентам не только теоретически изучить принципы измерения концентрации некоторых газов в атмосфере, но и познакомиться с правилами обращения с промышленным прибором при проведении измерений. На наш взгляд, альтернативу такой виртуальной лабораторной работы весьма трудно реализовать в реальном виде.

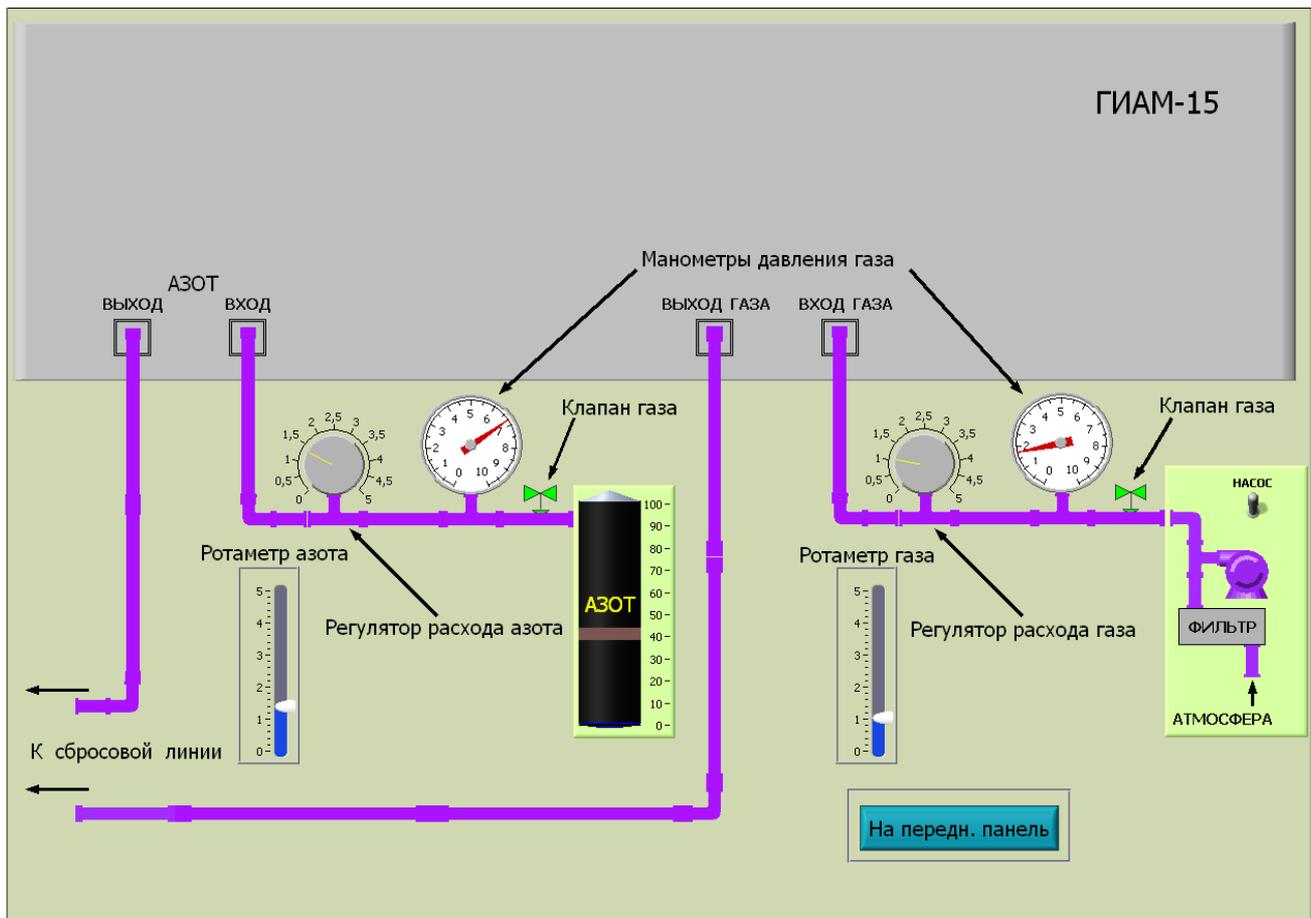


Рис. 6. «Виртуальное газобаллонное оборудование» лабораторной работы

Еще один вид виртуальных лабораторных работ относится к дисциплине «Методы исследования наноматериалов микро- и наносистем». На кафедре разработан учебно-исследовательский комплекс для получения и анализа спектров релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ) в барьерных структурах. Для проведения таких исследований приобретено дорогостоящее научное оборудование. В учебно-исследовательский комплекс входят аппаратно-приборная часть и программа обработки спектров, выполненная на основе среды инженерного графического программирования LabVIEW.

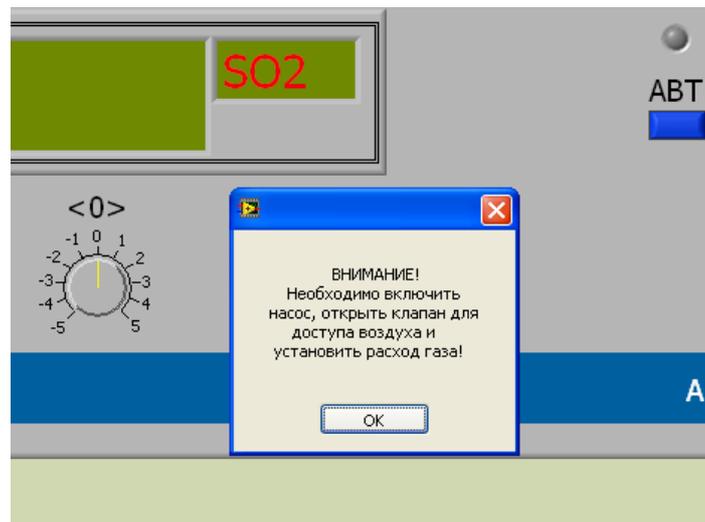


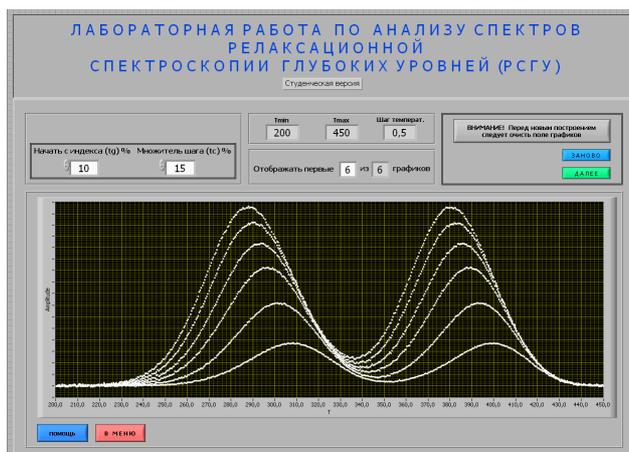
Рис. 7. Предупреждающее сообщение программы

Формирование реальной лабораторной работы на основе такого оборудования является сложной задачей. Во-первых, процесс измерения может длиться несколько часов, во-вторых, для проведения исследований необходимы специальные образцы, в-третьих, неверные манипуляции студентов с таким оборудованием (это нельзя исключить) приведут к выходу его из строя. Тем не менее, для обучения студентов современным методам исследования и анализа наноматериалов и микро- и наносистем было решено сформировать виртуальную лабораторную работу только из программной части этого учебно-исследовательского комплекса. Студентам предлагается провести анализ спектров РСГУ «виртуальных» образцов, модели которых заранее сформированы на основании реальных и учебных спектров с весьма специфическими параметрами.

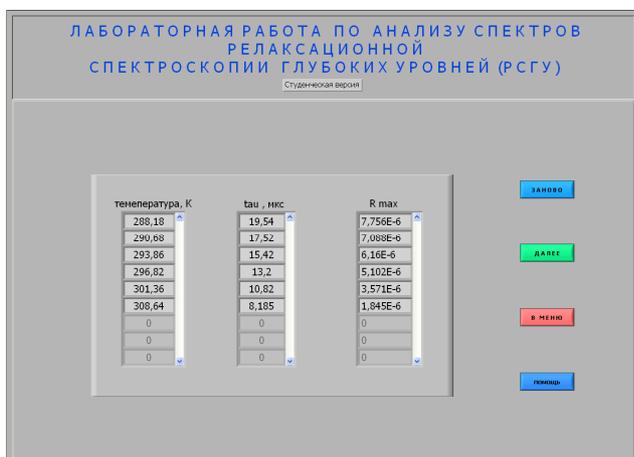
Внешний вид окон, отображаемых на экране ПК этой виртуальной лабораторной работы, показан на рис. 8. В этой работе перед студентами стоят задачи анализа и обработки спектров, отображаемых на экране. На рис. 8,а показано приветственное окно программы.



а



б



в



г

Рис. 8. Внешний вид окон виртуальной лабораторной работы по анализу спектров при релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ)

Рис. 8,б иллюстрирует предлагаемый для анализа спектр РСГУ. После предварительной обработки спектра средствами программы (путем фиксации положения максимумов спектра) студенты получают массивы данных, представленные на рис. 8 в,г. На основании этих данных они строят прямую Аррениуса и затем, используя программу MathCAD, рассчитывают энергии ионизации глубоких уровней.

Описанный пример - свидетельство возможности проведения тонких физических экспериментов в учебных целях, что позволяет студентам осуществить закрепление навыков теоретического характера и дает практическую возможность провести анализ «реальных» спектров РСГУ, что в реальных условиях реализовать сложно.

Таким образом, разработка и применение в учебном процессе кафедры МНЭЛ РГРТУ виртуальных лабораторных работ позволили организовать обучение студентов современным методам исследования параметров и характеристик материалов электронной техники, микро- и нанoeлектроники на базе использования новых информационных технологий.

### Библиографический список

1. Виртуальные лаборатории. [http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=095\\_Educ/edu025.mod/?cou](http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=095_Educ/edu025.mod/?cou) (20.01.2016).
2. Обучение и наука все больше виртуализируются: цифровые лаборатории становятся естественным инструментом школьного и университетского образования. <http://zillion.net/ru/blog/247/virtual-nyie-laboratorii-dlia-distsionnogho-obucheniia-vuzov-i-shkol> (20.01.2016).
3. Савкина А. В. Виртуальные лаборатории в дистанционном обучении [http://ifets.ieee.org/russian/depository/v17\\_i4/pdf/7.pdf](http://ifets.ieee.org/russian/depository/v17_i4/pdf/7.pdf) (18.01.2016)
4. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: пер. с англ. Клушин Н.А. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.
5. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т./ под. ред. Корицкого и др. Изд. 3-е, перераб.- М.: Энергоатомиздат, 1987.-464 с.
6. Ермачихин А.В., Литвинов В.Г., Мальченко С.И., Холомина Т.А., Холомин А.Ю. Цикл лабораторных работ по теоретическому изучению свойств металлов и сплавов на основе виртуальных лабораторий// Инженерные и научные приложения на базе технологий NI NIDays – 2015: Сборник трудов XIV международной научно-практической конференции, Москва 27 ноября 2015 г. – М.: ДМК-пресс, 2015. – С. 209-211.

УДК 53.096; ГРНТИ 47.33.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ GAN В ХОДЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

**М.В. Мальцев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, rgrtu@rsreu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются транзисторы на основе нитрида галлия и стенд для высокотемпературных испытаний. Разработан виртуальный прибор для отображения и записи измеряемых технических параметров транзистора, приведен анализ полученных экспериментальных данных предварительных высокотемпературных испытаний.

*Ключевые слова.* GaN HEMT транзистор, высокотемпературные испытания, виртуальный прибор для отображения и записи технических параметров.

## RESEARCH OF DEGRADATION GAN TRANSISTOR DURING THE HIGH TEMPERATURE PRELIMINARY TESTS

**M.V. Maltsev**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, rgrtu@rsreu.ru*

*Abstract.* Transistors based on gallium nitride and equipment for high temperature tests are considered. Virtual instrument for displaying and recording measured technical parameters of the transistor is designed. The analysis of the experimental data of preliminary high temperature tests is carried out.

*Keywords.* GaN HEMT transistor, high temperature tests, virtual instrument for displaying and recording technical parameters.

В статье приведены исследования транзисторов на основе GaN (нитрида галлия) при помощи высокотемпературных испытаний на специализированном стенде. Целью данной работы является экспериментальное определение температуры, при которой начинается деградация технических параметров транзистора и его структуры, а также выявление причин отказов на этапе предварительных исследований.

В связи с необходимостью улучшения параметров сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем (МИС СВЧ), а также расширения возможных условий эксплуатации аппаратуры, которая работает на данных микросхемах, в последние годы активно ведутся исследования по созданию элементной базы на основе широкозонных материалов (с шириной запрещенной зоны 3-5 эВ) [1]. Одним из наиболее перспективных полупроводниковых соединений в этом плане является GaN [2]. Так как создание транзисторных структур на основе данного соединения относительно новое направление в развитии СВЧ-электроники, требуется разработка новых испытательных стендов,

программного обеспечения для управления их работой и записью данных, а также проведение исследований надежности новых изделий и улучшение методик проведения испытаний для увеличения качества готовой продукции на производстве. Перечисленные задачи были взяты за основу в ходе планирования экспериментов и дальнейших разработок. Таким образом, в данной статье представлен разработанный виртуальный прибор для вывода измеряемых показателей на индикаторные панели в программе NI Labview и записи данных в таблицы Excel, а также экспериментальные результаты предварительных испытаний GaN транзисторов.

Актуальность исследований надежности перспективных твердотельных СВЧ-изделий объясняется тем, что они дают ответ на вопрос о целесообразности дальнейших затрат, необходимых на отработку технологии и производство конкретных радиоэлектронных устройств.

Испытательный стенд, используемый в данной работе, состоит из нагревательного стола, блока управления и записи данных ТЕ20-3К, стабилизированного источника питания, системы подвода питающего напряжения, датчика температуры, модуляторов, осциллографа и ПК.

Структурно-функциональная схема испытательного стенда изображена на рис. 1.

Блок ТЕ20-3К имеет три независимых канала (каждый включается своим тумблером «сеть»); по каждому каналу выставляются: температура подогрева столика (от + 20°C до + 400°C), напряжение затвора, постоянное (от + 0,7 В до - 10 В), пределы тока затвора (100 мА или 1 А), напряжение стока, импульсное (от - 0,7 В до + 30 В), пределы тока стока (1 А или 10 А).

Блок ТЕ20-3К связан с ПК посредством АЦП платы ADLINK PCI 9114.

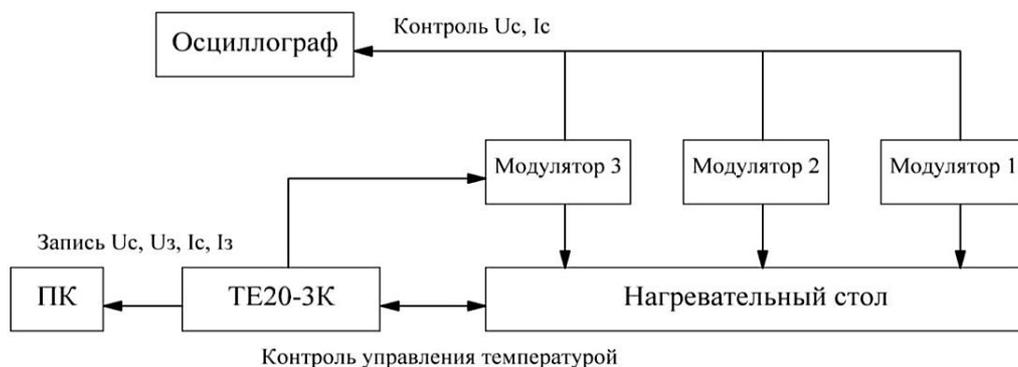


Рис. 1. Структурно-функциональная схема испытательного стенда

Программа для блока ТЕ20-3К, написанная в среде NI Labview, выполняет 2 функции:

1. Отображает (через АЦП ADLINK PCI 9114) значения: напряжение стока ( $U_c$ ), ток стока ( $I_c$ ), напряжение затвора ( $U_3$ ), ток затвора ( $I_3$ ), температуру подогрева столиков.
2. Записывает файлы тренировки испытываемых изделий. Запись можно включать и выключать в любой момент работы программы, а также задавать для нее любые интервалы времени.

На рис. 2 изображена лицевая панель разработанного виртуального прибора.



Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора для блока управления ТЕ20-3К

Для исследований были выбраны TGF2023-01 – GaN СВЧ-транзисторы фирмы TriQuint Semiconductor, изготовленные по технологии мощных дискретных GaN HEMT на теплопроводящей подложке из SiC (карбида кремния) с шириной затвора, кратной 1,25 мм, и длиной T-образного затвора 0,25 мкм [3].

Во время испытаний каждые 10 минут значения следующих технических параметров: напряжение, подаваемое на сток, напряжение на затворе, ток затвора и ток стока записывались в таблицу Excel. Таким образом, за 1 час производилось 6 измерений. Продолжительность испытаний выбрана по заданной наработке в 100 часов. Напряжения, подаваемые на транзистор во время испытаний:  $U_c = 30 \pm 0,7$  В, импульсное, длительность 10 мкс, скважность 10 и  $U_з = -3 \pm 0,1$  В. Наибольшие отклонения от фиксированных значений установленных напряжений составляли не более 3 %. Основным техническим параметром, графики которого анализировались в ходе испытаний, в данном случае являлся ток стока ( $I_c$ ).

Исходя из формулы, приведенной в [4] для расчета температуры канала HEMT транзистора, образцы в данной работе испытывались при температурах: 180, 200, 220°C. Полученные экспериментальные зависимости тока стока транзистора от времени наработки представлены на рис. 3.

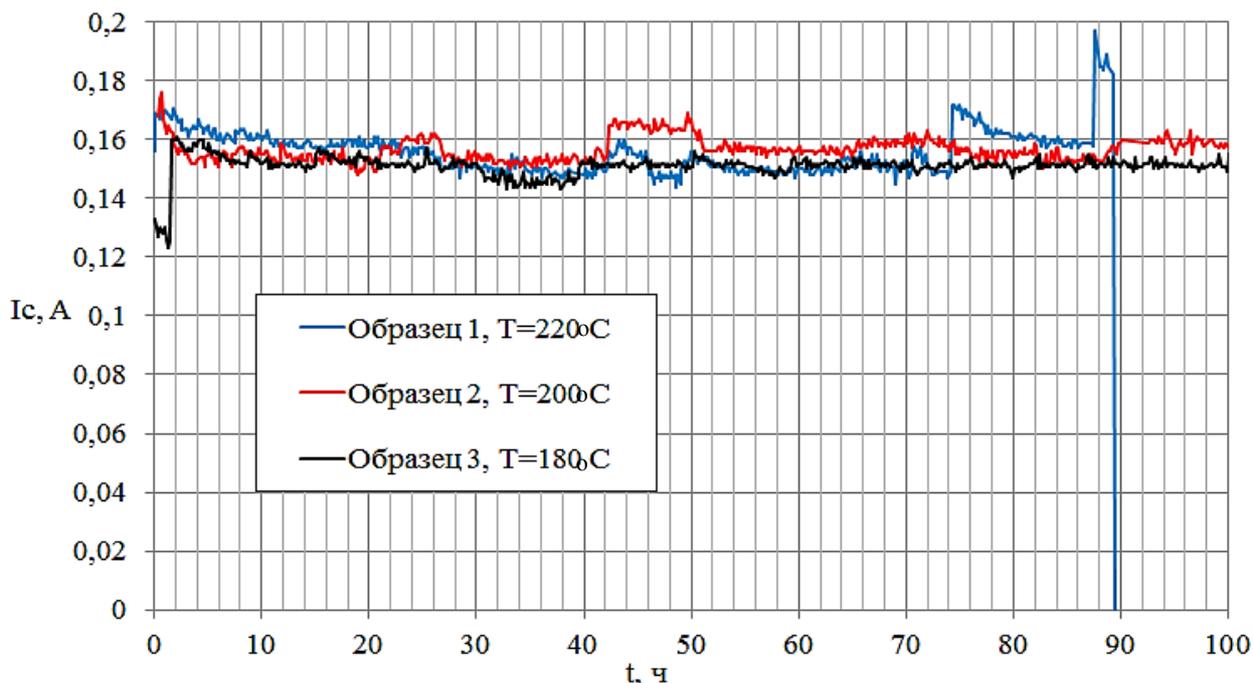


Рис. 3. Графики зависимости тока стока GaN транзисторов фирмы TriQuint от времени наработки при разных температурах

На полученных графиках (рис. 3) были выделены следующие участки:  
 первые 2 часа испытаний – прогрев, процесс перехода в выставленный температурно-электрический режим для испытаний.

2 – 25 ч – стабильный участок. Ток стока оставался в среднем постоянным для всех трех температур. При этом  $I_c(T = 220^\circ\text{C}) > I_c(T = 200^\circ\text{C}) > I_c(T = 180^\circ\text{C})$ .

25 – 70 ч – спад тока стока образца 1. Данное явление свидетельствует о начале деградации структуры транзистора. Средний ток стока упал с 0,16 А до 0,15 А.

70 – 89 ч – резкие увеличения тока стока при  $T = 220^\circ\text{C}$  и последующий выход из строя образца 1. Подобный спад тока стока образца 1 не характерен для эффекта коллапса тока, который наблюдается в транзисторах на основе GaN. Выбросы тока, предшествующие спаду, могут говорить о последовательном выходе из строя элементов цепи питания затвора. Не контролируемый резистивным делителем ток затвора поступил на транзистор, в результате чего ток в цепи сток-исток привел к выгоранию испытываемого транзистора (рис. 4).

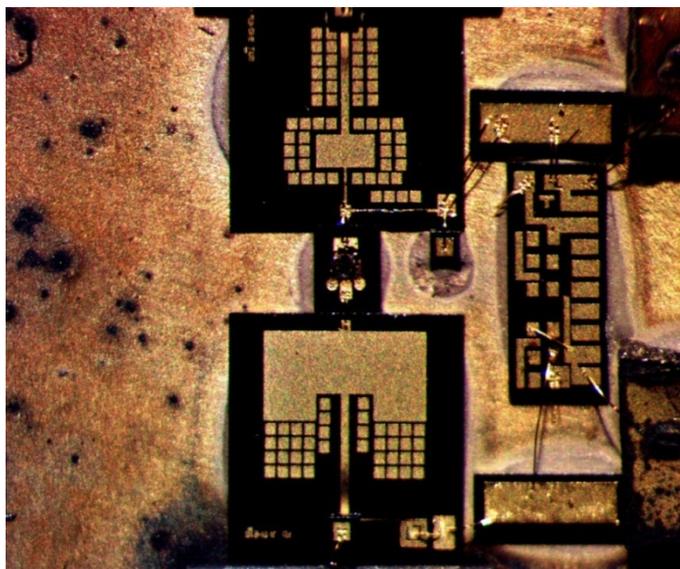


Рис. 4. Повреждения образца, цепи подачи питания, поликарбонатной рамки, контактных площадок

Ток стока при  $T = 200^\circ\text{C}$  поднялся до уровня 0,164 А на участке 52 – 60 ч, затем опустился до своего прежнего среднего значения 0,157 А. Других значительных изменений тока стока транзисторов при  $T = 200^\circ\text{C}$  и  $T = 180^\circ\text{C}$  обнаружено не было.

Таким образом, деградационные процессы в структуре транзистора в течение первых 100 часов наработки начинают проявляться при температуре нагрева  $T = 220^\circ\text{C}$ .

Из анализа раннего выгорания транзистора при испытаниях были предложены пути улучшения оснастки для высокотемпературных испытаний, которые в дальнейшем будут проводиться для изучения GaN транзисторов:

- формирование корпуса, основания и рамки оснастки из ковара;
- замена подложки из GaAs (арсенида галлия) для цепи подачи питания на сапфировую ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях надежности GaN транзисторов. В настоящее время идет процесс доработки испытательного стенда для высокотемпературных испытаний и отработки методик их проведения. Это в дальнейшем позволит с высокой точностью оценивать показатели надежности разрабатываемых транзисторов на нитриде галлия.

Следует отметить, что динамичное развитие нового перспективного направления твердотельной СВЧ-электроники – СВЧ-электроники на широкозонных материалах – невозможно без органической взаимосвязи методов измерения, контроля надежности и технологических методов изготовления СВЧ-приборов и модулей на их основе.

### **Библиографический список**

1. Кокотов А.А., Черкашин М.В. Построение и характеристики СВЧ монолитных усилителей мощности на основе полупроводниковых материалов GaAs, GaN // Доклады ТУСУРа. 2011. №2 (24), часть 2. С. 17-22.
2. Кишинский А. Твердотельные СВЧ-усилители мощности на нитриде галлия – состояние и перспективы развития // 19-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009): материалы конференции. – Севастополь: Вебер. 2009. Т.1. С. 11–16.
3. TGF2023-01, 6 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT [Электронный ресурс]. URL: <http://www.triquint.com> (дата обращения 9.02.2016).
4. Barr B., Burkhard D. High temperature, high power RF life testing of GaN on SiC RF Power transistors // M/A-COM Technology Solutions RF Power Products Group. – Torrance, CA. – 7 p.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 47.09.48

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**А.Е. Луняков, Н.В. Рыбина, Н.Б.Рыбин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [termitko62@mail.ru](mailto:termitko62@mail.ru)*

*Аннотация.* Рассмотрено влияние рельефа поверхности материалов с квантовыми точками на их корреляционные свойства.

*Ключевые слова.* Наноструктуры, упорядоченность, квантовые точки, поверхность, самоорганизация.

### **RESEARCHING OF MODEL SURFACES OF SELF-ASSEMBLED NANOSTRUCTURED MATERIALS**

**A.E. Lunyakov, N. V. Rybina, N.B. Rybin**

*Ryazan state radio-engineering university,  
Russia, Ryazan, [termitko62@mail.ru](mailto:termitko62@mail.ru)*

*Abstract.* Reviewed the influence of the surface topography of materials with quantum dots on their correlation properties.

*Keywords.* Nanostructure, order, quantum dots, surface, self-organization.

В настоящее время одной из важнейших проблем в электронике является миниатюризация устройств. Большая часть современной электронной базы построена на кристаллическом кремнии, который устанавливает технологический предел активной области в 10 нм. При уменьшении размеров устройств возникают квантовые эффекты. Ярким примером может служить эффект туннелирования, при котором микрочастица преодолевает

потенциальный барьер, когда ее энергия меньше высоты этого барьера. Проблему технологического предела помогут решить материалы с самоорганизующейся структурой, в частности структуры с квантовыми точками. Таким образом, с помощью структур с квантовыми точками можно создавать квантово-клеточные автоматы, которые, в свою очередь, на шаг приблизят нас к созданию квантовых компьютеров.

Квантовая точка может содержать в себе один электрон. Ячейка, состоящая из четырех квантовых точек, образует квадрат. После заряда такой ячейки двумя электронами она перейдет в одно из двух состояний (рис. 1). Формируя из этих ячеек структуры, можно создавать логические вентили.

Прототипы твердотельных квантовых клеточных автоматов были созданы с использованием электронно-лучевой литографии и имели размеры порядка 20 нм, что близко к длине затвора стандартных транзисторов в КМОП структурах[1]. Однако для работы им не нужно иметь сток или исток. Чтобы сформировать логические элементы, они просто должны быть расположены определенным образом.

В свою очередь использование материалов с квантовыми точками обуславливает потребность в разработке методов исследования поверхностей таких структур. Однако методов исследования, информативных для самоорганизующихся структур, не так много и к тому же отсутствуют общепринятые критерии оценки поверхности материалов с квантовыми точками.

Наиболее актуальными являются методы исследования поверхностей материалов, такие как метод средней взаимной информации (СВИ) [3] и метод флуктуационного анализа с исключенным трендом (в англоязычной литературе *detrended fluctuation analysis, DFA*)[4].

Метод СВИ позволяет выявлять порядок в структуре поверхности материала по построению двумерного распределения средней взаимной информации по ненаправленному вектору между точками поверхности.

Взаимная информация определяется как количество информации, которое становится известным относительно случайной функции в точке  $A$ , когда становится известным ее значение в точке  $B$  [4]. Если  $D$  – область определения,  $Z$  – область случайной функции,  $P_X$  – плотность распределения вероятностей в точке  $X$  (как функция на  $Z$ ),  $P_{XY}$  – совместная плотность распределения в точках  $X$  и  $Y$  (как функция на  $Z_2$ ), то взаимная информация  $I_{AB}(z_1, z_2)$  для пары известного и предсказываемого значения рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{AB}(z_1, z_2) = \log_2 \left[ \frac{P_{AB}(z_1, z_2)}{P_A(z_1) \cdot P_B(z_2)} \right]. \quad (1)$$

СВИ определяется как среднее ожидаемое значение взаимной информации для заданной пары точек путем интегрирования по  $Z^2$ :

$$I(A, B) = \iint_{Z^2} P_{AB}(z_1, z_2) \log_2 \left[ \frac{P_{AB}(z_1, z_2)}{P_A(z_1) \cdot P_B(z_2)} \right] dz_1. \quad (2)$$

СВИ, подсчитанная для двух конкретных точек, не имеет физического смысла – точки поверхности в них имеют вполне конкретные координаты  $z$  [5]. Поэтому рассчитываются так называемые «свертки» (преобразованные функции СВИ):

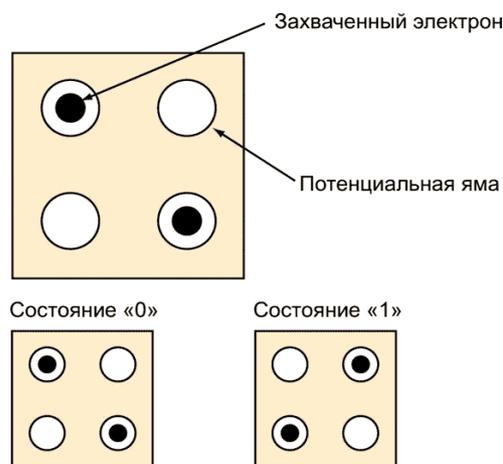


Рис. 1. Ячейка квантово-клеточного автомата[1]

$$I_s(s) = \iint_{S(d_1, d_2)=s} \frac{I(d_1, d_2)}{M_{S_D}(s)} d(d_1) d(d_2), \quad (3)$$

где  $d_1, d_2$  – обобщенные параметры точек  $A$  и  $B$  в пространстве  $D^2$  (в нашем случае  $d_1$  соответствует двум координатам  $x_1, y_1$ , а  $d_2$  –  $x_2, y_2$ ). Для каждого значения параметра  $s$  интегрирование ведется по всем парам точек, которые данная свертка отображает в новое пространство  $S_D$ ,  $I$  – определенная в (2) средняя взаимная информация между точками, характеризующимися параметром  $s$ , а  $M_{S_D}(s)$  – мера нового пространства  $S_D$ , отображаемого выбранной сверткой по параметру  $s$  в пространстве  $D^2$ .

Метод DFA представляет собой вариант дисперсионного анализа, который позволяет исследовать эффекты продолжительных корреляций в нестационарных рядах.

Метод DFA базируется на идеологии перехода от исходного временного ряда к обобщенной модели одномерных случайных блужданий [6]. Каждая реализация может быть преобразована в функцию кумулятивных сумм (профиль функции) вида:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [f(i) - \langle f \rangle], \quad (4)$$

где  $k = [1, N]$ ,  $N$  – количество элементов выбранной реализации.

Функция  $y(k)$  имеет следующую особенность: если все элементы реализации независимы (например, для гауссовой модели), то имеем случай одномерного дискретного случайного блуждания. Вероятности отрицательных и положительных приращений зависят от степени корреляции между соседними и удаленными элементами реализации, причем преобладание положительных или отрицательных корреляций свидетельствует о наличии “эффекта памяти”. На зависимостях  $y_g(k)$  и  $y_{bm}(k)$  демонстрируется, что вследствие преобладания положительных корреляций амплитуда флуктуационного профиля броуновского шума выше, чем гауссова [7].

Далее, в рамках метода профиль  $y(k)$  итерационно разбивается на неперекрывающиеся отрезки в широком диапазоне значений  $n$ , в пределах каждого из которых методом наименьших квадратов определяется уравнение прямой, аппроксимирующей последовательность  $y(k)$ . Найденная аппроксимация  $y_n(k)$  рассматривается в качестве локального тренда. Далее вычисляется среднеквадратическая ошибка линейной аппроксимации – флуктуация относительно линейного тренда:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2}. \quad (5)$$

Целью данной работы является создание модельных поверхностей самоорганизующихся наноструктурированных материалов с различными свойствами их рельефа для изучения их корреляционных свойств с помощью методов СВИ и DFA. В качестве объектов исследования выбраны материалы с nanoостровками на поверхности. На практике такой рельеф имеют структуры с незарощенными квантовыми точками.

Следует отметить, что весь процесс самоорганизации гетерогенной структуры можно разбить на 4 стадии [2](рис. 2.):

- а) наличие наноструктур различных форм и размеров, а также расположенных разупорядоченно;
- б) происходит образование структур определенной формы и размера;
- в) наноструктуры организуются упорядоченно;
- г) происходит формирование каналов связей между ними.

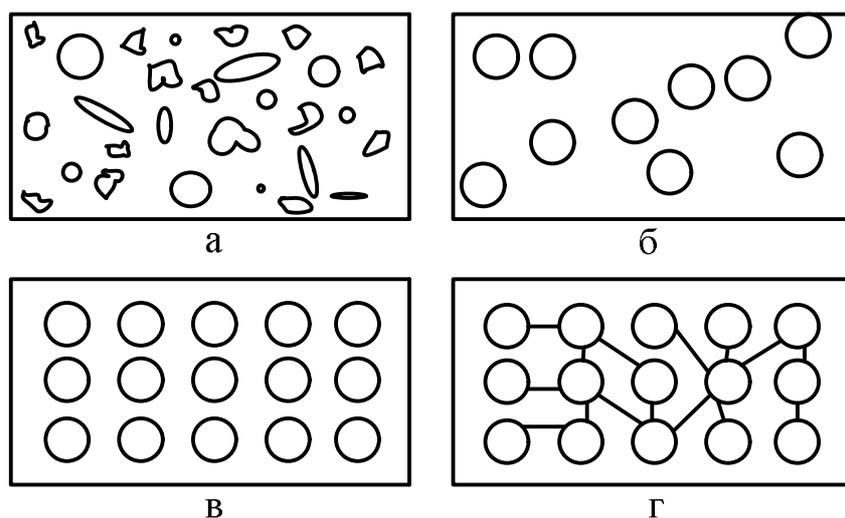


Рис. 2. Пример самоорганизации гетерогенной системы[2]

Моделирование тестовых поверхностей проводилось с помощью ПО Gwyddion и MathLab. Критерием синтеза данных структур являлось различие в свойствах латерального упорядочения массива квантовых точек на поверхности и зашумленности рельефа.

В основу будут заложены полусферические образования на поверхности, отражающие рельеф квантовых точек, и хаотическая составляющая, отражающая произвольный шум. В основу моделирования полусфер входит простейшая формула:

$$S = 2\pi R^2.$$

На рис. 3 представлены примеры модельных поверхностей с различной упорядоченностью и степенью зашумленности. Шумовая составляющая была сгенерирована с помощью нормального распределения случайных величин:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

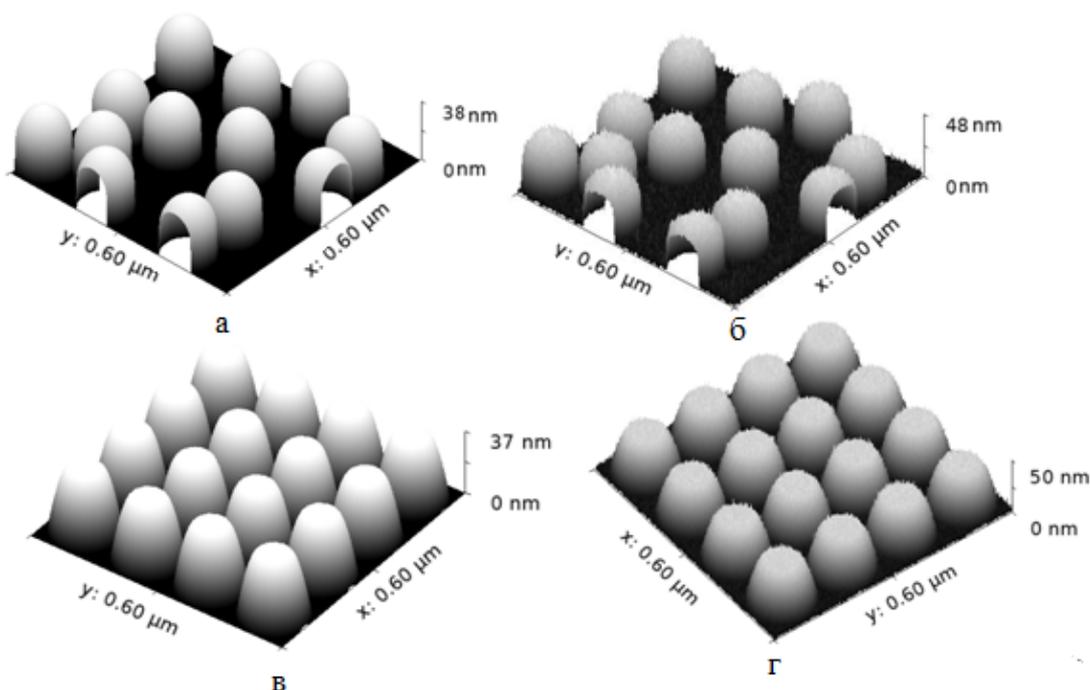


Рис. 3. Модели поверхностей с квантовыми токами: а – разупорядоченная система без шумовой составляющей; б – разупорядоченная система с шумовой составляющей в 40%; в – упорядоченная система без шумовой составляющей; г – упорядоченная система с шумовой составляющей в 40%

Далее эти структуры были исследованы методами СВИ и DFA.

В ходе исследования смоделированных наноструктурированных поверхностей с шумовой составляющей от 0% до 100% и шагом 10% была составлена таблица 1 с результатами исследования методами СВИ и DFA. Исследование наноструктур методом DFA происходило в ПО MathLab.

Таблица 1 – Корреляционные параметры исследуемых моделей

Зашумленность	Упорядоченные структуры		Неупорядоченные структуры	
	Скейлинговый показатель DFA	Корреляционный вектор, нм	Скейлинговый показатель DFA	Корреляционный вектор, нм
0%	1,99	213,9	1,986	317,2
10%	1,78	214,44	1,84	339,8
20%	1,74	214,4	1,74	355,9
30%	1,66	214,45	1,7	355,9
40%	1,62	214,455	1,53	355,9
50%	1,545	214,45	1,48	355,9
60%	1,514	214,4	1,477	355,9
70%	1,458	214,45	1,39	355,9
80%	1,438	214,4	1,358	358,7
90%	1,39	219,45	1,32	358,7
100%	1.379	219,45	1,3	355,9

По данной таблице можно сказать, что скейлинговый показатель DFA и корреляционный вектор соответствуют основным критериям DFA[2]. Для упорядоченной и неупорядоченной модельной поверхности с зашумленностью 0% скейлинговый показатель DFA равен двум с учетом незначительной погрешности. Это соответствует идеальным гармоническим структурам. При увеличении зашумленности как упорядоченных, так и неупорядоченных модельных поверхностей скейлинговый показатель уменьшался до 1,38 и 1,3 соответственно. Это означает, что на гармоническую составляющую структуру поверхности накладывается шумовая составляющая. Корреляционный вектор в зависимости от зашумленности поверхности в пределах погрешности не меняется.

Исследование методом СВИ проводилось с использованием ПО NanoInform[8].

Таблица 2 – Информационные параметры исследуемых структур

Зашумленность	Упорядоченные структуры		Неупорядоченные структуры	
	СВИ	Максимальная ВИ	СВИ	Максимальная ВИ
0%	0.0315	0.678	0.0191	0.489
10%	0.0526	0.655	0.0219	0.505
20%	0.0487	0.667	0.02	0.53
30%	0.0459	0.673	0.0185	0.55
40%	0.0435	0.677	0.0174	0.571
50%	0.0411	0.676	0.0165	0.581
60%	0.0397	0.676	0.0157	0.587
70%	0.0373	0.67	0.0152	0.607
80%	0.036	0.671	0.0142	0.607
90%	0.0344	0.666	0.0141	0.622
100%	0.0329	0.664	0.0136	0.617

Из таблицы 2 видно, что СВИ в упорядоченных и неупорядоченных структурах убывает с увеличением степени зашумленности. Это объясняется тем, что поверхности становятся более хаотическими[5]. В упорядоченных модельных структурах максимальная ВИ с увеличением зашумленности практически не меняется. В упорядоченных структурах присутствовала гармоническая составляющая, поэтому максимальная ВИ и энтропия поверхности даже в отсутствие зашумленности были достаточно высокими. При этом наложение шума на упорядоченные структуры не повышало максимальную ВИ. Для неупорядоченных структур в отсутствие зашумленности максимальная ВИ была 0.489, поэтому при увеличении зашумленности поверхностей их энтропия возрастала и, следовательно, возрастала максимальная ВИ[9].

### Библиографический список

1. Richard F. Zarr. The quest for zero power logic // *Electronics Design*. 26.03.2013 URL: <http://electronicdesign.com/analog/quest-zero-power-logic> (дата обращения 10.11.2015)
2. Рыбина Н. В. Исследование самоорганизации в структуре поверхности аморфного гидрогенизированного кремния модифицированным методом флуктуационного анализа: дис. кан. физ.-мат. наук; Рязань, 2013. 144 с.
3. А.В. Алпатов, С.П. Вихров, Н.В. Рыбина, Н.Б. Рыбин Методы исследования процессов самоорганизации: учеб. пособие; РГРТУ, Рязань, 2015. 56 с.
4. Мурсалов С.М., Бодягин Н.Б., Вихров С.П. О расчете корреляций в структуре поверхностей твердотельных материалов / Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 15. С. 53-57
5. Авачева Т.Г., Бодягин Н.В., Вихров С.П., Мурсалов С.М. Исследование самоорганизации неупорядоченных материалов с применением теории информации // *Физика и техника полупроводников*. 2008. Т. 42. Вып. 5. С. 513-51887.
6. Peng C-K., Havlin S., Stanley H.E./ Goldberger A.L. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series // *Chaos*. 1995. Vol. 5(82). P. 82-
7. Ben-Avraham D., Halvin Sh. Diffusion and reactions in fractals and disordered systems. Cambridge University Press, 2005. P. 332.
8. Авачева Т.Г., Бодягин Н.В., Вихров С.П. и др. Программа для обработки изображений профиля поверхности материала, полученных с применением атомно-силовой микроскопии, для исследования информационных характеристик структур микро- и нанoeлектроники "NanoInform". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 50200800039.
9. Алпатов А.В., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мурсалов С.М., Рыбин Н.Б., Рыбина Н.В. Комплексный метод исследования корреляционных параметров самоорганизованных структур// *ФТП*. Т. 50. Выпуск №1, 2016. С. 23-29.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОСТРУКТУР

Д.С. Кусакин, В.Г. Литвинов, А.В. Ермачихин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, [diman.62.91@mail.ru](mailto:diman.62.91@mail.ru)*

*Аннотация.* Показана возможность проведения измерений электрической емкости с использованием зондовой системы атомно-силового микроскопа. Описан измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств.

*Ключевые слова.* Вольт-фарадная характеристика, точно-барьерный контакт, атомно-силовая микроскопия.

## MEASURING SYSTEM FOR LOCAL RESEARCH ELECTROPHISICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR NANOMATERIALS AND NANOSTRUCTURES

D.S. Kusakin, V.G. Litvinov, A.V. Ermachikhin

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia [diman.62.91@mail.ru](mailto:diman.62.91@mail.ru)*

*Abstract.* The possibility of measuring electrical capacitance using the probe system of atomic force microscope is demonstrated. It describes a system for measuring the local electrical properties of the study.

*Keywords.* Capacitance-voltage characteristic, point-like barrier contact, atomic force microscopy.

В связи с развитием нанотехнологий в настоящее время появляется необходимость в развитии методов, разработанных с учетом ограничений, связанных с размерными эффектами в полупроводниковых структурах. Среди методов определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах выделяют метод вольт-фарадных характеристик [1]. Для локального измерения электрической емкости полу-проводниковых структур используются зондовые методы: сканирующая емкостная микроскопия, сканирующая микроволновая микроскопия [2].

Одним из перспективных направлений при развитии методик исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур являются объединение существующих электрофизических методов и адаптация их к использованию совместно с

техникой зондовой микроскопии, что позволит локализовать области исследования до 10 нм, связанные с использованием проводящих зондов атомно-силового микроскопа [3].

В настоящее время одним из методов измерения параметров полупроводниковых материалов является метод вольт-фарадных характеристик (метод ВФХ или метод C-V-характеристик). Для реализации данного метода необходимо использовать полупроводниковые барьерные структуры, например на основе p-n-перехода, диода Шоттки, МДП-структуры [1].

Целью данной работы является разработка измерительного комплекса для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноматериалов и наноструктур.

Для создания контакта в области исследования планируется использовать проводящий зонд атомно-силового микроскопа. Основное требование к зонду – он должен быть целиком изготовлен из проводящего материала. В случае использования зонда с проводящим покрытием электрическое сопротивление зонда достаточно велико, покрытие изнашивается при контактных измерениях за счет трения и электродиффузии, которая усиливается при протекании электрического тока, и дальнейшее проведение эксперимента будет невозможным [4].

Зонды АСМ имеют радиус закругления обычно порядка 5...50 нм. Использование атомно-силового микроскопа позволяет обеспечить локальность измерений электрофизических характеристик исследуемого образца с точностью не менее размеров острия зонда АСМ, равных диаметру закругления, т.е. до 10 нм. Кроме этого, АСМ микроскоп используется для поиска места формирования контакта к поверхности образца, последующего построения карты распределения локально определяемых электрических параметров вдоль поверхности, к которой осуществляется контакт [3]. Высокое разрешение вдоль плоскости сканирования обеспечивается высоким латеральным разрешением при перемещении зонда в плоскости поверхности (XY) образца в атомно-силовом микроскопе. Например, микроскоп семейства Ntegra-Spectra (NT-MDT, Россия) обеспечивает разрешение в плоскости XY порядка 0,15 нм [5, 6].

Атомно-силовой микроскоп используется для поиска исследуемого нанообъекта при сканировании и подвода зонда в нужную точку. Кроме того, в АСМ возможно подключение дополнительных измерительных приборов непосредственно к зонду (генератора, осциллографа, высокочувствительного усилителя, RLC-метра и т.д.), что делает возможным исследование изменения емкости, заряда, протекающего постоянного, переменного, релаксационного электрического тока через систему зонд-образец от времени при импульсном воздействии напряжением [3].

Для проведения эксперимента на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа был собран измерительный комплекс (рис. 1). Измерительная ячейка представляет собой базовый блок зондового микроскопа со специально изготовленным измерительным столиком.

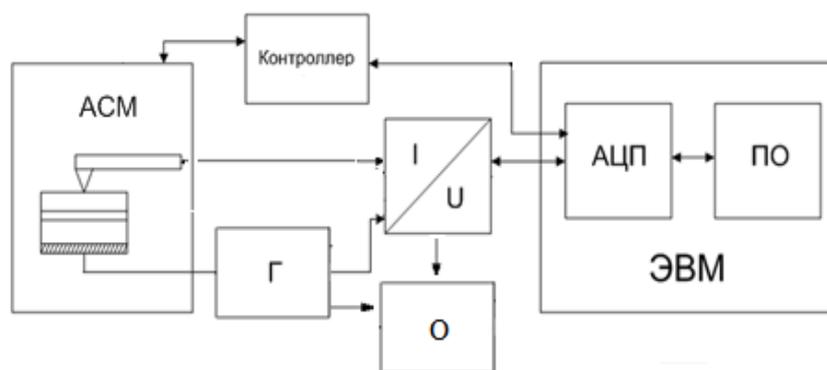


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

С помощью контроллера осуществляется подвод/отвод проводящего зонда к образцу и сканирование поверхности образца. Управление сканированием осуществляется с помощью специализированной программы, установленной на ПЭВМ. ПЭВМ подключена к контроллерам через плату ЦАП-АЦП.

Для минимизации емкости соединений преобразователь ток-напряжение был спроектирован на базе быстродействующего операционного усилителя LTC6244 с уровнем входного тока 1 пА и помещен непосредственно в корпус измерительного столика атомно-силового микроскопа [4]. Изготовленный измерительный столик (рис. 2) помещен в штатную измерительную головку зондового микроскопа.

С генератора импульсов подаются непосредственно на образец импульсы напряжения пилообразной формы [4]. Сигнал поступает на преобразователь ток – напряжение. Далее сигнал поступает через плату ЦАП-АЦП в ПЭВМ, где обрабатывается. Осциллограф O используется для визуальной оценки сигнала, подаваемого с генератора напряжения, а также для оценки отклика, снимаемого с преобразователя ток – напряжение.

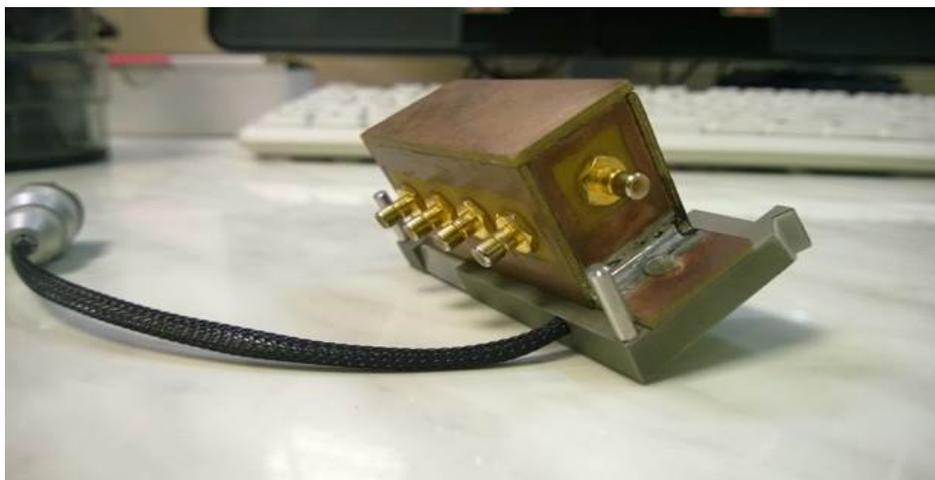


Рис. 2. Измерительный столик ACM

Для проведения исследований, а точнее для формирования контакта к поверхности образца, использовался цельнопроводящий зонд Rocky Mountain Nanotechnology 25Pt300A. Радиус закругления зонда (рис.3) и его химический состав контролировались с помощью комплекса измерительного электронно-оптического с модулями контроля электрофизических характеристик наноматериалов и наноструктур JSM6610LV. Радиус закругления зонда составил порядка 28 нм.

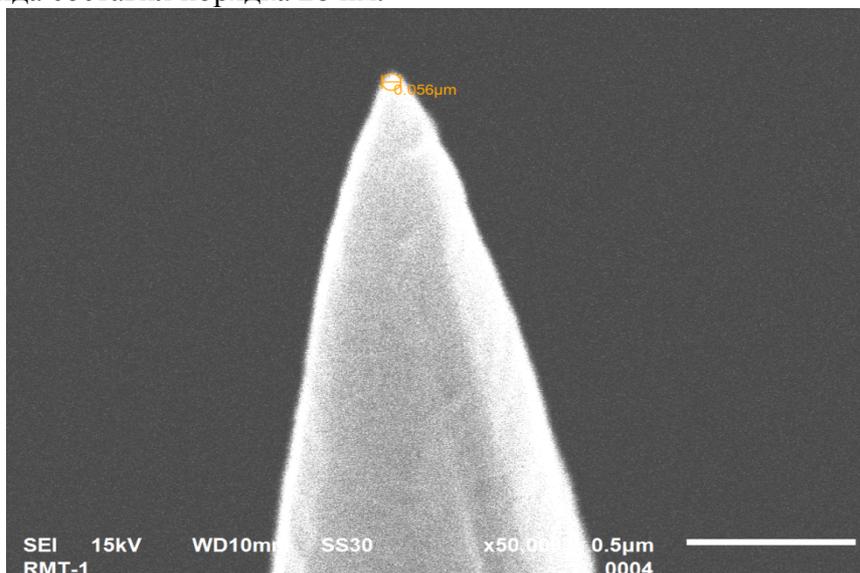


Рис. 3. РЭМ-изображение проводящего зонда Rocky Mountain Nanotechnology 25Pt300A

Описание методики измерения емкости фемтофарадного диапазона приведено в [4]. При подаче пилообразного напряжения на образец в его цепи возникает отклик тока  $i(t) = C(t) \frac{dU}{dt}$ , где  $C(t)$  – мгновенное значение электрической емкости. Емкость с течением времени стремится к некоему стационарному значению, близкому к барьерной емкости диодной структуры. Таким образом, постоянная составляющая на временной зависимости тока будет пропорциональна барьерной емкости. Для пилообразного сигнала  $\frac{dU}{dt} = \frac{U_{\max}}{t_{\max}}$ , где  $t_{\max}$  – длительность сигнала,  $U_{\max}$  – его амплитуда. Если скорость возрастания напряжения  $\frac{dU}{dt} = 10^3$  и его амплитуда  $U_{\max} = 0,1$  В, то период  $T$  составит 100 мкс, что выполнимо для генератора, входящего в состав измерительной установки.

Для обработки и визуализации полученных результатов в среде инженерного графического программирования LabVIEW было разработано программное обеспечение. Окно выходного сигнала представлено на рис.4.

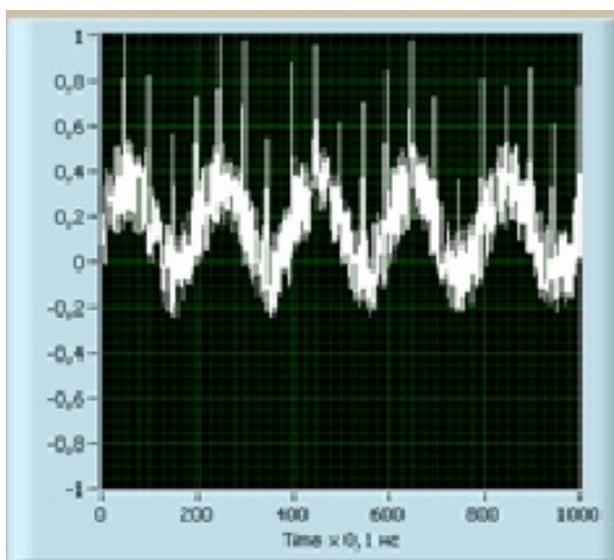


Рис. 4. Окно отображения выходного сигнала в среде LabVIEW

В дальнейшем выходной сигнал фильтруется с целью отделить помехи от полезного сигнала. На данном этапе программное отображение выходного сигнала используется параллельно с осциллографом, входящим в состав комплекса. Это сделано для сравнения данных и определения корректности работы разработанного ПО.

В данной работе разработан измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноматериалов и наноструктур на базе зондовой системы атомно-силового микроскопа. В качестве контакта к поверхности исследуемого образца будет использоваться проводящий зонд АСМ. Дальнейшее развитие измерительной установки связано с автоматизацией проведения эксперимента. Также возможно уменьшение габаритных размеров за счет замены осциллографа и генератора виртуальными приборами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-32-00342), с использованием оборудования РЦЗМкп при Рязанском государственном радиотехническом университете ([skr.rsgu.ru](http://skr.rsgu.ru)) в НОЦ неупорядоченных и наноструктурированных материалов и устройств на их основе.

#### Библиографический список

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 кн. Кн. 1: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 456 с.
2. Литвинова В.С., Литвинов В.Г. Векторный анализ электрической цепи наноконтакта металл – полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. Вып.47, №1. С. 116-120.

3. Кусакин Д.С., Литвинов В.Г. Измерение электрической емкости точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. №4 (54-2). С. 132-136.
4. Кусакин Д.С., Литвинова В.С., Литвинов В.Г., Воробьев Ю.В., Рыбин Н.Б. Методика локального измерения электрической емкости фемтофардного диапазона точечного барьерного контакта металл-полупроводник // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. №50-2. С. 122-125.
5. Руководство пользователя для работы с зондовой нанолaborаторией «NTEGRA SPECTRA». М.: NT-MDT, Гос. НИИ физ. проблем, 2013. 107 с.
6. Зондовая нанолaborатория ИНТЕГРА. Проведение измерений. Руководство по эксплуатации –«НТ-МДТ». 2011. 92 с.

УДК 621.382.029.6; ГРНТИ 29.35.47

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ЗАТВОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНЗИСТОРА С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ В КЛЮЧЕВОМ РЕЖИМЕ

Е.И. Козлов\*, Ю.М. Богданов\*\*

\* Рязанский государственный радиотехнический университет,

Россия, Рязань, megai2@ya.ru

\*\* АО «НПП «Исток»,

Россия, Московская область, Фрязино, yurybgd@yandex.ru

*Аннотация.* Рассмотрено и оценено влияние длины затвора на характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов в ключевом режиме. Найдены оптимальные параметры транзисторов в Г-образной схеме СВЧ ключа.

*Ключевые слова.* Транзисторы с высокой подвижностью электронов, длина затвора, пассивные СВЧ МИС, переключательные СВЧ схемы, оптимизация параметров.

## INFLUENCE ESTIMATION OF GATE LENGTH ON HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTOR SWITCHING MODE CHARACTERISTICS

E.I. Kozlov\*, Y.M. Bogdanov\*\*

\* Ryazan State Radio Engineering University,

Ryazan, Russia, megai2@ya.ru

\*\* AO «NPP «Istok»,

Fryazino, Moscow Oblast, Russia, yurybgd@yandex.ru

*Abstract.* Dependence of switching mode characteristics on gate length in high electron mobility transistor was investigated and estimated. Optimal parameters for Г-type MW switch circuit found.

*Keywords.* HEMT, gate length, passive MMIC, switching MW circuits, parameter optimization.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) являются основой высокоомощных и температурно стойких твердотельных СВЧ приборов в широком диапазоне частот. Данные транзисторы представляют собой полевой транзистор Шоттки (ПТШ) с каналом в виде гетероструктуры, формирующей двумерный электронный газ (рис. 1).

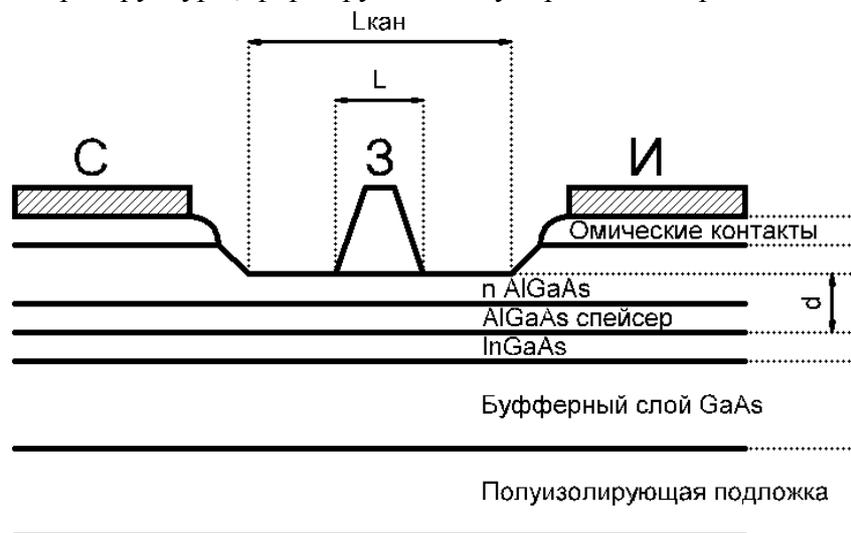


Рис. 1. Структура транзистора с высокой подвижностью электронов

Существует тенденция уменьшения длины затвора, что приводит к увеличению граничной частоты усиления, уменьшению шума и уменьшению напряжения насыщения. Однако существуют пассивные СВЧ приборы, в которых транзисторы используются в ключевом режиме. Транзисторы в ключевом режиме имеют другие критерии оценки качества, нежели усилительные транзисторы, отсюда возникает задача оценки влияния длины затвора на их характеристики в ключевом режиме.

В усилительных схемах затвор часто смещают относительно контактов стока и истока, что делается для увеличения пробивного напряжения. Транзисторы со смещенным затвором в ключевой схеме приводят к искажению сигнала и уменьшению пробивного напряжения, т.к. в ключевой схеме присутствуют и положительные и отрицательные напряжения  $U_{си}$ . Поэтому затвор в ключевом транзисторе расположен по центру относительно контактов стока и истока.

Большинство ключевых схем выполнено в виде Г-образной схемы, где один транзистор подключен последовательно, а другой параллельно на землю. Следовательно, необходимо определить интересующие параметры Г-образной схемы в зависимости от длины затвора  $L$  и ширины затвора  $W$ . Параметры, важные для ключевого режима, таковы:

1. Потери при прохождении сигнала через открытый ключ.
2. Ослабление сигнала при прохождении через закрытый ключ.
3. Максимальная пропускаемая мощность.

ПТШ в ключевом режиме можно заменить двумя пассивными эквивалентными схемами для открытого и закрытого режима соответственно (рис. 2). Т.к. сопротивление в цепи затвора стараются делать максимальным, для экранирования входов от утечки СВЧ сигнала на них, элементами «внутреннего устройства», которые в основном определяют результирующие параметры, остаются ёмкость  $C_{си}$  и сопротивление  $R_{кан}$ .

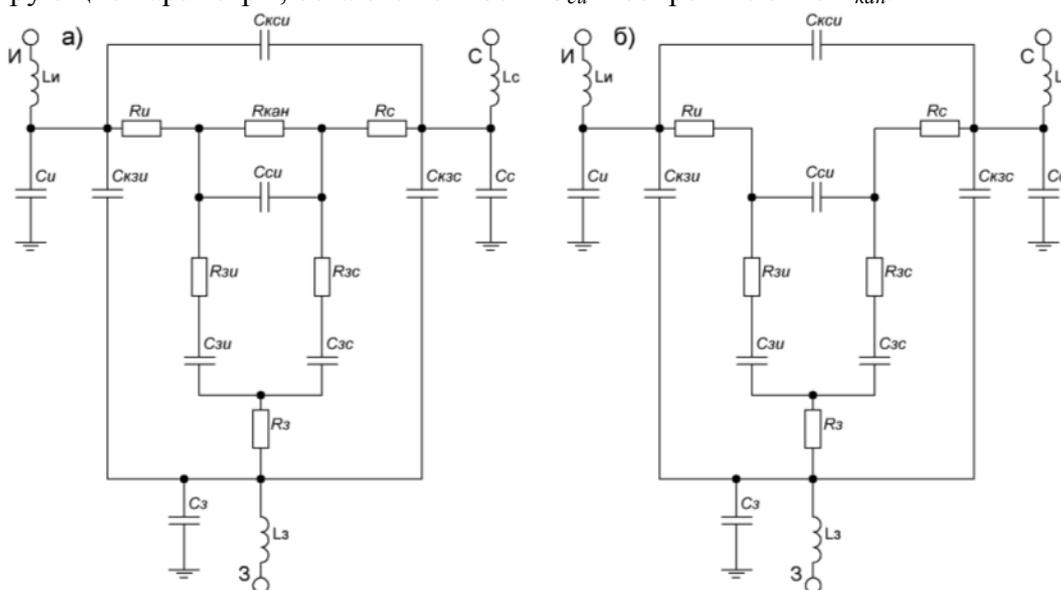


Рис. 2. Эквивалентная линейная схема транзистора в открытом (а) и закрытом (б) режиме

Ёмкость  $C_{си}$  можно представить в виде плоского конденсатора с расстоянием между обкладками  $L$ , что означает её уменьшение при увеличении длины затвора. Сопротивление канала можно определить по формуле

$$R_{кан} = \frac{d_0 L}{-\epsilon_k U_{th} W},$$

получаемой из соотношения контроля зарядов для двумерного электронного газа [1], где  $d_0$  – толщина барьера, формирующего двумерный электронный газ,  $\epsilon_k$  – диэлектрическая проницаемость материала канала,  $U_{th}$  – напряжение отсечки,  $W$  – ширина затвора. Остальные элементы определяются с помощью методов нахождения параметров из экспериментальных образцов [2].

В случае с последовательно включенным транзистором мы имеем негативное влияние увеличения длины затвора на пропускание (увеличивается  $R_{\text{кан}}$ ), но положительное влияние для развязки (уменьшение  $C_{\text{си}}$ ). Противоположная ситуация происходит с транзистором, подключенным параллельно, – потери уменьшаются с ростом длины затвора, а развязка ухудшается (рис. 3).

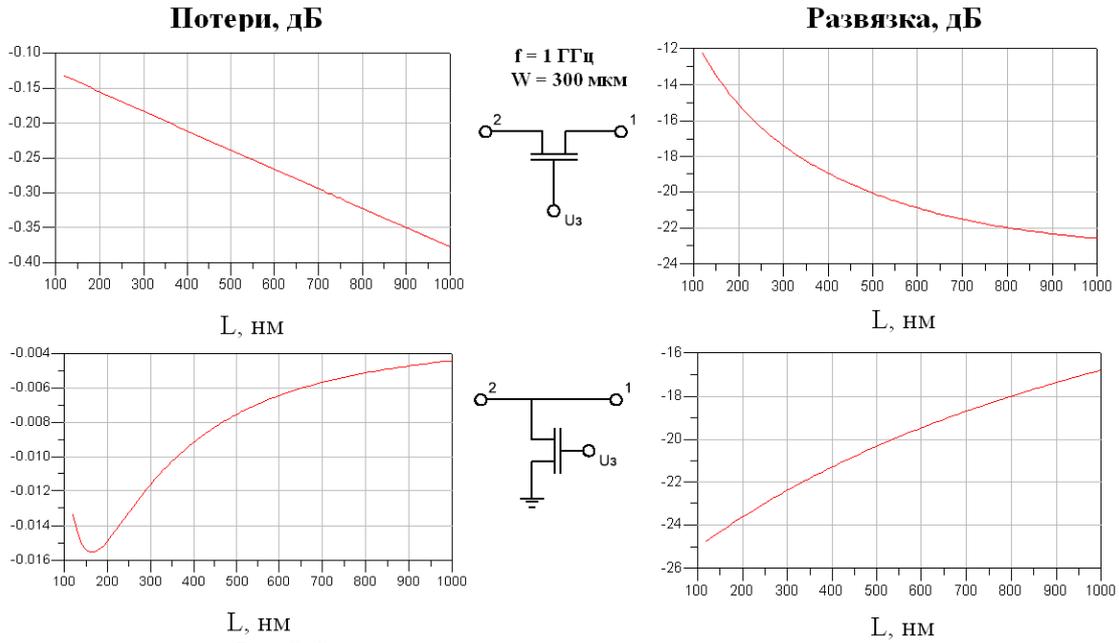


Рис. 3. Зависимости потерь и развязки от длины затвора

Изменение длины затвора влияет на максимальную коммутируемую мощность за счет изменения точки входа транзистора в насыщение, а также за счет изменения пробивных напряжений. Точку входа в насыщение можно найти, используя все те же соотношения для контроля зарядов:

$$I_{\text{нас}} = \frac{\varepsilon_k \vartheta_s W}{d_b} \left( \sqrt{(\varepsilon_c L)^2 + (-U_{th} - R_{\text{и}} I_{\text{нас}})^2} - \varepsilon_c L \right),$$

$$U_{\text{нас}} = \varepsilon_c L + 2R_{\text{и}} I_{\text{нас}},$$

где  $\vartheta_s$  - скорость дрейфа в насыщении,  $\varepsilon_c$  - критическая напряженность поля, при которой наступает насыщение,  $R_{\text{и}}$  - сопротивление истока. Пробивное напряжение затворного диода при изменении длины затвора не изменяется, но при этом изменяется напряжение, приложенное к нему, поэтому можно записать следующие формулы

$$U_{\text{пр.з}} > U_{\text{нас}} - U_3$$

$$U_{\text{пр.з}} > U_{\text{нас}} - R_{\text{и}} I_{\text{нас}}$$

где  $U_{\text{пр.з}}$  – пробивное напряжение затворного диода,  $U_3$  – напряжение на затворе. Напряженность поля между контактами стока и затвора, а также контактами истока и затвора не должна превышать пробивной напряженности вдоль гетероструктуры:

$$\frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{2} (L_{\text{кан}} - L) > -U_3,$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{2} (L_{\text{кан}} - L) > U_{\text{нас}} - R_{\text{и}} I_{\text{нас}},$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – пробивная напряженность вдоль гетероструктуры,  $L_{\text{кан}}$  – суммарная длина канала транзистора.

Минимальное пробивное напряжение, получаемое из формул выше, а также точка входа в насыщение определяют максимальную мощность проходящего сигнала из расчета максимальной амплитуды входного сигнала, равной минимальному значению из напряжений пробоя или насыщения, при сопротивлении открытого транзистора, равном его сопротивлению в режиме насыщения:

$$P_{\text{max}} = \frac{U_{\text{min}}^2 I_{\text{нас}}}{2U_{\text{нас}}}.$$

Итого мы получили необходимые зависимости для интересующих нас параметров.

Полученные зависимости позволяют моделировать Г-образный СВЧ ключ в зависимости от геометрических размеров затвора. Итеративный перебор значений размеров с некоторым шагом, при одновременном моделировании, позволяет получить массив данных со значениями потерь, развязки и максимальной мощности. Диапазон частот моделирования 0.01-4 ГГц, пределы изменения длины затвора от 200 до 800 нм, ширины затвора от 400 до 2800 мкм. Для каждого набора параметров выбирается худшее значение характеристик из диапазона частот. На основе полученного массива можно найти оптимальные значения геометрических размеров транзисторов. Для заданных значений коммутируемой мощности и относительной производительности производится поиск в массиве данных с условием минимальной суммарной площади транзисторов и значений мощности и относительной производительности не менее обозначенных. Относительная производительность находится как сумма произведений параметров развязки и потерь на максимальные их значения во всем массиве данных. Результаты поиска можно изобразить в логических картах, которые отображают те или иные характерные признаки сегмента, дополнительно построены аналогичные карты, но для потерь и развязки (рис 4). При этом черные поля на карте отображают соответствие условию, белые - несоответствие, серые – отсутствие соответствия в массиве данных.

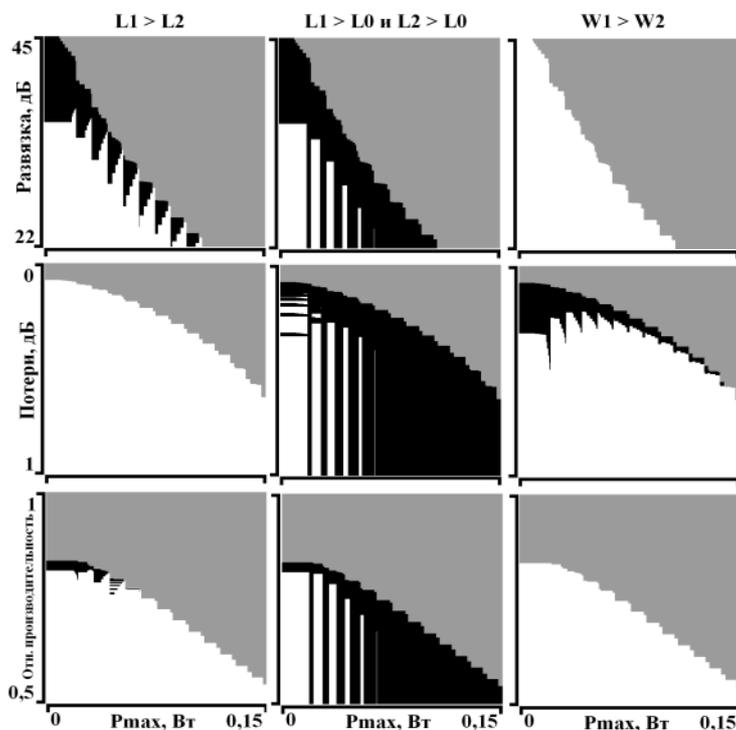


Рис. 4. Логические карты признаков оптимальных параметров Г-образного сегмента

$L1, W1$  – длина и ширина затвора транзистора, подключенного последовательно,  $L2, W2$  – длина и ширина затвора транзистора, подключенного параллельно,  $L0$  – начальное малое значение длины затвора в 200 нм. Видно, что увеличение длины затвора приводит к положительным результатам как по потерям, так и по развязке, при этом в некоторых случаях длина и ширина затворов должны быть разными для транзистора, подключенного параллельно и последовательно.

Таким образом, увеличение длины затвора в транзисторах, работающих в ключевом режиме, улучшает рабочие характеристики, а также уменьшает общую площадь ключевых схем за счет увеличения максимальной мощности с ростом длины затвора.

#### Библиографический список

1. Delagebeaudeuf, D. and Linh, N. T. Metal-(n) AlGaAs-GaAs two-dimensional electron gas FET // IEEE Transactions on Electron Devices. 1982. т.29, №6. С: 955-960.
2. Аверина Л.И., Бессонов Д. А., Рыбалкин Р.А., Аверина Е.В. Экстракция параметров моделей гетероструктурного полевого транзистора // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2012. №1. С. 5-12.

## **РАЗРАБОТКА В СРЕДЕ NI LABVIEW ВИРТУАЛЬНОГО ПРИБОРА ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЧ-ПЛАСТИН**

**А.Д. Кадеев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, rgrtu@rsreu.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются получение и анализ результатов измерения параметров при тестировании полупроводниковых СВЧ-пластин в среде NI LabView. Разработан виртуальный прибор для проведения соответствующих расчетов.

*Ключевые слова.* Анализ результатов измерений, среда программирования LabView.

## **DEVELOPMENT OF VIRUAL INSTRUMENT FOR THE ANALYSIS OF PARAMETERS OF SEMICONDUCTOR MICROWAVE PLATES USING LABVIEW**

**A.D. Kadeev**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, rgrtu@rsreu.ru*

*Abstract.* In operation problems of obtaining and analyzing the results of measurement of parameters during testing of semiconductor microwave plates using NI LabView. Designed virtual instrument for the corresponding calculations.

*Keywords.* Analysis of measurement results, LabView programming environment

В статье рассматривается виртуальный прибор, разработанный в среде NI LabView, для сбора и анализа данных, полученных при измерениях полупроводниковых СВЧ-пластин.

В настоящее время при изготовлении современных полупроводниковых СВЧ-пластин большую роль играет достижение точных параметров в заданном диапазоне для возможности их дальнейшего использования в радиоэлектронном производстве.

Таким образом, крайне необходимыми являются своевременная проверка и отбраковка выпускаемых пластин, а также анализ данных и получение соответствующей статистики для контроля выпускаемой продукции.

Для сбора и анализа данных, а также графического отображения полученных результатов выбрана среда LabView, т.к. она имеет весь необходимый для этого функционал и является удобным инструментом для создания соответствующего виртуального прибора.

Причем LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) является средой графического программирования, используемой для создания приложений для различных измерений, анализа данных и оформления результатов [1].

Приложение (виртуальный прибор), созданное в этой среде, состоит из двух основных частей: лицевой панели, которая задает внешний вид виртуального прибора и определяет интерфейс взаимодействия пользователя с виртуальным прибором [2], и блок-диаграммы, являющейся исходным программным кодом виртуального прибора. Лицевая панель виртуального прибора, рассматриваемого в статье, представлена на рис. 1. На лицевой панели расположены специальные контроллеры в виде выпадающих списков для выбора необходимых параметров при чтении из базы данных. Используются таблица, в которую выводятся полученные данные, список с группой пластин или целого проекта, анализ которого осуществляется в заданный момент, а также список с числовыми результатами о параметрах, по которым произведены необходимый расчет и анализ.

Также на лицевой панели расположены два окна для графического отображения полученных данных: одно в виде гистограммы и одно в виде графика зависимости значений параметров от времени или даты получения этих данных.

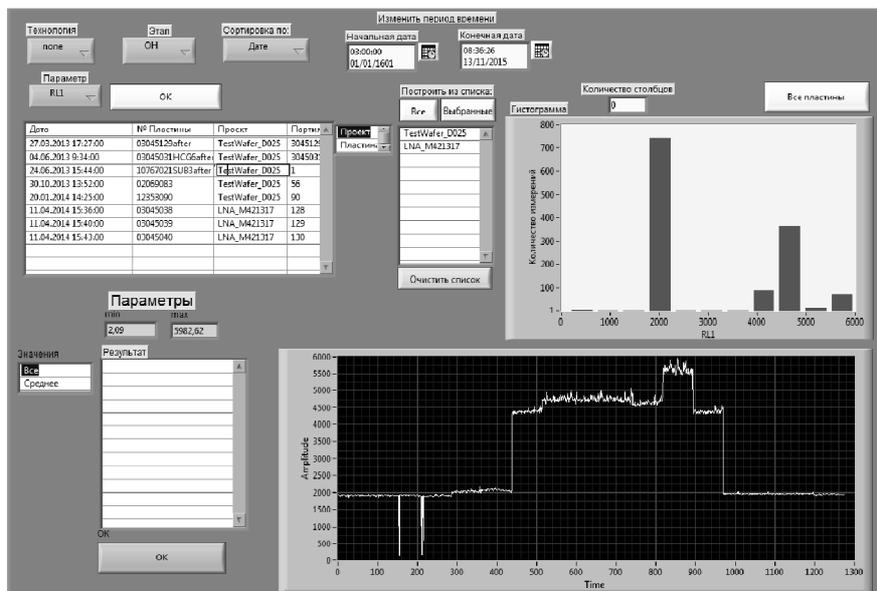


Рис. 1. Лицевая панель виртуального прибора

Чтение из базы данных происходит специальным дополнительным приложением LabView для связи с SQL базами.

Наибольшей проблемой для получения точной информации и правильного анализа являются “неправильные” данные, полученные при измерении характеристик бракованных пластин или при ошибках при проведении измерений. Такие данные являются ошибочными для статистического анализа параметров при необходимости получения точной статистики о разбросе параметров изготавливаемых пластин, т.к. они имеют большой разброс и не несут полезной информации для контроля статистики получения пластин с идентичными заданными параметрами.

Для устранения таких данных из расчета в коде программы присутствует блок математического анализа поступающих данных для выявления и удаления из таблицы таких параметров.

На блок-диаграмме он представляет собой подприбор и изображен на рис. 2.

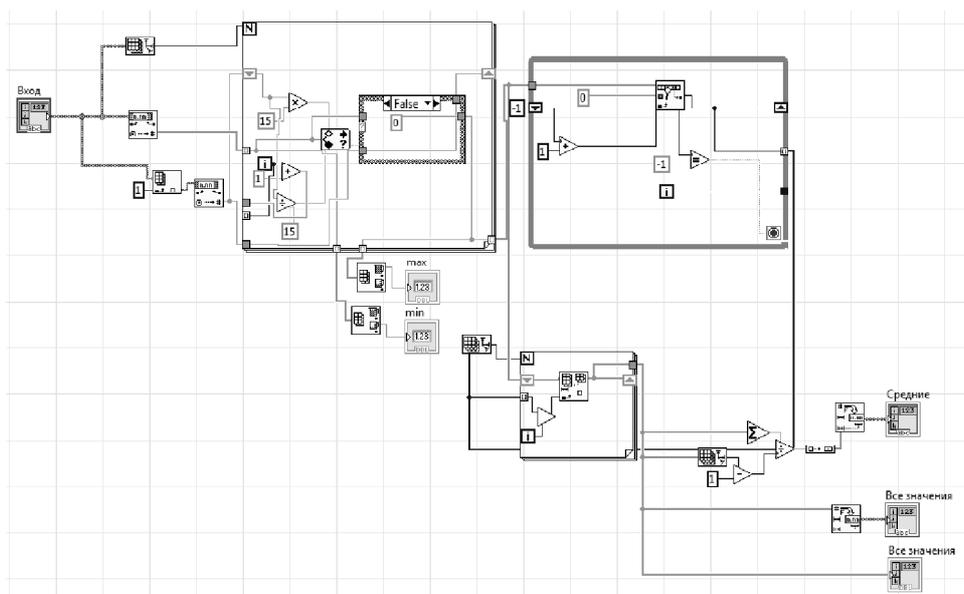


Рис. 2. Блок-диаграмма подприбора для математического анализа поступающих данных

В основе этого блока используется критерий вариационного размаха, т.к. процент ошибочных измерений является, как правило, очень малым. Вариацией называют различие значений признака у разных единиц совокупности за один промежуток времени.

Причиной возникновения вариации являются различные условия существования разных единиц совокупности. Вариация — необходимое условие существования и развития массовых явлений.

Этот метод является одним из простых методов исключения грубого промаха измерений. Для его использования определяют размах вариационного ряда упорядоченной совокупности наблюдений ( $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_k \dots x_n$ ):

$$R_n = x_n - x_1, \quad (1)$$

где  $R_n$  - вариационный размах.

Если какой-либо член вариационного ряда  $x_k$  существенно отличается от других, то производится проверка следующим неравенством:

$$\bar{X} - z \cdot R_n < x_k < \bar{X} + z \cdot R_n, \quad (2)$$

где  $\bar{X}$  – выборочное среднее арифметическое значение, вычисленное после исключения предполагаемого промаха;

$z$  – критериальное значение.

Нулевую гипотезу (об отсутствии грубого промаха) принимают, если указанное неравенство выполняется. Если  $x_k$  не удовлетворяет условию (2), то этот результат исключается из вариационного ряда. Коэффициент  $z$  зависит от числа членов вариационного ряда  $n$  [3].

Нередко в литературе по статистике указывается, что этот метод имеет существенный недостаток. Его величина зависит исключительно от крайних значений признака, и он не учитывает всех изменений варьирующего признака в пределах совокупности. Этот упрек в адрес размаха является не совсем точным. В этом и есть суть метода, поэтому называть это недостатком – некорректно.

К реальным недостаткам метода вариационного размаха следует отнести следующее: очень низкое и очень высокое значения признака по сравнению с основной массой его значений в совокупности могут быть обусловлены случайными обстоятельствами, т.е. эти значения являются аномальными в совокупности. В этих случаях метод даст искаженную амплитуду колебания признака по отношению к “нормальным” его размерам, т.к. в данную совокупность включены единицы другого ряда с аналогичным признаком. Поэтому прежде чем определить величину размаха вариации, следует очистить совокупность от аномальных наблюдений [4].

Такие аномальные величины могут появиться в случае ошибки при проведении измерения поврежденных пластин либо при вводе данных в базу. Для устранения подобных аномальных величин в программе создан специальный блок - подприбор, который вычисляет аномальные величины сравнением каждой входящей величины со средним значением параметров всех пластин из проекта. Так как процент подобных аномальных измерений, как правило, крайне мал, то метод позволяет исключить практически все ошибочные данные.

В дальнейшем данный виртуальный прибор может быть использован как подприбор в другом виртуальном приборе для получения и обработки данных об измерениях в реальном времени.

### **Библиографический список**

1. Трэвис Дж., Кринг Дж. LabView для всех. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 880 с.
2. Батоврин В.К., Бессонов А.С., Мошкин В.В., Папуловский В.Ф. LabView – практикум по основам измерительных технологий. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 232 с.
3. Третьяк Л.Н. Обработка результатов наблюдений: учеб. пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.
4. Герасимов Б.И. Статистическое исследование в маркетинге: введение в экономический анализ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 136 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов, В.Г. Мишустин

*Рязанский государственный радиотехнический университет,*

*Россия, Рязань, valerygudzev@ya.ru*

*Аннотация.* Представлены результаты экспериментальных исследований барьерных структур на основе a-Si:H, полученных при различных режимах технологического процесса.

*Ключевые слова.* Глубокие центры, плотность локализованных состояний, аморфный гидрогенизированный кремний.

## INVESTIGATION OF DEEP LEVELS IN BARRIER STRUCTURES BASED ON AMORPHOUS HYDROGENERATED SILICON

N.V. Vishnyakov, V.V. Gudzev, V.G. Litvinov, V.G. Mishustin

*Ryazan State Radio Engineering University,*

*Ryazan, Russia valerygudzev@ya.ru*

*Abstract.* The results of experimental studies of a-Si:H barrier structures obtained by different technological process modes are discussed.

*Keywords.* Deep levels, localized states density, amorphous hydrogenated silicon.

Исследования плотности локализованных состояний и глубоких центров (ГЦ) в запрещенной зоне по подвижности в аморфном гидрогенизированном кремнии (a-Si:H) позволяют усовершенствовать технологический процесс получения тонкопленочных структур на их основе [1]. Эти исследования представляют интерес при создании полевых транзисторов для схем управления матрицей жидкокристаллических экранов, солнечных элементов на основе гетероструктур a-Si:H/mc-c-Si и НИТ (Heterostructure with Intrinsic Thin Layer)-структур.

При создании электронных элементов на основе этих структур электрически и оптически активные ГЦ могут возникать как в аморфной, так и в кристаллической (микрористаллической) фазе. При их экспериментальном исследовании возникает проблема определения пространственной локализации ГЦ.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований барьерных структур на основе a-Si:H, полученных при различных режимах технологического процесса. Это позволяет сформулировать рекомендации по коррекции режима получения полупроводниковых структур с заданными параметрами для применения в конкретных элементах и устройствах на их основе.

Основным методом, используемым в работе при исследовании глубоких уровней в щели подвижности a-Si:H, являлся метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ). Объект исследований методом РСГУ должен обладать барьерными свойствами. Проверка барьерных свойств исследуемых структур осуществлялась методами вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик.

В экспериментах были использованы пленки a-Si:H, полученные разложением смеси силана в плазме тлеющего разряда низкочастотным (55 кГц) методом. Образцы были изготовлены в Ярославском филиале Физико-технологического института Российской академии наук (ФТИ РАН, г. Ярославль) на установке "Mini Goupyl" (Франция) с частотой возбуждающего генератора 55 кГц. Система управления обеспечивает устойчивое горение НЧ плазмы в следующих технологических режимах: мощность разряда 50 – 400 Вт; давление в камере 10 – 190 Па; температура подложек 20 – 330 °С; расход газа 50 – 200 см<sup>3</sup>/мин. Состав полупроводниковой пленки определяется соотношением силана и газа-носителя в газовой смеси. Для удаления поверхностных загрязнений выполняется дополнительная обработка образцов в водородной плазме непосредственно перед осаждением последующего слоя.

Для проведения измерений изготавливались образцы a-Si:H на подложках из стекла марки "Corning Glass 7059" фирмы "Asahi" (Япония) размером 15×15 мм и толщиной 1,2 мм с

прозрачным проводящим покрытием TCO (Transparent Conductive Oxide) толщиной 0,5 мкм (рис. 1).

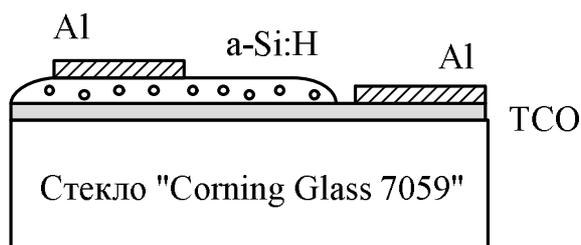


Рис.1. Структура экспериментальных образцов a-Si:H, полученных в плазме НЧ тлеющего разряда (ФТИ РАН, Ярославль)

Исследуемые структуры отличаются различными технологическими режимами изготовления (таблица 1). В таблице 1 указаны значения температуры подложки –  $T_s$ , давления в камере –  $P$ , толщина пленки a-Si:H –  $D$ , скорость осаждения –  $V$ . Измерения проводились в диапазоне температур 280 – 400 К при скорости нагрева образца 1 К/мин и амплитуде опустошающего импульса 3 В.

Таблица 1 - Технологические режимы получения пленок a-Si:H на стеклянных подложках «Corning Glass 7059». (Мощность разряда 200 Вт, время осаждения 12 мин, расход SiH<sub>4</sub> 200 см<sup>3</sup>/мин)

Образец	$T_s$ , 0С	$P$ , Па	$D$ , нм	$V_{ос}$ , Å/с
1	40	132	663	9,2
2	100	157	678	9,4
3	175	189	652	9,1
4	250	220	710	9,9
5	325	252	717	10,0

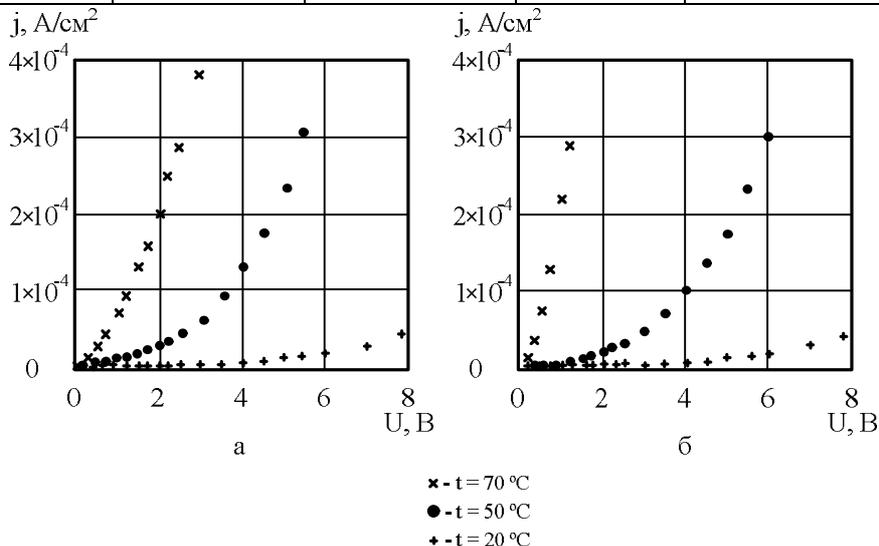


Рис.2. ВАХ структур Al/a-Si:H/TCO/Al: а – ВАХ, полученная при отрицательном потенциале на верхнем электроде; б – ВАХ, полученная при положительном потенциале на верхнем электроде

Для идентификации действующих механизмов токопереноса была использована методика, предложенная в работе [2]. Анализ экспериментальных ВАХ показал, что в области комнатных температур и выше наиболее вероятным механизмом является надбарьерная эмиссия. Кроме того, на ВАХ может оказывать влияние туннелирование носителей через тонкий приконтактный слой, возникающий из-за высокой плотности состояний в щели подвижности неупорядоченного полупроводника [3].

На рис. 2 представлены характерные ВАХ системы Al/a-Si:H/TCO/Al с сэндвич-конфигурацией электродов (рис. 1) при температурах 20, 50 и 70°С. ВАХ имеет

экспоненциальный характер, что свойственно барьерным структурам. По результатам измерений с использованием математической модели ВАХ, предложенной в работе [4], высота барьера Al/a-Si:H составила 0,6 – 0,7 В в зависимости от образцов.

Измерение ВЧ и НЧ зависимости емкости исследуемой структуры от величины приложенного напряжения производилось с помощью измерителя иммитанса Е7-20. При исследовании высокоомных структур (1 кОм – 1 МОм) измерялась полная проводимость структуры, которая с помощью аппаратно-программных средств измерителя иммитанса Е7-20 пересчитывалась в емкость. Измерение емкости производилось в частотном диапазоне от 25 Гц до 1 МГц.

В рассматриваемой системе были проведены измерения ВЧ ВФХ (частота тест-сигнала – 1 МГц) и НЧ ВФХ (частота тест-сигнала – 25 Гц). Вольтаической зависимости ВЧ емкости не наблюдалось. На высоких частотах система Al/a-Si:H/TCO/Al ведет себя как обычный плоский конденсатор, где в качестве диэлектрика выступает пленка a-Si:H.

При уменьшении частоты тест-сигнала (приблизительно до 100 Гц) начинает проявляться зависимость емкости экспериментальной структуры от приложенного напряжения, причем чем ниже частота тест-сигнала, тем ярче выражена эта зависимость. На рис. 3 приведены результаты измерений. НЧ ВФХ имеют характерный для таких систем вид. По результатам измерений НЧ ВФХ и с использованием модели расчета, предложенной в работе [5], высота барьера Al/a-Si:H составила 0,8 – 0,9 В.

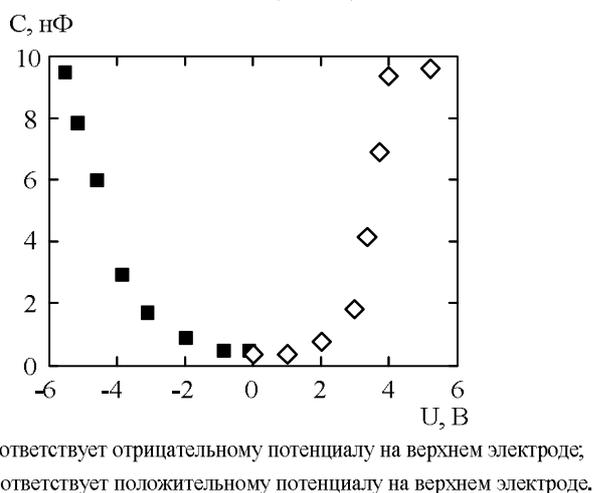


Рис.3. НЧ ВФХ структуры Al/a-Si:H/TCO/Al (площадь верхнего электрода  $9 \times 10^{-2} \text{ см}^2$ )

Такой вид НЧ ВФХ определяется наличием двух встречно включенных барьеров, возникающих на контакте металлических электродов с полупроводником, а также низкой подвижностью носителей в a-Si:H и частотной зависимостью процессов ионизации локализованных состояний в щели подвижности. Поэтому, исходя из характерного вида и асимметрии ВАХ и ВФХ, структуру Al/a-Si:H/TCO/Al следует рассматривать как систему встречно включенных барьеров [5].

Для определения концентрации и энергии активации глубоких уровней (ГУ) в щели подвижности были проведены исследования барьерных структур Al/a-Si:H/TCO/Al методом токовой РСГУ с использованием способа компенсации постоянной составляющей в релаксации тока. Это позволило зарегистрировать высокотемпературный пик с энергией ионизации 0,8 эВ (рис. 4). Данный глубокий уровень обусловлен локализованными состояниями в щели подвижности a-Si:H на уровне Ферми [5].

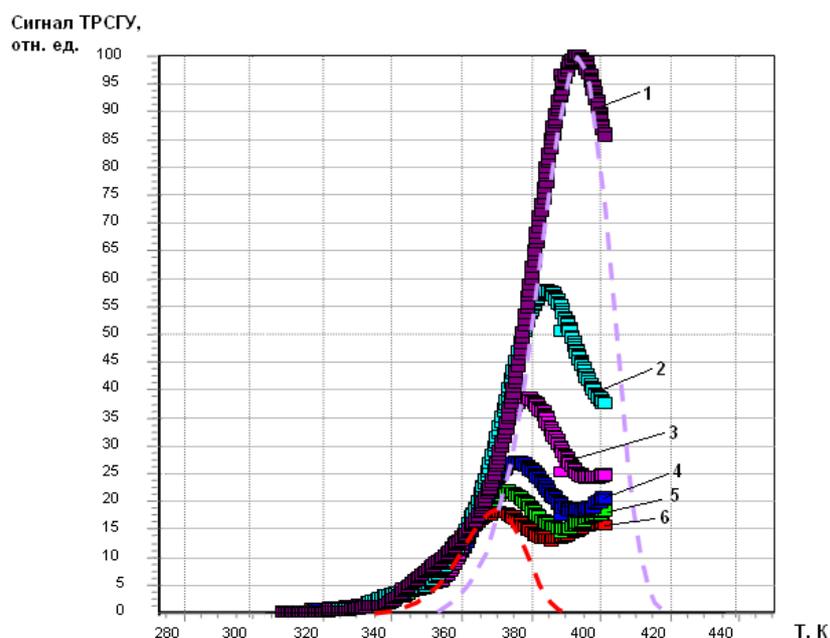


Рис. 4. РСГУ-спектры структуры Al/a-Si:H/TCO/Al (образец №4, таблица 1), соответствующие разным постоянным времени настройки дискриминаторов. Пунктиром показаны смоделированные спектры, соответствующие одному дискретному ГУ. 1 – 2275.6 мкс, 2 – 4551.2 мкс, 3 – 6826.8 мкс, 4 – 9102.4 мкс, 5 – 11378.0 мкс, 6 – 13653.6 мкс

Концентрации глубоких уровней NT, рассчитанные из амплитуды пиков РСГУ-спектра, различались в зависимости от температуры подложки. Результаты параметров ГУ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры ГУ в структурах Al/a-Si:H/TCO/Al при различных технологических режимах

Образец	Ts, °C	P, Па	D, нм	Voc, Å/c	Ec-Et, эВ	Nt, см <sup>3</sup>
1	40	132	663	9,2	0,82	3,0·10 <sup>16</sup>
2	100	157	678	9,4	0,81	4,8·10 <sup>17</sup>
3	175	189	652	9,1	0,79	3,2·10 <sup>17</sup>
4	250	220	710	9,9	0,80	1,2·10 <sup>16</sup>
5	325	252	717	10,0	0,81	3,4·10 <sup>16</sup>

Результаты хорошо согласуются с обобщенной моделью распределения плотности состояний в щели подвижности a-Si:H, а также соответствуют модели a-Si:H (Pool defect model), рассмотренной в работе [6].

Для исследования плотности локализованных состояний в щели подвижности были использованы метод компенсации нестационарной фотопроводимости [7]  $g_{фп}$  и метод измерения поверхностного потенциала на краевом склоне структуры [8]  $g_{мп}$  (таблица 3).

Некоторое различие в количественных характеристиках плотности локализованных состояний связано с влиянием поверхности и поверхностных состояний (как в методе измерения поверхностного потенциала) и вкладом оптически активных локализованных состояний (как в методе компенсации нестационарной фотопроводимости).

Из анализа экспериментальных данных следует, что при температуре подложки 250°C плотность локализованных состояний и концентрация глубоких центров были минимальными. Таким образом, данный режим можно считать наиболее предпочтительным из всех исследуемых в данной работе.

Таблица 3 – Значения плотности локализованных состояний и концентрации носителей на ГУ в структурах Al/a-Si:H/TCO/Al при различных технологических режимах

Образец	Ts, °C	P, Па	D <sub>плз</sub> , нм	Voc, Å/c	g <sub>фи</sub> , см <sup>-3</sup> ·эВ <sup>-1</sup>	g <sub>ин</sub> , см <sup>-3</sup> ·эВ <sup>-1</sup>	N <sub>t</sub> , см <sup>-3</sup>
1	40	132	663	9,2	4,32·10 <sup>16</sup>	8,83·10 <sup>16</sup>	3,0·10 <sup>16</sup>
2	100	157	678	9,4	1,20·10 <sup>17</sup>	1,74·10 <sup>17</sup>	4,8·10 <sup>16</sup>
3	175	189	652	9,1	1,40·10 <sup>17</sup>	1,61·10 <sup>17</sup>	3,2·10 <sup>16</sup>
4	250	220	710	9,9	2,38·10 <sup>16</sup>	5,38·10 <sup>16</sup>	1,2·10 <sup>16</sup>
5	325	252	717	10,0	3,34·10 <sup>16</sup>	3,87·10 <sup>16</sup>	3,4·10 <sup>16</sup>

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием оборудования регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при Рязанском государственном радиотехническом университете.

### Библиографический список

1. Айвазов А.А., Будагян Б.Г., Вихров С.П., Попов А.И. Неупорядоченные полупроводники М.: Издательство МЭИ, 1995. 352 с.
2. Вихров Д.С. Идентификация механизмов токопереноса структур Me/a-Si:H при автоматизированной обработке экспериментальных данных: дисс. канд. физ.-мат. наук: Рязань, 2002. 130 с.
3. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Маслов А.А., Авачев А.П. Особенности ВАХ контакта металл - некристаллический полупроводник // Сборник трудов V Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". СПб.: Из-во Политехнического университета, 2006. С. 289 – 290.
4. Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Аношкин К.О. Токоперенос через барьер на контакте металл - некристаллический полупроводник: особенности расчета прямых и обратных ВАХ// Вестник РГРТУ. 2007. № 22. С. 86-88.
5. Гудзев В.В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2015 г.
6. Бердников А.Е. Разработка и исследование технологии высокоскоростного осаждения аморфного гидрогенизированного кремния и его сплавов в плазме низкочастотного разряда: дисс. докт. техн. наук. Ярославль, 2001. 305 с.
7. N.V. Vishnyakov, S.P. Vikhrov, V.G. Mishustin, D.V. Almazov, V.G. Litvinov, V.V. Gudzev The measurement of electric field distribution in the barrier structures based on disordered semi-conductors by using the transient photocurrent compensation method // Journal of nanoelectronics and optoelectronics, Vol. 9, 773 – 777, 2014.
8. Авачев А.П., Быков В.А., Вихров С.П., Вишняков Н.В., Мишустин В.Г., Уточкин И.Г. Применение атомно-силовой микроскопии для исследования электрофизических свойств микро- и наноразмерных объектов на неупорядоченных полупроводниках // Сборник трудов V Международной конференции "Аморфные и микрокристаллические полупроводники". СПб.: Из-во Политехнического университета, 2006. С. 20 – 21.

УДК 621.315.592; ГРНТИ 29.19.31

## ИЗМЕРИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

**В.Г. Литвинов, В.В. Гудзев, Н.В. Вишняков, Д.С. Кусакин**  
 Рязанский государственный радиотехнический университет,  
 Россия, Рязань, valerygudzev@ya.ru

*Аннотация.* Представлен измерительно-аналитический комплекс для диагностики и исследования электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур методами вольт-фарадных, вольт-амперных характеристик и токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней с компенсацией тока утечки.

*Ключевые слова.* Дефекты, примеси, глубокие уровни, полупроводниковые барьерные структуры.

## THE MEASURING ANALYTICAL COMPLEX FOR DIAGNOSTICS OF SEMICONDUCTOR MICRO- AND NANOSTRUCTURES

**V.G. Litvinov, V.V. Gudzev, N.V. Vishnyakov, D.S. Kusakin**  
 Ryazan State Radio Engineering University,  
 Ryazan, Russia valerygudzev@ya.ru

*Abstract.* The measuring analytical complex for diagnostics and investigation the electrical properties of semiconductor micro- and nanostructures by capacitance-voltage method, current-voltage characteristics and current deep level transient spectroscopy with current compensation is presented.

*Keywords.* Defects, impurities, deep levels, semiconductor barrier structures.

Нестабильность параметров элементов микро- и нанoeлектроники во многом обусловлена дефектами и примесями, которые возникают в структурах в технологическом процессе изготовления или появляются в результате эксплуатации. В связи с тенденцией к уменьшению размеров активных областей роль влияния дефектов структуры материалов на параметры полупроводниковых приборов все более возрастает. Электрически активные дефекты оказывают существенное влияние на функционирование полупроводниковых приборов и ИС. Например, увеличение концентрации глубоких центров (ГЦ) приводит к уменьшению времени жизни носителей заряда (НЗ). Это может иметь как положительное влияние – увеличение быстродействия, так и отрицательное – увеличение генерационно-рекомбинационной составляющей тока, повышение плотности граничных состояний, снижение пробивных напряжений и т.д. Число точечных и линейных дефектов, возникающих во время проведения технологических операций изготовления полупроводникового прибора, значительно превышает число дефектов, изначально присутствующих в исходном материале. Таким образом, разработка измерительного оборудования для диагностики электрически активных ГЦ в полупроводниковых микро- и наноструктурах на стадии отработки технологического процесса и подбор соответствующих режимов позволяют повысить стабильность и надежность полупроводниковых приборов и интегральных схем.

На кафедре микро- и нанoeлектроники Рязанского государственного радиотехнического университета разработан измерительно-аналитический комплекс, позволяющий проводить исследования электрофизических свойств полупроводниковых микро- и наноструктур методами вольт-фарадных (C-V), вольт-амперных (I-V) характеристик и токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней (PCГУ) с компенсацией тока утечки. Для создания программного обеспечения данного комплекса использовалась технология виртуальных инструментов, реализуемая в программной среде LabVIEW.

Функциональная схема измерительно-аналитического комплекса для диагностики полупроводниковых микро- и наноструктур приведена на рис. 1. В комплексе предусмотрен электрический способ создания неравновесного состояния исследуемой структуры. Предварительно измеряются I-V и C-V характеристики для выбора режима измерения PCГУ-спектров. При этом на исследуемый образец, помещенный в измерительную ячейку, подается периодически изменяющееся напряжение смещения с генератора прямоугольных импульсов. Уровни импульсного напряжения заполнения и опустошения, соответствующие временным интервалам “паузы” ( $0...t_n$ ) и “импульса” ( $t_n...t_l$ ), устанавливаются независимо друг от друга в пределах  $\pm 10$  В с помощью регулятора напряжения в генераторе прямоугольных импульсов (рис. 1). Диапазон измеряемых релаксационных токов лежит в пределах  $10^{-11}...10^{-5}$  А и определяется конструкцией преобразователя ток-напряжение. Нижняя граница диапазона величин тока релаксации обеспечивается использованием во входном каскаде преобразователя ток-напряжение малошумящего операционного усилителя LTC6244HV, имеющего частоту единичного усиления 50 МГц и уровень входного тока смещения не более 1 пА при  $T = 25^\circ\text{C}$ . Верхняя граница входного тока определяется оценками максимального уровня тока утечки исследуемого образца и начальной величины тока релаксации. Длительности временных интервалов  $t_n$  и  $t_l$  устанавливаются независимо друг от друга в диапазоне  $10^{-6}...10$  с. С выхода измерительной ячейки, помещенной в гелиевый криостат Janis CCS-400/204N, сигнал поступает на преобразователь ток – напряжение с регулируемым коэффициентом преобразования в диапазоне 103...109 В/А. Далее сигнал с преобразователя поступает в 16-разрядный аналогово-цифровой преобразователь платы сбора данных NI PCIe-6361, с частотой дискретизации 2 МГц. Данной частоты дискретизации достаточно для оцифровки релаксационного сигнала длительностью от 50 мкс при использовании весовой функции типа “lock-in” и от 10 мкс для самой простой весовой функции типа “double boxcar”. Обработка и хранение получаемых

данных, управление изменением температуры образца осуществляются с использованием программного обеспечения, функционирующего в среде LabVIEW.

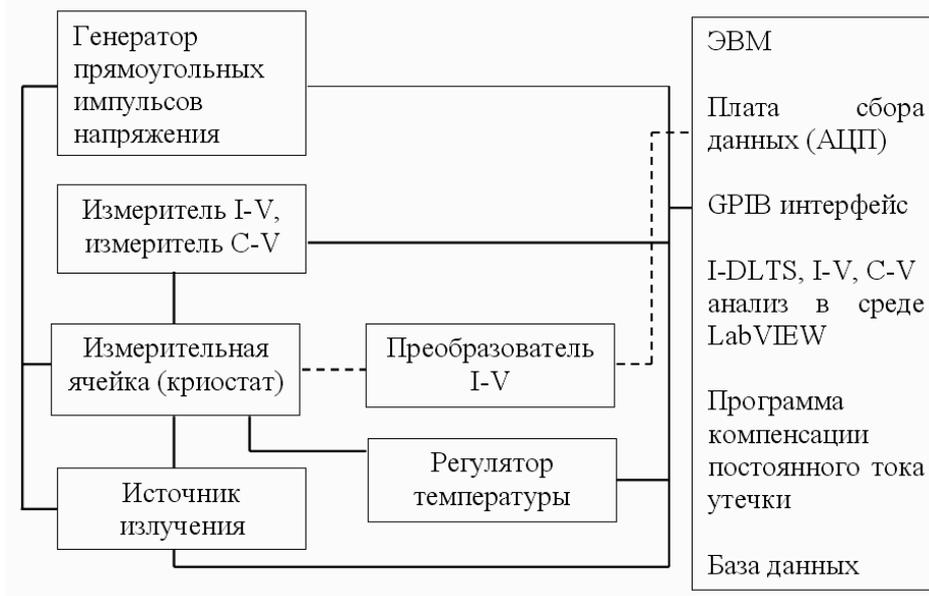


Рис. 1. Функциональная схема измерительного-аналитического комплекса для диагностики полупроводниковых микро- и наноструктур

Блок регулирования температуры Lake Shore 335 и криостат Janis CCS-400/204N позволяют изменять температуру по линейному закону в диапазоне 7...500 К. Скорость линейного изменения температуры регулируется в пределах 0,1...3 К/мин. Измерение температуры осуществляется с помощью калиброванного датчика температуры на основе кремниевого диода.

Преобразователь I-V обладает достаточно низким входным сопротивлением (не более 1 кОм), поэтому переходный процесс, обусловленный перезарядкой геометрических емкостей ( $C_{\max}=2000$  пФ), проходит за время около 2 мкс. Сигнал – ток релаксации с выхода преобразователя I-V обрабатывается с помощью виртуального дискриминатора, который позволяет выделять сигнал с определенной постоянной времени релаксации. Дискриминатор характеризуется своей передаточной функцией, экстремум которой определяет постоянную времени, соответствующую максимуму выходного сигнала дискриминатора [1].

В дискриминаторе происходит умножение на передаточную или весовую функцию  $w(t)$  (рис. 2). Прямоугольная весовая функция, или “lock-in”, имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими видами функций. Прежде всего, практически полностью исключается влияние тока утечки структуры (подавление постоянной составляющей входного сигнала умножителем составляет не менее 40 дБ), что важно для образцов с большой площадью выпрямляющего перехода.

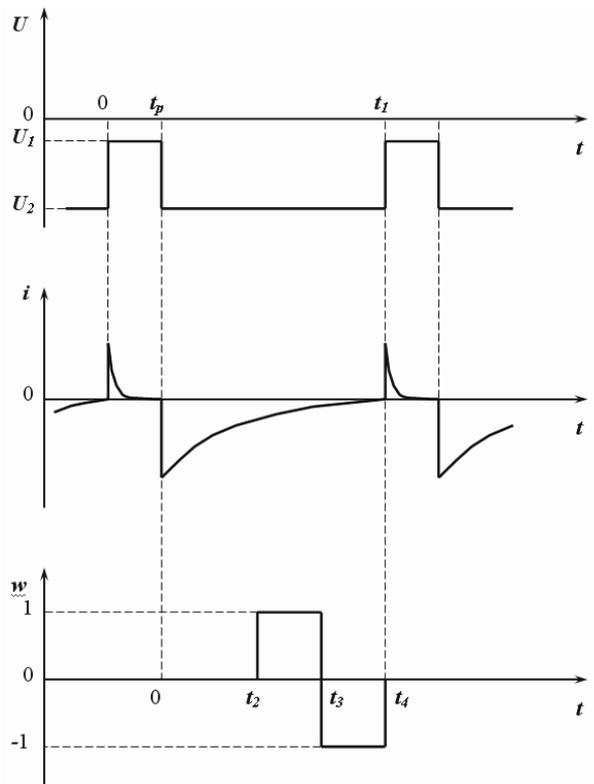


Рис. 2. Эпюры зависимостей  $U=f(t)$ ,  $i=f(t)$ ,  $w=f(t)$  при регистрации спектра ловушек основных носителей заряда РСГУ-спектрометром

При перемножении сигнала на биполярную прямоугольную функцию происходит изменение знака постоянной составляющей в момент времени  $t_3$  (рис. 2). Так как интервалы времени  $t_2...t_3$  и  $t_3...t_4$  равны (рис. 2), то при интегрировании перемноженного сигнала произойдет устранение постоянной составляющей. Также устраняются помехи, обусловленные перезарядкой барьерной емкости исследуемой структуры, так как функция  $w(t)$  “вырабатывается” с определенной задержкой во времени после подачи импульса напряжения опустошения. К недостаткам перемножения на прямоугольную передаточную функцию следует отнести несколько меньшее соотношение сигнал – шум по сравнению с экспоненциальной функцией [1].

Во избежание отклонения РСГУ пиков от истинного положения из-за инерционности фильтров скорость нагрева образца не должна превышать 3 К/мин. В измерительном стенде предусмотрено применение компенсации обратного тока утечки через исследуемый образец, что позволяет проводить исследования при более высоких температурах, если в этом возникает необходимость. Алгоритм работы компенсации реализован в среде LabVIEW.

Заполнение ГУ в данном виде РСГУ осуществляется путем подачи на исследуемую структуру импульсов напряжения смещения (рис. 2). При этом различают заполняющий и опустошающий импульсы. При заполняющем импульсе напряжения (промежуток времени  $0...t_n$  на рис. 2) происходит процесс захвата ловушками свободных НЗ. А при импульсе опустошения (промежуток времени  $t_n...t_1$  на рис. 2) происходит релаксационный процесс опустошения ловушек, регистрируемый спектрометром. Кроме этого, в измерительном стенде используется источник излучения с набором лазеров мощностью 15...50 мВт с различной длиной волны, соответствующей видимой и ближней ИК-области спектра 450...1064 нм. Выбор длины волны излучения зависит от ширины запрещенной зоны исследуемого образца. Источник излучения управляется по интерфейсу GPIB, и его работа синхронизирована с генератором импульсов напряжения. В измерительном стенде предусмотрен выбор режимов оптического заполнения или опустошения ГЦ. Подключение I-V-преобразователя к плате сбора данных осуществляется через блок BNC-2120. Для измерения I-V-характеристик используется пикоамперметр Keithley-6517B. Подключение измерительных зондов к исследуемому образцу в измерительной ячейке контролируется с

помощью цифровых камер. Платы сбора данных и интерфейса GPIB устанавливаются в вычислительный узел для методики комплексной диагностики дефектов в полупроводниковых барьерных структурах на базе электронно-вычислительной машины (ЭВМ).

Таким образом, изменяя температуру исследуемой структуры с помощью регулятора температуры и, следовательно, постоянную времени перезарядки ГУ  $\tau$ , на выходе спектрометра при температуре  $T_{\max}$ , когда  $\tau$  равна постоянной времени дискриминатора  $\tau_d$ , на спектре появится пик – максимум РСГУ-сигнала. Повторяя аналогичную операцию при различных  $\tau_d$ , получаем набор температур  $T_{\max}$  РСГУ-пиков и соответствующие им  $\tau$ , по которым строят график Аррениуса и находят энергию активации ГЦ. Изучение температурной зависимости тока релаксации позволяет определить температурную зависимость времени релаксации, из которой определяются энергия ионизации ГЦ и сечение захвата. По этим параметрам можно осуществить идентификацию природы ГЦ, а по амплитуде РСГУ-пика определить концентрацию ГЦ  $N_i$ . Параметры обнаруженных ГЦ сохраняются в базе данных измерительного стенда и позволяют сделать выводы о пригодности технологических операций для изготовления полупроводниковых барьерных структур с прогнозируемыми или заданными характеристиками [2].

Для барьерных p-i-n структур на основе неупорядоченных полупроводников энергетический спектр локализованных состояний носит непрерывный характер. В генерационно-рекомбинационных процессах участвуют электрически активные локализованные состояния с функцией плотности состояний  $D(E)$ , расположенные вблизи квазиуровня Ферми в области обеднения, пересекающего всю i-область в широком диапазоне энергий. Поэтому сигнал тока релаксации имеет более сложный характер [3]. Таким образом, в работе представлены концепция построения и описание измерительного комплекса для исследования и контроля рекомбинационных центров в полупроводниковых барьерных структурах. Особенностью измерительного стенда является учет специфики исследуемых объектов – полупроводниковых барьерных структур с большей площадью выпрямляющего перехода и повышенным током утечки и универсальность применения по типу исследуемого образца. Измерительный стенд позволяет проводить измерения параметров ГЦ в диапазоне температур 7...500 К, диапазоне времен релаксации 10 мкс...10 с, с максимальной барьерной емкостью до 2000 пФ, амплитуда тока релаксации в диапазоне 10 пА...10 мА. Получаемая информация о рекомбинационных центрах сохраняется в базе данных и используется для идентификации природы ГЦ, оценки влияния ГЦ на параметры полупроводниковых барьерных структур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием оборудования регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования при Рязанском государственном радиотехническом университете.

### **Библиографический список**

1. Денисов А.А., Лактюшкин В.Н., Садофьев Ю.Г. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней // Обзоры по электронной технике. 1985. Сер. 7. Вып. 15(1141). 52 с.
2. Гудзев В.В. Исследование глубоких энергетических уровней в барьерных структурах на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2015 г.
3. Гришанкина Н.В., Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Рыбин Н.Б. Исследование диодных структур на основе Si и a-Si:H методом токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней в режимах эмиссии и захвата // Вестник РГРТУ. – 2011. - № 3. Вып. 37. – С. 72-80.

УДК 621.384.82; ГРНТИ 89.57.35

**ЛИНЕЙНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ  
С ПЛАНАРНЫМИ ДИСКРЕТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ**

**А.А. Саликов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, www.rsreu.ru/ru/*

*Аннотация.* Рассмотрено влияние геометрических искажений ионно-оптической системы на точность распределения электрического поля и разрешающую способность радиочастотных времяпролетных масс-спектрометров с планарными дискретными электродами.

*Ключевые слова.* Радиочастотные времяпролетные масс-спектрометры, ионно-оптическая система, планарные дискретные электроды, двумерное линейное электрическое поле.

**THE LINEARITY OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN THE ION-  
OPTICAL SYSTEMS WITH DISCRETE PLANAR ELECTRODES**

**A.A. Salikov**

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Russia, Ryazan, www.rsreu.ru/ru/*

*Abstract.* The influence of ion-optical system geometric distortion on the accuracy of the distribution of the electric field and the resolution of the RF TOF MS with planar discrete electrodes.

*Keywords.* RF TOF mass spectrometers, ion-optical system, discrete planar electrodes, two-dimensional linear electric field.

Методы масс-спектрометрического анализа широко используются для микроанализа вещества. Большую часть приборов для масс-анализа составляют масс-спектрометры времяпролетного типа (ВПМС), работающие по принципу параллельного анализа, что определяет их высокое быстродействие [1]. Аналитические расчеты, моделирование и экспериментальные исследования показали высокую эффективность фокусирующих свойств линейных ВЧ полей [2]. Для формирования таких полей предложена новая ионно-оптическая система (ИОС) с использованием технологии планарных дискретных электродов (рисунок 1) [3].

Такие ИОС позволяют создавать ВПМС широкого применения с улучшенными аналитическими, коммерческими и эксплуатационными характеристиками. Аналитические возможности ИОС с планарными дискретными электродами определяются точностью геометрии электродов и ее устойчивостью к изменениям условий эксплуатации. Возможности технологии планарных дискретных электродов с распределенными емкостными делителями напряжения для ее инновационного использования определяются не только перспективами достижения высоких аналитических параметров приборов, но также их коммерческими и эксплуатационными характеристиками

В идеальной ИОС, с двумерным линейным электрическим полем, распределение потенциала описывается выражением:

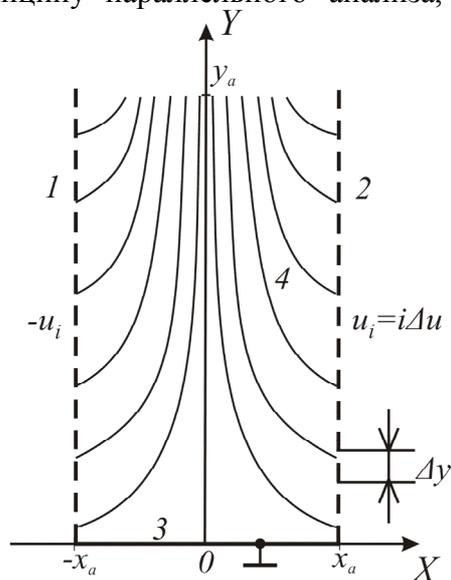


Рис.1. Схема ИОС с планарными дискретными электродами;

- 1,2 – планарные дискретные электродами.
- 3 – заземленный электрод;
- 4 – эквипотенциальные линии напряжения

$$\varphi(x, y) = \frac{2U}{r_0^2} \cdot xy, \quad (1)$$

где  $r_0 = \sqrt{2x_a y_a}$  – геометрический параметр квадрупольной ионно-оптической системы;  $x_a, y_a$  – наикратчайшие расстояния от центра симметрии ИОС до соответствующего гиперболического электрода;  $U$  – напряжение на электродах.

При этом распределения потенциалов в плоскостях  $x = \pm x_a$  планарных электродов вдоль оси дрейфа  $Y$  будут описываться формулой:

$$\varphi(x, y) = \pm \frac{2\varphi_0}{r_0^2} \cdot x_a y. \quad (2)$$

Точность распределения ВЧ потенциала (1) в ИОС с планарными дискретными электродами зависит от ряда факторов:

- случайные отклонения ширины дискретных элементов планарных электродов;
- отклонения параллельности планарных электродов;
- неравномерная толщина и неоднородность диэлектрической проницаемости подложек планарных электродов.

При отклонениях ширины металлизированных полосок от номинальной изменяется шаг дискретности  $\Delta y_i$  планарных электродов. Дискретно-линейное распределение потенциала вдоль оси  $Y$  описывается выражением:

$$u(y_i) = u_i, \quad (3)$$

где  $y_i$  и  $U_i$  – координата середины и потенциал  $i$ -го элемента.

Распределение потенциала (1) на дискретных планарных электродах реализуется с помощью совокупности резисторно-емкостных делителей напряжения, образованных между двумя металлизированными поверхностями керамических подложек [4]. Из рисунка 2 видно, что потенциал  $i$ -го дискретного элемента определяется его координатой  $y_i$  независимо от его ширины  $\Delta y_i$ . Таким образом, изменение шага дискретности электродов не влияет на линейность распределения потенциала по оси  $Y$ .

При непараллельности планарных электродов по оси  $Y$  отклонение потенциала от линейного можно оценить в плоскостях  $x = \pm x_a$  и описывать выражением:

$$\varphi(x_a, y) = \frac{2x_a U}{r_0^2} \cdot y. \quad (4)$$

При отклонениях от нормали плоскостей электродов на величину  $\Delta x(y)/x_a$  распределение потенциала на границах  $x = \pm x_a$  ИОС можно в первом приближении представить в виде:

$$U_{\Delta}(y) \cong \frac{2U}{r_0^2} \cdot \frac{x_a y}{1 - \Delta x / x_a}. \quad (5)$$

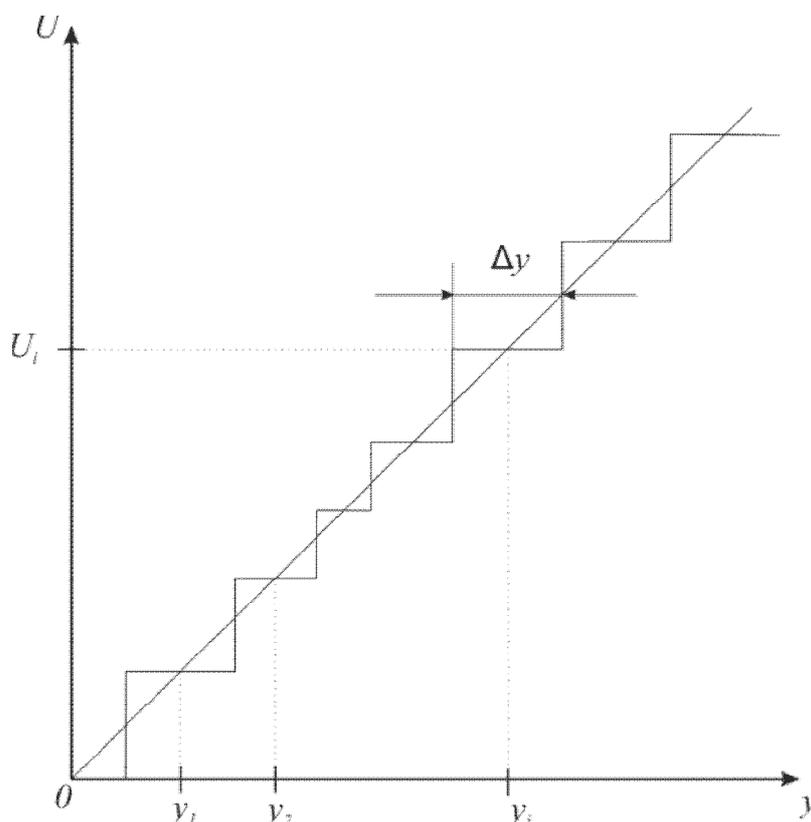


Рис. 2. Распределение потенциала вдоль оси  $Y$  дискретного электрода, 1 – линейное, 2 – дискретно-линейное с переменным шагом дискретности

Используя (1) для распределения потенциала в рабочей области ИОС, получаем:

$$\varphi_{\Delta}(x, y) \cong \frac{2U}{r_0^2} \cdot \frac{xy}{1 - \Delta x/x_a}. \quad (6)$$

При малых  $\Delta x/x_a$  справедливо:

$$\varphi_{\Delta}(x, y) \cong \frac{2U}{r_0^2} \cdot \left(1 - \frac{\Delta x}{x_a}\right) xy. \quad (7)$$

Погрешность распределения потенциала оценивается по формуле:

$$\delta_{\varphi} = \frac{\varphi_{\Delta}(x, y) - \varphi(x, y)}{\varphi(x, y)} \cong \frac{\Delta x(y)}{x_a}. \quad (8)$$

По формуле (8) можно оценить отклонения распределения потенциала при симметричном наклоне двух дискретных электродов на угол  $\alpha$ . Функция искажения в этом случае имеет вид  $\Delta x(y)/x_a = \alpha y/y_a$  и погрешность распределения описывается линейной функцией:

$$\delta_{\varphi} = \alpha y/y_a. \quad (9)$$

Малые отклонения не нарушают линейность поля, а изменяют лишь параметр  $r_0$ .

При случайных отклонениях поверхности дискретных электродов от плоской численным моделированием можно оценить точность поля по изменению разрешающей способности радиочастотного времяпролетного масс-анализатора ионов.

Результаты моделирования (рисунок 3) показывают, что заметное ухудшение разрешения и соответственно точности поля происходит при шероховатости поверхности  $\delta_x = \Delta x/x_a > 10^{-3}$ . При размере  $x_a = 15$  мм точность обработки электродов должна быть не более 10 мкм.

Для расширения рабочей области с двумерным линейным полем в направлении оси  $Y$  ИОС с планарными дискретными электродами дополняется двумя планарными сплошными

электродами [3]. Дополнительные электроды выполняют функцию корректирующих, которые позволяют снизить краевые искажения поля, возникающие из-за незамкнутой ИОС в плоскости  $y = y_a$ . Идеальной формой корректирующих электродов, совпадающих с эквипотенциалами поля в области  $y > y_a$ , является гиперболическая форма. В целях упрощения конструкции ИОС вместо гиперболических корректирующих электродов используются планарные. Путем численного моделирования возможно оптимизировать угол наклона, положение и длину корректирующих электродов. В этом случае область ИОС с отклонениями поля от линейного  $\delta_\varphi < 10^{-4}$  расширяется на 30% и составляет 95% от  $y_a$ .

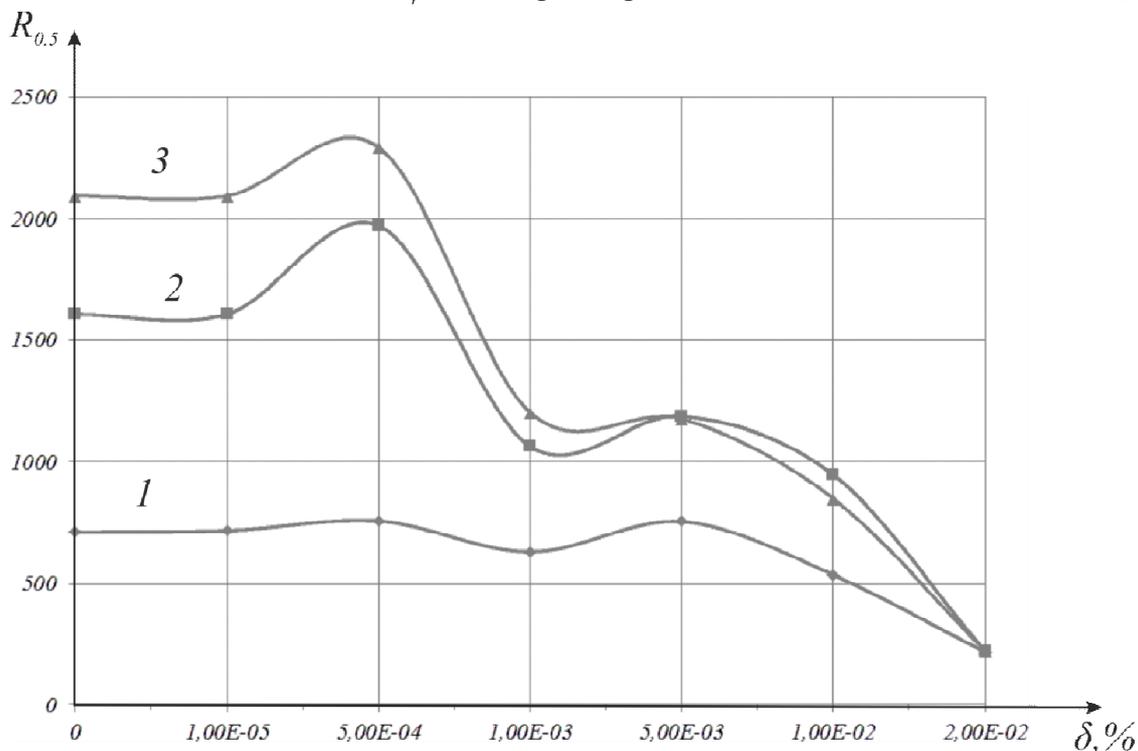


Рис. 3. Зависимости разрешающей способности радиочастотного времяпролетного масс-спектрометра от случайных отклонений поверхности электродов от плоской, 1,2,3 – разрешение для ионов с массой 50,500,5000.

### Библиографический список

1. Мамонтов Е.В., Гуров В.С., Дягилев А.А., Грачев Е.Ю., Журавлев В.В. Радиочастотные анализаторы для времяпролетного масс-разделения ионов // Вестник РГРТУ. - 2012. - №1 (39, ч.2.) -С.97. – 102.
2. Мамонтов Е.В., Гуров В.С. Радиочастотные времяпролетные масс-анализаторы ионов. М.: Горячая линия - Телеком. 2012 г. 98 с.
3. Мамонтов Е.В., Журавлев В.В., Двойнин В.Н. Патент на изобретение №2565602(RU) "Устройство для образования двумерных линейных электрических полей."
4. E.V. Mamontov, V.S. Gurov, V.V. Zhuravlev, V.N. Dvoynin, A.A. Dyagilev, E.Yu. Grachev, Z.F. Gromova A Radio-Frequency Time-of-Flight Mass Analyzer of Ions with Planar Discrete Electrodes // Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, No. 4, pp. 520–524.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ, ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

П.И.Павлов, С.А. Круглов, А.А. Серезин

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань.

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки способа исследования мощности, выделяющейся в цепях переменного тока.

*Ключевые слова.* Мощность, нагрузка (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная), мостовой выпрямитель, коэффициент мощности.

# THE STUDY OF POWER GENERATED IN AC CIRCUITS

P. I. Pavlov, S. A. Kruglov, A. A. Seregin  
Ryazan state radio engineering University,  
Russia, Ryazan.

*Abstract.* Examines theoretical and practical issues of the method development studies of power generated in AC circuits

*Keywords.* Power, load (active, active-inductive, active-capacitive), bridge rectifier, power factor.

Среднее значение мощности за период (мощность, которая выделяется в нагрузке) называют активной мощностью и обозначают  $P$ . Эта мощность измеряется в ваттах и характеризует необратимое преобразование электрической энергии в другой вид энергии (тепловую, световую или механическую). Реактивная мощность, измеряемая в вольт-амперах реактивных, расходуется на создание магнитного поля в индуктивности или электрического поля в емкости. Энергия, накопленная в емкости или в индуктивности, 2 раза за период возвращается источнику питания. Полная мощность равна  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI = I^2 Z$ . (1)

Полная мощность характеризует предельные возможности источника энергии.

## Коэффициент мощности

Одной из важных характеристик цепи переменного тока является коэффициент мощности. Коэффициентом мощности называют отношение активной мощности к полной мощности.

$$\frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi. \quad (2)$$

Коэффициент мощности численно равен косинусу угла сдвига фаз между напряжением и током нагрузки. Для повышения качества использования энергии источника необходимо стремиться к повышению коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ), так как при малом  $\cos \varphi$  возрастают потери энергии в передающих линиях за счет многократной передачи энергии от источника в нагрузку и обратно. Для повышения коэффициента мощности реактивную составляющую сопротивления нагрузки компенсируют с помощью включения в цепь реактивного сопротивления противоположного знака.

Исследование мощности в цепях переменного тока является актуальной задачей по следующим причинам:

1. Необходимо отслеживать процессы, которые происходят в линиях электропередач (ЛЭП). Например, реактивное сопротивление ЛЭП изменяется в течение всех суток, следовательно, изменяется мощность и коэффициент мощности.
2. Необходимо исследовать процесс загруженности обмоток трансформаторов, на который влияет не только коэффициент мощности, но и формы токов и напряжений обмоток.
3. Необходимо знать характер нагрузки. Для увеличения срока службы трансформаторов необходимо избегать перегрузки, и для того чтобы увеличить коэффициент использования трансформатора, необходимо обеспечить ему полную нагрузку, на которую он рассчитан.

## Способ исследования

Мгновенной мощностью называют произведение мгновенного напряжения на входе цепи на мгновенный ток.

Пусть мгновенное напряжение и мгновенный ток определяются по формулам:

$$i(t) = I_m \sin \omega t, \quad (3) \quad u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

тогда

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m [\cos(\omega t + \varphi - \omega t) - \cos(\omega t + \varphi + \omega t)] / 2 = \\ = UI \cdot \cos \varphi - UI \cdot \cos(2\omega t + \varphi). \quad (5)$$

Исследование мощности в цепях переменного тока можно проводить с помощью осциллографа, например RIGOL DS 1042C.

Принцип измерения мощности в цепи переменного тока состоит в следующем: с помощью канала А осциллографа измеряется напряжение в цепи, а с помощью канала В

осциллографа измеряется ток, протекающий в этой цепи. Затем с помощью функции умножения  $A \cdot B$  (которая имеется в осциллографе RIGOL DS 1042C) на экране осциллографа появляется временная диаграмма мощности. С помощью данного метода возможно исследовать мощность на любом участке электрической цепи. Например, на вторичной обмотке трансформатора, нагрузке и т.д. Трансформатор является одним из важнейших звеньев в электротехнике и электроэнергетике, и мы можем контролировать процессы, которые протекают в трансформаторе, например: тепловой режим, коэффициент мощности трансформатора. Основная часть нагрузки в электрических сетях в основном активно-реактивная, поэтому исследование мощности, которая выделяется в цепях переменного тока, работающих на активно-реактивную нагрузку, является актуальным.

Исследование мощности в цепи переменного тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку с мостовым выпрямителем (рис. 1).

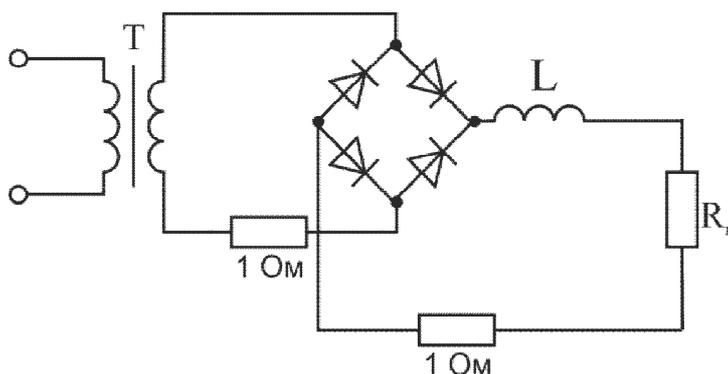


Рис 1. Схема для исследования мощности переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой с мостовым выпрямителем

Исследование показывает, как изменяется мощность во времени на вторичной обмотке трансформатора и на нагрузке.

Чтобы исследовать мощность на вторичной обмотке трансформатора, необходимо клемму первого канала осциллографа подключить к выходу вторичной обмотки трансформатора, а вторую подключить после резистора номиналом 1 Ом. Таким образом, измеряется напряжение на вторичной обмотке трансформатора и ток через нее. Ток измеряется косвенным методом: измеряется напряжение на резисторе номиналом 1 Ом и, с учетом закона Ома для участка цепи, ток, протекающий через резистор 1 Ом, равен напряжению, которое падает на этот резистор. С помощью функции умножения осциллографа наблюдается временная диаграмма мощности. Далее, изменяя активное сопротивление нагрузки, исследуем зависимость мощности во вторичной обмотке трансформатора от активной нагрузки.

Для исследования мощности в нагрузке клемма первого канала осциллографа подключается к выходу мостового выпрямителя, а клемма второго канала – после резистора номиналом 1 Ом. С помощью функции умножения получается временная диаграмма мощности в активно-индуктивной нагрузке.

Активно-индуктивной нагрузкой могут быть: асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи, реакторы.

Исследование мощности в цепи переменного тока, работающего на активно-емкостную нагрузку с мостовым выпрямителем (рис. 2).

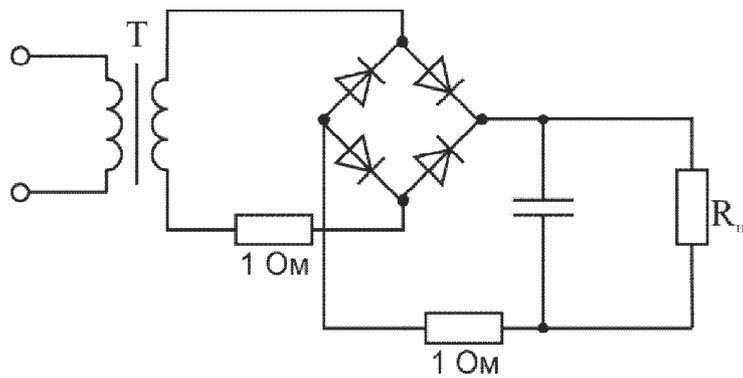


Рис 2. Схема для исследования мощности переменного тока с активно-емкостной нагрузкой с мостовым выпрямителем

В этой схеме вместо катушки индуктивности включается конденсатор параллельно активному сопротивлению нагрузки. Чтобы исследовать мощность на вторичной обмотке трансформатора, необходимо клемму первого канала осциллографа подключить к выходу вторичной обмотки трансформатора, а вторую подключить после резистора номиналом 1 Ом. Таким образом измеряются напряжение на вторичной обмотке трансформатора и ток через нее. Ток измеряется косвенным методом: измеряется напряжение на резисторе номиналом 1 Ом и, опираясь на закон Ома для участка цепи, получаем, что ток, протекающий через резистор 1 Ом, равен напряжению которое падает на этот резистор. С помощью функции умножения осциллографа получаем временную диаграмму мощности. Далее, изменяя активное сопротивление нагрузки, исследуем зависимость мощности вторичной обмотки трансформатора от активного сопротивления нагрузки.

Для исследования мощности в нагрузке клемма первого канала осциллографа подключается к выходу мостового выпрямителя, а клемма второго канала – после резистора номиналом 1 Ом. Затем с помощью функции умножения получается временная диаграмма мощности в активно-емкостной нагрузке.

Активно-емкостной нагрузкой могут быть: конденсаторные батареи, корректоры коэффициента мощности.

Также можем исследовать работу трансформатора на активную нагрузку (рис. 3), активно-индуктивную (рис. 4), активно-емкостную (рис. 5) и активную нагрузку с мостовым выпрямителем (рис. 6). Далее приведены принципиальные схемы.

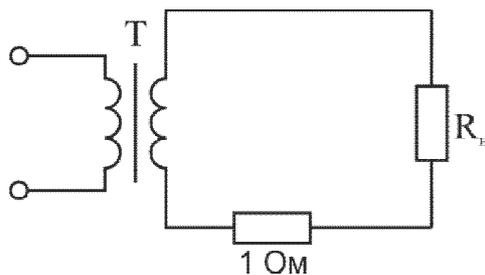


Рис 3. Схема для исследования мощности переменного тока с активной нагрузкой

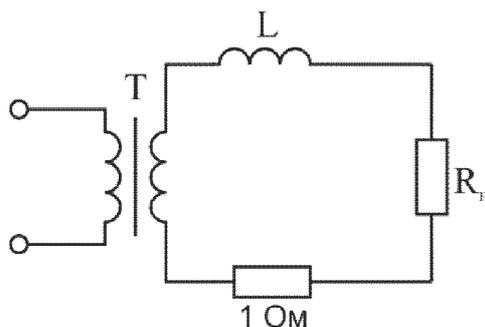


Рис 4. Схема для исследования мощности переменного тока с активно-индуктивной нагрузкой

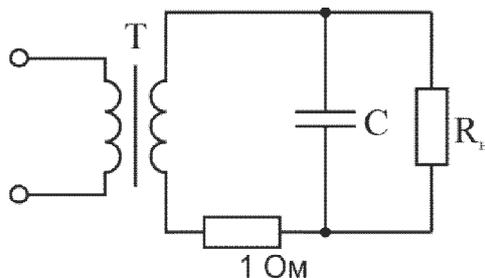


Рис 5. Схема для исследования мощности переменного тока с активно-емкостной нагрузкой

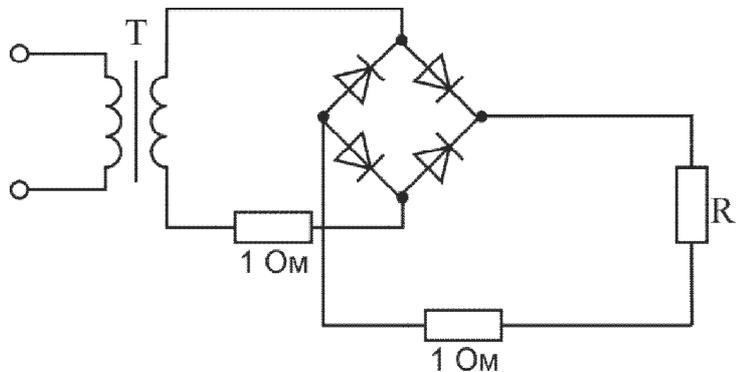


Рис 6. Схема для исследования мощности переменного тока с активной нагрузкой с мостовым выпрямителем

### Библиографический список

1. Теоретические основы электротехники /В.С. Гуров, Е.В.Мамонтов, А.П. Борисовский , С.А.Круглов. Методическое пособие. Сасово, 2008. 92 с.
2. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи/ Бессонов Л.А. М.: Издательство «Высшая школа», 1996.

УДК 621.313: 621.387, ГРНТИ 47.29.00

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ СЕТОЧНОГО УЗЛА ТИРАТРОНА НА ЕГО ЭЛЕКТРОПРОЧНОСТЬ

Д.С. Кислов, Н.М. Верещагин, С.А. Круглов, А.А. Сerezhin, С.Г. Шатилов  
 Рязанский государственный радиотехнический университет,  
 Россия, Рязань, pel@rsreu.ru

*Аннотация.* Представлены результаты моделирования распределения электрического поля в тиратроне при различных конфигурациях сетки, площадях сеточных отверстий и расстояниях между ними. Проведен сравнительный анализ глубины проникновения поля анода в катодно-сеточную область и напряжения на границе сеточного отверстия со стороны катода для разных конструкций сеточного узла и анодных напряжений.

*Ключевые слова.* Тиратрон, высоковольтная импульсная техника, электропрочность.

## INFLUENCE OF GRID THYRATRON CONSTRUCTION AT ITS ELECTRICAL STRENGTH

N.M. Vereschagin, S.A. Kruglov, A.A. Serezhin, S.G. Shatilov  
 Ryazan State Radio Engineering University,  
 Russia, Ryazan, pel@rsreu.ru

*Abstract.* Paper presents the results modeling the distribution of the electric field in the thyatron grid in different configurations, the areas of grid openings and distances between them.

*Keywords.* Thyatron, high-pulse technique, electrical strength.

### Введение

В современной высоковольтной импульсной технике большой интерес проявляется к генераторам, построенным на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ). Такие генераторы позволяют исключить ряд недостатков, свойственных генераторам с емкостным накопителем энергии [1]. Основные из них – большие массогабаритные показатели и потребность в подключении к высоковольтному источнику питания.

Для реализации всех преимуществ данного типа генераторов требуются надежные стабильные прерыватели тока. В настоящее время одним из перспективных способов обрыва тока является использование явления самообрыва тока в газоразрядных коммутаторах тока низкого давления, таких как тиратрон, псевдоискровой разрядник. В данной работе исследуемым прибором является тиратрон. Одним из ключевых условий стабильности обрыва тока является постоянство заряда, переносимого через сеточный узел. Сеточный узел тиратрона представляет собой многодырчатую диафрагму [2]. Дуговой столб под влиянием различных причин перемещается по поперечному сечению отверстий сетки, и вытеснение рабочего газа из района сеточного отверстия осуществляется последовательностью коротких пиков тока [3]. Вследствие чего откачка рабочего газа проходит неравномерно, и невозможно определить место, где начнется процесс обрыва. Для ускорения процессов распада плазмы в анодно-сеточном промежутке и, как следствие, уменьшения времени коммутации необходимо локализовать процесс обрыва тока как можно ближе к аноду. В данном случае обрыв должен происходить в отверстии сетки со стороны анода. Для этого необходимо, чтобы плотность тока в отверстии сетки со стороны анода была больше, чем плотность тока в отверстии со стороны катода, чего можно достичь, уменьшая площадь отверстия сетки со стороны анода по сравнению с площадью отверстий в экране сетки со стороны катода.

Изменение конфигурации сеточных отверстий может привести к ухудшению электропрочности прибора. Для того чтобы узнать, как изменение конструкции влияет на параметры прибора, было выполнено математическое моделирование распределения электрического поля в приборе для различных конструкций сеточного узла и анодных напряжений.

#### **Построение трехмерных моделей и задание граничных условий моделирования**

Трехмерные модели приборов с различными конструкциями сеточного узла построены в CAD системе SolidWorks 2012.

В качестве базового прибора выбран тиратрон ТГИ 500/20. Конструкции сеточных узлов обычного тиратрона и тиратрона с инверсной сеткой показаны на рис. 1.

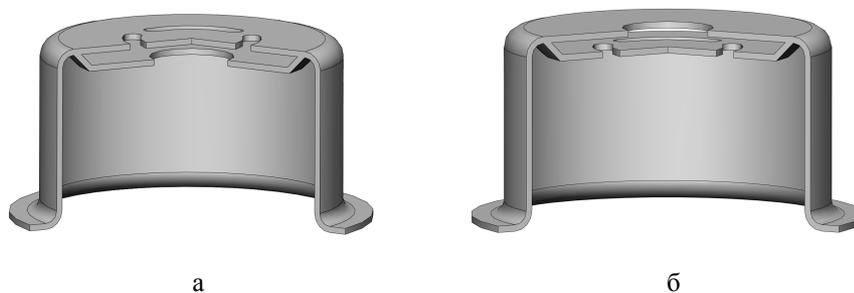


Рис. 1 – Конструкции сеточных узлов обычного тиратрона (а) и тиратрона с инверсной сеткой (б)

На электропрочность прибора влияют площади отверстий сеточного узла, расстояния между ними и расстояние между сеткой и экраном. Также, в статическом режиме, возможно некоторое уменьшение электропрочности из-за увеличения произведения  $rd$ . Произведение  $rd$  увеличивается вследствие увеличения расстояния от анода до поверхности сетки по оси прибора в конструкции тиратрона с инверсной сеткой. Однако в исследуемых режимах работы тиратрона больший интерес представляют динамические предельные характеристики, поскольку постоянное напряжение на аноде невелико. В конструкцию базовой модели вносились следующие изменения: диаметр центрального отверстия варьировался от 5 до 14 мм, ширина периферических отверстий изменялась от 1 до 5 мм, расстояние между сеткой и экраном – от 1 до 4 мм. Затем сеточные отверстия инвертировались и строились модели для тех же диапазонов измерений отверстий.

После построения трехмерные модели были импортированы в COMSOL 4.2 MultiPhysics, где для каждой модели были заданы граничные условия. Изменение электропрочности прибора оценивалось по глубине проникновения эквипотенциала 0.1 В в

катодно-сеточную область при нулевом напряжении на сетке, также оценивался потенциал на границе сеточного отверстия, смежного с катодно-сеточной областью. Моделирование производилось при трех уровнях анодного напряжения – 3 кВ, 50 кВ, 100 кВ. Данные напряжения были выбраны из следующих соображений: 3 кВ – напряжение источника питания в схеме с ИНЭ, 50 кВ – средняя амплитуда импульсного напряжения на аноде прибора, 100 кВ – максимальное импульсное напряжение, которое способен выдержать тиратрон ТГИ 500/20.

### Результаты моделирования

Распределение электрического поля, полученное в результате моделирования для тиратрона ТГИ 500/20, приведено на рис. 2.

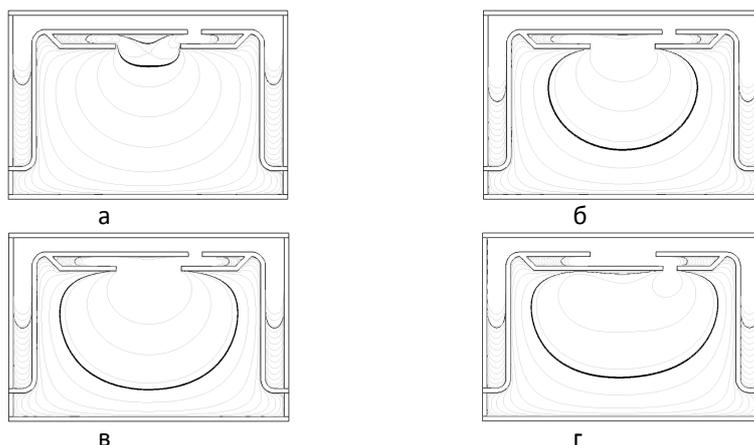


Рис. 2 – Распределение электрического поля в тиратроне ТГИ 500/20: а - анодное напряжение  $U_a=3\text{кВ}$ ; б –  $U_a=50\text{кВ}$ ; в –  $U_a=100\text{кВ}$ ; г –  $U_a=100\text{кВ}$  тиратрон с инверсной сеткой

Опираясь на предположения о неравномерности распределения потока электронов через сеточные отверстия, можно сделать вывод, что для стабильного обрыва тока в отверстиях, смежном с анодно-сеточной областью, необходимо инвертировать отверстия сетки, т.е. центральное отверстие будет расположено ближе к аноду, а периферические отверстия расположатся на экране сетки. Таким образом, поток электронов в прианодной области сеточного узла будет пересекать одно отверстие. Для увеличения плотности тока центрального отверстия сетки необходимо уменьшать его диаметр при неизменной площади периферических отверстий экрана сетки, а именно рассмотрим два случая: площадь центрального отверстия в два раза меньше суммарной площади периферических отверстий (диаметр центрального отверстия при этом равен 10 мм) и площадь центрального отверстия равна площади одного отверстия, смежного с катодно-сеточной областью (диаметр центрального отверстия равен 8 мм).

Сравнение обычных и инверсных сеток показывает незначительно меньшую глубину проникновения поля анода в катодно-сеточную область у инверсных сеток. В качестве примера на рис. 3 показаны графики зависимости глубины проникновения поля анода от анодного напряжения для обычной и инверсной сетки тиратрона ТГИ 500/20.

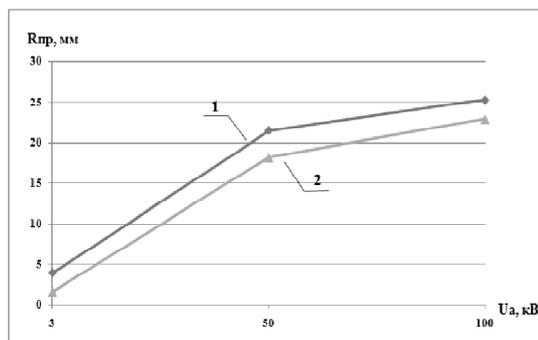


Рис. 3 – Графики зависимости глубины проникновения поля анода от анодного напряжения

На рис. 4 показаны графики зависимостей глубины проникновения поля анода от диаметра центрального отверстия инверсной сетки для трех анодных напряжений.

Из рис. 4 видно, что при диаметре центрального отверстия, равном 8 мм, поле анода не проникает в катодно-сеточную область при всех рассмотренных анодных напряжениях. При диаметре центрального отверстия, равном 10 мм, поле анода проникает в катодно-сеточную область на 0,6 мм при анодном напряжении 50 кВ и на 1,9 мм при анодном напряжении 100 кВ.

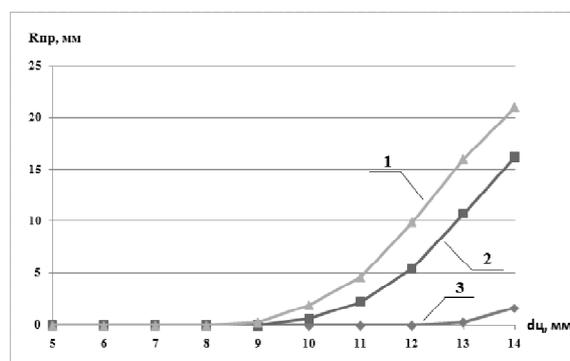


Рис. 4 - Графики зависимостей глубины проникновения поля анода от диаметра центрального отверстия инверсной сетки для анодных напряжений: 1 – 100 кВ, 2 – 50 кВ, 3 – 3 кВ

Рассмотрим зависимости глубины проникновения поля анода от диаметра центрального отверстия инверсной сетки при различных расстояниях между сеткой и экраном и напряжении анода, равном 50 кВ (рис. 5).

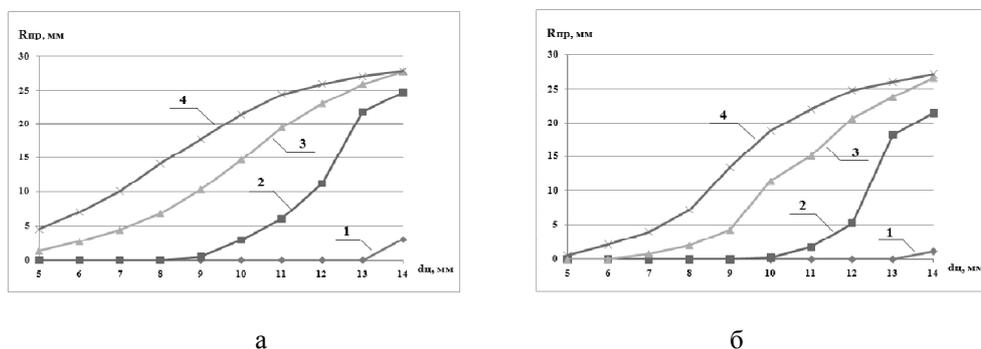


Рис. 5 - Зависимости глубины проникновения поля анода от диаметра центрального отверстия обычной (а) и инверсной (б) сетки при различных расстояниях между сеткой и экраном: 1 – расстояние сетка-экран равно 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм; 4 – 4 мм

Из приведенных зависимостей видно, что при увеличении расстояния сетка-экран глубина проникновения поля анода в катодно-сеточную область увеличивается. Также следует отметить, что сравнение обычной и инверсной сеток при различных расстояниях

сетка-экран показывает незначительно меньшую глубину проникновения поля анода для инверсной сетки.

### **Выводы**

Проведенное моделирование показывает, что глубина проникновения анодного поля в катодно-сеточную область при инверсном расположении отверстий сетки незначительно меньше, чем в обычной конструкции. Уменьшение диаметра центрального отверстия сеточного узла приводит к уменьшению глубины проникновения анодного поля. Таким образом, можно считать, что предложенные изменения конструкции сеточного узла не влияют на электропрочность прибора.

### **Библиографический список**

1. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
2. Фогельсон Т. Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. М.: Сов. радио, 1974.
3. Круглов С.А. Исследование газоразрядных коммутаторов тока в схеме с индуктивным накопителем энергии: дис. канд. тех. наук. Рязань. 2002.

## СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»

УДК 62-503.55; ГРНТИ 44.29.29; 44.29.39

### ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УЗЛОВ НАГРУЗКИ

**В.Н.Крысанов, Ю.В.Шарапов, А.Л.Руцков**

*Воронежский государственный технический университет,*

*Россия, Воронеж, alex\_8\_90@mail.ru*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки и внедрения системы диспетчерского управления промышленными объектами, обладающей высокой степенью адаптивности к технико-экономическим параметрам.

*Ключевые слова.* Энергоэффективность электроэнергетических систем; энергосбережение промышленных объектов; система диспетчерского управления; искусственные нейронные сети; нейронные нечёткие сети

### INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING OF INDUSTRIAL HUBS OF LOADING

**V. N. Krysanov, Yu. V. Sharapov, A. L. Rutskov**

*Voronezh state technical university,*

*Russia, Voronezh, alex\_8\_90@mail.ru*

*Abstract.* Theoretical and practical questions of development and introduction of system of dispatching management of the industrial facilities possessing high degree of adaptability to technical and economic parameters are considered.

*Keyword.* Energy efficiency of electrical power systems; energy saving of industrial facilities; system of dispatching management; artificial neural networks; neural indistinct networks

Воронежская электроэнергетическая система (ЭЭС) является одной из наиболее крупных в Центральном Федеральном округе РФ и характеризуется наличием большого числа распределённых узлов нагрузки, среди которых значительную долю составляют промышленные объекты: обрабатывающие производства; агротехнический комплекс; строительство (наиболее крупные потребители приведены в таблице). На долю отмеченных секторов приходится около 35% всех затрат электроэнергии, потребляемой в регионе.

По состоянию на 2015 год установленная мощность составляет 2124,6 МВт, потребление электроэнергии в Воронежской ЭЭС - 10 469,7 млн кВт/ч. Величина потерь энергии при транспортировке и потреблении составляет 8,95% или 0,937 млн кВт/ч.

Наиболее крупные промышленные потребители в Воронежской ЭЭС

Наименование потребителей	Энергосбытовая компания	Присоединённая мощность, МВт
ОАО «Воронежсинтезкаучук»	ОАО «Сибурэнергомеджмент»	45
ОАО «Минеральные удобрения»	ОАО «Воронежатомэнергосбыт»	54
ОАО «ВАСО»		15
ОАО «Рудгормаш»		10
ОАО «Павловскнеруд»		18
ОАО «ВЭКС»		17
ОАО «КБХА»	ОАО «Воронежская энергосбытовая компания»	11
ФГУП «ВМЗ»		17
ООО «Воронежский шинный завод»		15
Филиал ОАО «РЖД» - ЮВЖД	ООО «Русэнергосбыт»	118
<b>Итого</b>		<b>320</b>

Анализ структуры и особенностей работы групп крупных промышленных потребителей в пределах Воронежской ЭЭС позволяет говорить о наличии потенциала по увеличению энергоэффективности до показателей 6,5 – 7% от величины их потребления. Это позволит получить экономию в абсолютном выражении (в сравнении с показателями 2015 года и долей обозначенных потребителей в общем балансе) порядка 0,25-0,26 млн кВт/ч.

Решение этой задачи возможно только при комплексной модернизации аппаратной и программно-алгоритмической базы существующих элементов транспорта и потребления электроэнергии. Как показали исследования [1, 2]3, наибольшего эффекта позволит достичь проработка следующих аспектов:

- модернизация компонентов сетевого оборудования (в частности, автотрансформаторов (АТ), средств компенсации и регулирования параметров режимов: шунтирующих реакторов (ШР) и батарей статических конденсаторов (БСК), элементов коммутации распределительных подсистем); эта необходимость вызвана степенью износа, которая превышает для указанного оборудования 70 %, а в ряде случаев достигает 90 %;
- оптимизация режимов работы имеющегося в настоящее время оборудования (решение вопросов слабого учёта возможностей по сокращению потерь э/э; отсутствия или низкой эффективности регулирования потоков реактивной мощности);
- многофакториальный учёт параметров потребителя электроэнергии (промышленных предприятий) с учётом трудноформализуемых факторов (неопределённости, возникающие в сложных иерархических системах; изменение трендов на экономических рынках).

Остановимся более подробно на последнем пункте. Важнейшим мероприятием, позволяющим существенно увеличить эффективность энергосбережения для промышленных предприятий (и, как следствие, показатели энергоэффективности отрасли в целом), является организация современного экономико-технического управления всеми процессами, присущими данному классу объектов. Иными словами, требуется создание комплекса диспетчерского управления сложного иерархического объекта. Рассмотрим базовые подходы, наиболее часто применяемые для реализации поставленной цели.

Многокритериальная оптимизация технических систем в условиях неопределённости может быть представлена в виде:

$$\min_{d,z} (f_1(d, z, \theta), \dots, f_p(d, z, \theta)), \quad g(d, z, \theta) \leq 0, \quad \theta \in T, \quad (1)$$

где  $d, z$  – критерии оптимизации (в форме (1) - минимизации);  $f_1(d, z, \theta), \dots, f_p(d, z, \theta)$  - функции оптимизации;  $\theta$  - степень неопределённости;  $T$  – область неопределённости.

Для решения (1) могут быть применены методы усреднённого критерия (вариации метода Лапласа) и наихудшего решения (вариация критерия Гурвица, метод Гермейера). В первом случае, при отсутствии вероятности появления тех или иных состояний системы, допускают, что эти состояния равновероятны. Тогда оптимальным считается то решение, для которого среднеарифметическая оценка затрат минимальна:

$$Q^{opt} = \min Z_{icp}(F_i), \quad (2)$$

$$\text{где } Z_{icp} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Z_{ij}(F_i).$$

В случае применения критерия “пессимизма - оптимизма” (критерий Гурвица) или метода наихудшего случая (Гермейера) определяется решение  $Q^{opt}$ , для которого имеем минимальную линейную комбинацию максимальных и минимальных затрат:

$$F = \min_i Z_i^*, \quad (3)$$

где

$$Z_i^* = \lambda Z_i^+ + (1 - \lambda) Z_i^- \quad (4)$$

$\lambda$  - некоторый множитель,  $0 \leq \lambda \leq 1$ .

При значениях  $\lambda \rightarrow 1$  реализуются пессимистические оценки оптимизации ЭЭС, а при  $\lambda \rightarrow 0$  - оптимистические. В реальных системах значение  $\lambda$  должно учитываться при конкретных условиях для различных классов рассматриваемых переменных.

Стоит ещё раз отметить, что базовые методы, обозначенные в выражениях (1) – (4) применительно к промышленным потребителям, всегда должны учитывать наличие некой степени неопределённости относительно вопроса многофакторной оптимизации. Это

вызвано следующими факторами: нелинейностью в компонентах; точностью функционирования систем КИПиА; природными закономерностями; экономическими процессами.

Реализации классических систем диспетчерского управления (с применением системного подхода, методов Лапласа, Ньютона – Рафсона) предельно позволяют свести ошибку управления в контексте достижения конечного экономического показателя в реальном времени до значений 5-15% от контролируемой величины (к примеру, объём преобразованного / транспортируемого ресурса как функции от текущей стоимости ресурса на рынке; другим примером может являться минимизация затрат всех типов энергетических ресурсов на производстве как зависимости от требуемой производительности). Очевидно, что в этом направлении существует значительная возможность для увеличения степени энергосбережения и, как следствие, повышения конкурентоспособности производства, снижения величины издержек и в конечном счёте увеличения прибыли производства.

Для решения вопроса диспетчерского управления сложными иерархическими производственными объектами перспективным является применение методов искусственных нейронных (ИНС) и нейро-нечётких (ННС) сетей, которые интегрируются в соответствующие системы регулирования [1-8]. **Отметим их основные особенности применительно к многокритериальной оптимизации:**

- возможность комплексной оценки технического состояния объекта управления;
- высокая степень адаптивности (в сравнении с классическими реализациями);
- широкие возможности совместного интегрирования ИНС (ННС) и классических систем управления;
- комплексная возможность оценки технико-экономических параметров в реальном времени;
- высокие показатели сроков окупаемости и рентабельности.

Выделим следующие направления реализации СУ на базе ИНС и ННС:

- **блок оценки состояния параметров объекта управления;**
- **блок прогнозирования технико-экономических показателей;**
- **блок анализа и оптимизации элементов объекта управления.**

**Блок оценки состояния параметров объекта управления** может быть реализован, как показано в [3], на базе ИНС интерполяции и кластеризации.

Алгоритм метода включает последовательность следующих действий:

#### 1. Определение центров кластеров.

На основе неравномерных экспериментальных измерений в пространстве признаков  $x_1, x_2, \dots, x_n$   $Y$  ( $Y$ - целевой, интерполяция которого производится) осуществляется нечеткая кластеризация исходных данных. Результатом является значение центров кластеров  $m_1, m_2, \dots, m_c$ , вычисляемых итеративно по формуле:

$$m_{x_1}(f+1) = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^q(f) \cdot x_{ij}}{\sum_{j=1}^N \mu_{ij}^q(f)}, \quad (5)$$

где  $c$  – количество классов;  $N$  – число объектов кластеризации,  $l$  – количество информативных признаков,  $x_{n+1}=y$ ;  $q$  – параметр фаззификации, определяющий нечеткость кластера.

#### 2. Определение функции принадлежности кластеров.

Определение кластеров на шаге 1 осуществляется на всем пространстве  $X \times Y$ , а в практических задачах обычно требуется определить некоторое значение  $u$  при заданном значении входного вектора  $X$ . Данная модель достигается построением проекций  $m_i^{xj}$  центров кластеров на координатное пространство, где  $j=1, \dots, n$ ,  $i=1, \dots, c$ , которые и

рассматриваются в качестве «существенных» (опорных узлов) точек, являющихся центрами функций принадлежности  $\mu_{ij}^x$  каждого из кластеров:

$$\mu_{ij}^x(x) = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \frac{d_{ij}^x(x)^{q-1}}{d_{kj}^x}} = \mu_i^x(x_i), \quad (6)$$

где расстояние между вектором  $x_i$  и центром кластера  $m_i^x$  определяется только во входном пространстве формулой:

$$d_{ij}^x(x) = |x - m_i^x| = \sqrt{(x_i - x_i^x)^T \cdot A(x_j - x_j^x)}. \quad (7)$$

### 3. Вычисление выхода нечеткой модели.

Выходное значение  $y$  определяется на основе вычислительных функций принадлежности к заданным кластерам каждой точки полного координатного пространства интерполируемой поверхности и вычисляется по формуле:

$$y(x_j) = \frac{\sum_{j=1}^c m_i^y \cdot \mu_i^x(x_i)}{\sum_{i=1}^c \mu_i^x(x_i)}. \quad (8)$$

### 4. Итеративное уточнение модели.

Полученная модель представляет собой обобщенное представление моделируемого пространства переменных. В точках пространства, для которых ошибка имела максимальное значение, формируются собственные функции принадлежности на основе выражения (6) и уточнение модели по формуле (8).

**Блок прогнозирования технико-экономических показателей в режиме реального времени** может быть реализован для различных приложений, как это показано в [4, 5], на базе алгоритма Мамдани для нейро-нечёткой сети. Так, на рисунках 1, 2 приведены функциональная схема реализации СУ, структура ННС и результат её функционирования применительно к вопросу прогнозирования потребления электроэнергии промышленным предприятием г. Воронеж (в качестве примеров были проведены расчёты для ОАО «Электросигнал», ОАО «Воронежсинтезкаучук»).

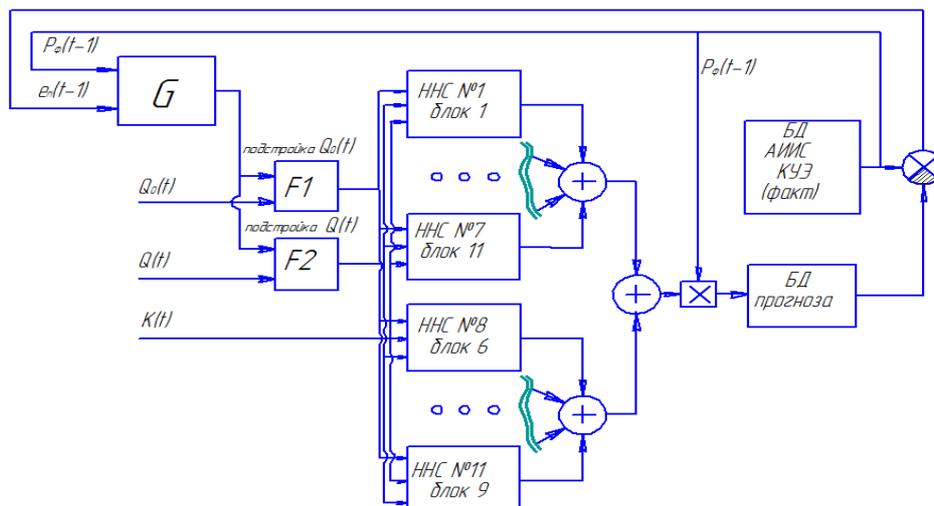


Рис. 1. Функциональная схема реализации СУ для прогнозирования потребления электрической энергии на базе ННС

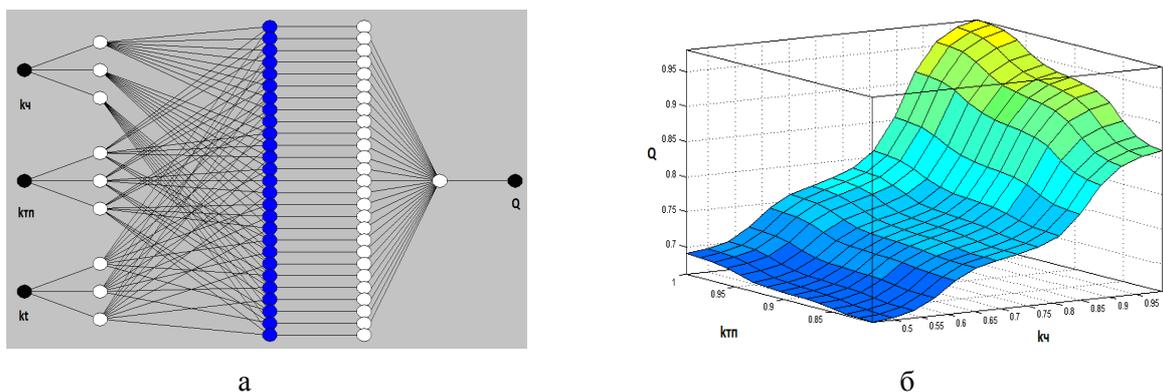


Рис. 2. Структура ННС для алгоритма Мамдани (а); пространственная кривая прогнозного значения потребления электроэнергии промышленным предприятием (б)

В качестве примера реализации **блока анализа и оптимизации элементов объекта управления** может быть рассмотрен вопрос управления асинхронными электроприводами (система ИНС-ПЧ-АД)[6,7], осветительной нагрузкой [8].

Во всех означенных теоретических приложениях методы ИНС и ННС показывают высокую степень эффективности в части повышения энергосбережения промышленных узлов нагрузки. Это выражается:

- в повышении эффективности функционирования исполнительных механизмов / систем (ПЧ-АД, УПП-АД, осветительная и отопительная нагрузка) на величину 5-10 % в сравнении с классическими методами организации СУ;
- увеличении точности прогнозирования потребления электроэнергии на величину 3 – 15 % в сравнении с экспертными, регрессионными методами;
- комплексном повышении функциональных возможностей объектов управления;
- возможности прямого совместного анализа экономико-технических параметров;
- ориентировочных диапазонах сроков окупаемости (от 0,5 до 5 лет) и рентабельности (0,2-0,35) для различных подструктур и блоков.

### Библиографический список

1. Бурковский В.Л. Модель прогнозирования регионального энергопотребления на базе нечёткой нейронной сети / В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015.– Т.11 – № 5. – С. 41-46.
2. Крысанов В.Н. Особенности реализации технологии Smart Grid в региональных системах электроснабжения / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014.– Т.10 – № 5-1.– С. 92-97.
3. Крысанов В.Н. Пространственный 3-d интерполятор с использованием нечёткой логики / В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Ю.В. Шарапов // XI Международный семинар "Физико-математическое моделирование систем" (ФММС-14), Воронеж 27-28 ноября 2014 г.
4. Крысанов В.Н. Прогнозирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с использованием методов искусственных нейронных и нейро-нечётких сетей/ В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Международная (XIX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП-2014), Саранск, 7-9 октября 2014 г.
5. Крысанов В.Н. Прогнозирование потребления электроэнергии территориальными сетевыми организациями с использованием методов нейро-нечётких сетей / В.Н. Крысанов, К.С. Гамбург, А.Л. Руцков // Электротехнические комплексы и системы управления - 2014.– №2. – С.40 – 46.
6. Данилов А.Д. Возможности применения нейро-нечётких сетей для оценки и регулирования состояния элементов предприятия деревообрабатывающей отрасли / А.Д. Данилов, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Вестник Воронежского государственного лесотехнического университета. – 2015.– Т.3 – № 5-4 (16-4). – С. 78-81.
7. Крысанов В.Н. Математическое моделирование искусственных нейронных сетей в структуре трансекторного управления системой ПЧ-АД/ В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков // Электротехнические комплексы и системы управления - 2013.– №1. – С.30 – 35.
8. Крысанов В.Н. Энергоэффективные алгоритмы управления системами осветительной нагрузки/ В.Н. Крысанов, К.С. Гамбург, А.Л. Руцков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013.– Т.9 – № 3-1. – С. 142-147.

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДУЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СВОБОДНОПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

А.А. Демьянов

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, Ademyanov31@gmail.com*

*Аннотация.* Исследовано применение спектральных методов оценки параметров выходного напряжения универсального модуля генерации. Приведены основные расчетные соотношения и результаты моделирования цифровых фильтров, повышающих точность измерения параметров напряжения.

*Ключевые слова.* Спектральный анализ, двигатель Стирлинга, генерация электроэнергии, гармоники, цифровая обработка сигналов

## THE SPECTRAL ANALYSIS OF OUTPUT VOLTAGE IN MULTIPURPOSE GENERATION MODULE BASED ON FREE PISTON STIRLING ENGINE

A.A. Demyanov

*Ryazan State Radio Engineering University,  
Ryazan, Russia, Ademyanov31@gmail.com*

*Abstract.* We consider the spectral methods for estimating the parameters of the multipurpose generation module output voltage. Shows the basic calculation relations and simulation results of digital filters improves the accuracy of measurement of voltage parameters.

*Keywords.* Spectral analysis, Stirling engine, electricity generation, harmonics, digital signal processing

Для питания аппаратуры расположенной в труднодоступных местах, удобно использовать автономные модули генерации. Перспективным направлением в этой области является применение двигателей Стирлинга в данных установках. Системы, основанные на двигателях Стирлинга, экологичны и экономичны. Для эффективной работы потребителей нужен контроль качества электроэнергии. Высокую точность оценки измерений гармонических составляющих напряжения обеспечивает цифровая обработка сигналов. В основе данного метода лежит использование быстрого преобразования Фурье (БПФ). В рамках статьи исследовано применение процедуры БПФ сигнала. Применение дополнительных методов обусловлено недостаточной точностью определения частоты с помощью БПФ, т.к. максимум БПФ может не совпадать с максимумом спектра напряжения, и направлено на минимизацию расстояния между реальным и вычисленным пиками. К приборам контроля показателей качества относятся анализаторы качества напряжения, осциллографы, электроанализаторы. В качестве примера можно привести анализатор качества электроэнергии LPW-305 фирмы L-Card. Данный прибор предназначен для мониторинга и контроля показателей качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 51317.4.30-2008 класс А и ГОСТ 54149-2010 [2]. Прибор МІ 2892 фирмы Metrel является прибором класса А по ГОСТ 30804.4.30, предназначен для мониторинга и контроля качества электроэнергии [3].

Сигнал на выходе генератора представляет собой синусоиду, содержащую в своем составе паразитные гармонические составляющие. Причиной появления гармоник является емкостный характер нагрузок, а также использование мощных вторичных источников электропитания (ВИЭП). Большинство ВИЭП используют в своей работе широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) как для коррекции коэффициента мощности, так и для стабилизации выходного напряжения [1]. При реализации ШИМ происходит высокочастотная (ВЧ) коммутация силовых ключей и протекающего через них тока. Поэтому все ВИЭП снабжаются на входе фильтрующими устройствами. Однако работа фильтров, хоть и позволяет снизить уровень помех, но не избавляет от них полностью. Остатки фильтрации, а также влияние емкостной нагрузки вносят гармонические искажения напряжения и тока генератора.

Целью исследования является получение оценок параметров напряжения, вырабатываемого электрогенератором. В ходе исследования необходимо произвести

моделирование цифровых фильтров, устраняющих вредные влияния высших гармоник, сделать выводы о повышении точности измерения параметров с использованием цифровой обработки.

Обрабатываемый сигнал представляет собой однофазное сетевое напряжение промышленной частоты: действующее значение 230 В, частота 50 Гц (рисунок 1). В сигнале, полученном экспериментально (рисунок 2), содержатся 3-я, 5-я, 7-я и 11-я гармоники, кратные основной частоте, а также остатки фильтрации ШИМ: амплитуда 1 В, частота 30 кГц, коэффициент заполнения 30%.

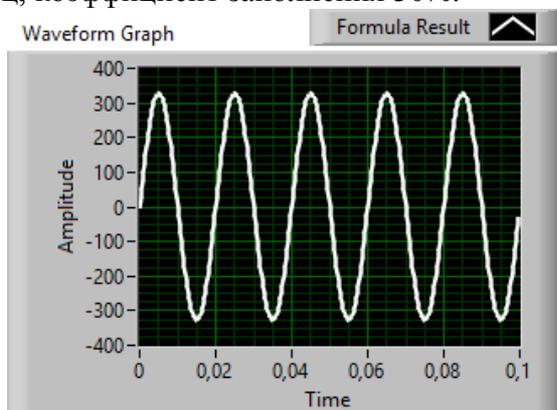


Рис. 1. Напряжение на выходе генератора

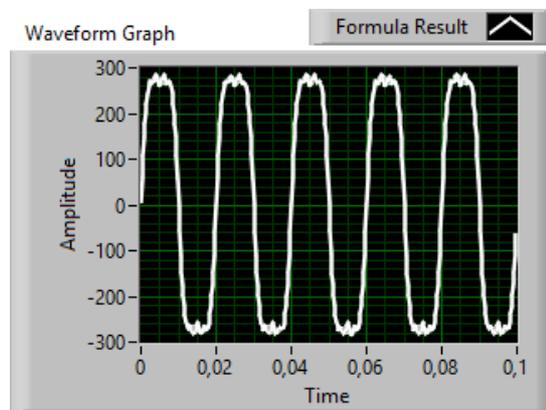


Рис. 2. Исследуемый сигнал после преобразования

К основным параметрам сигнала относятся: действующее значение напряжения и тока генератора, частота генерируемого сигнала, фаза. Энергетические параметры сигнала: коэффициент мощности и коэффициент гармоник. Приведенные параметры рассчитываются с помощью осциллограмм, полученных в программе моделирования LabVIEW, а также внутренних блоков измерения. Для расчета параметров будем использовать следующие известные соотношения:

Действующее значение напряжения

$$U_d = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} u_k^2}, \quad (1)$$

Коэффициент гармоник

$$K_r = \frac{\sum_{k=2}^N U_k^2}{U_1}. \quad (2)$$

Одним из важных показателей качества вырабатываемой электроэнергии является форма сигнала. Синусоидальность сигнала оценивается с помощью параметра – коэффициент гармоник. Построим спектр средних значений исследуемого сигнала и с его помощью найдем коэффициент гармоник (рисунок 3):

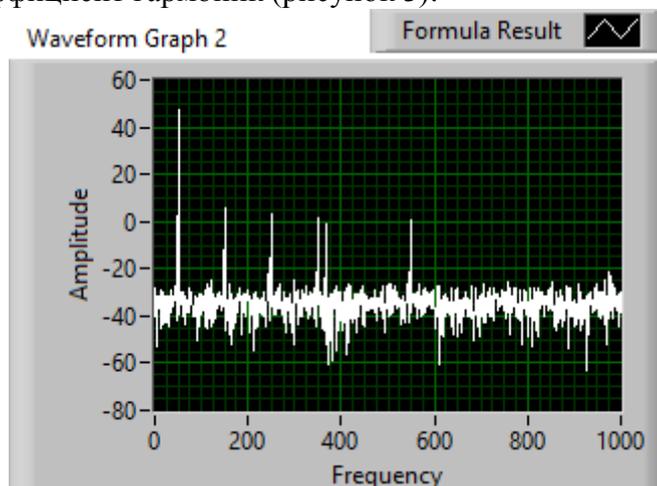


Рис. 3. Спектр исследуемого сигнала

В спектре хорошо различимы основной сигнал, кратные основной частоте нечетные гармоники, а также гармонические составляющие спектра периодической последовательности прямоугольных импульсов. По оси абсцисс отложены значения частоты в герцах. По оси ординат отложены действующие значения напряжения суммы сигналов в децибелах (отсчет ведется относительно нуля). С помощью спектра определим значения гармоник (таблица 1). Далее несложно определить искомый параметр:

Таблица значений спектра сигнала

№ гармоники	Среднее значение напряжения, дБ	Среднее значение напряжения, В
0	49,07	284,119
1	6	1,995
2	4,9	1,758
3	2,5	1,334
4	0	1
5	1	1,122
Уровень шума (noise)	-20	0,1

$$K_r = \frac{\sum_{k=1}^5 U_k + noise}{U_0} = 0,028.$$

Применение цифровой фильтрации позволяет добиться более точных результатов при оценке параметров сигнала, то есть улучшает качество обработки. Для сравнительного анализа, а также оценки эффективности рассмотрим два фильтра с различной топологией построения: фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) и фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). При использовании НЧ КИХ фильтра 39 порядка с частотой среза 60 Гц заметно улучшается форма сигнала (рисунок 4). По его спектру (рисунок 5) можно оценить коэффициент гармоник:

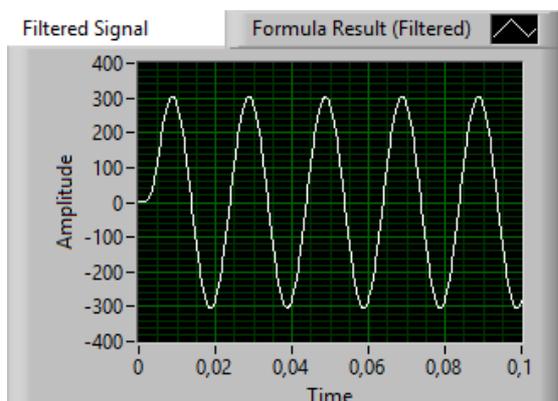


Рис. 4. Сигнал на выходе КИХ фильтра

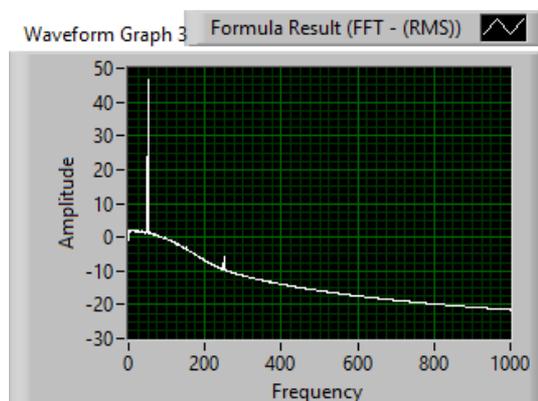


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе КИХ фильтра

$$K_r = \frac{\sum_{k=1}^2 U_k + noise}{U_0} = 0,006.$$

Действующее значение напряжения при использовании КИХ фильтра равно 217,91 В. Значение измеренной частоты – 49,997 Гц.

При использовании НЧ БИХ фильтра Чебышева форма сигнала стремится к идеальной (рисунок 6). По его спектру (рисунок 7) определяем коэффициент гармоник

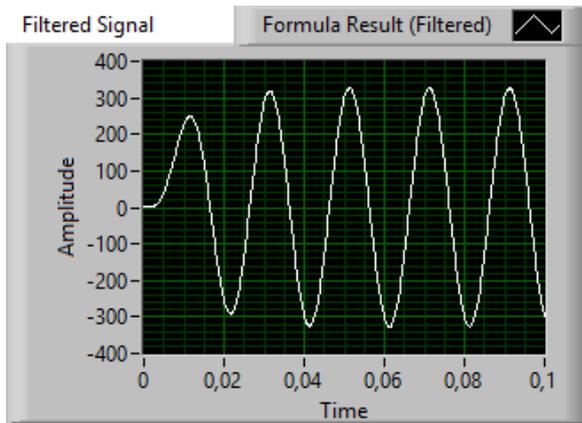


Рис. 6. Сигнал на выходе КИХ фильтра

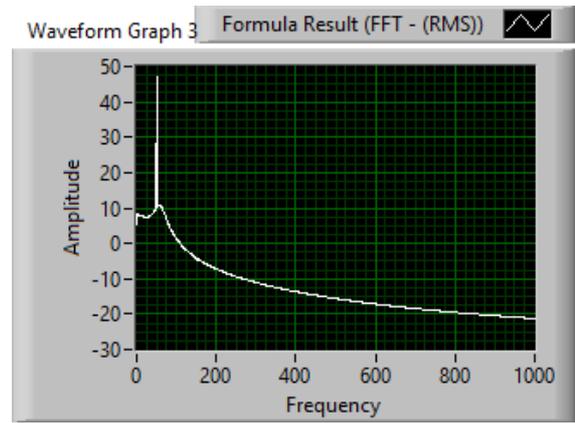
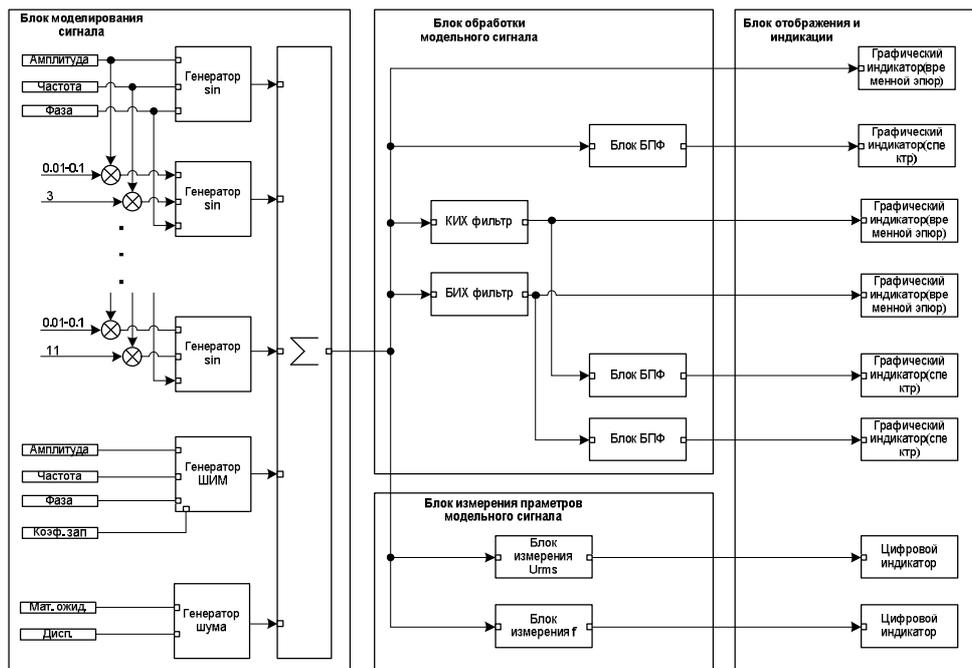


Рис. 7. Спектр сигнала на выходе КИХ фильтра

$$K_r = \frac{\text{noise}}{U_0} = 0,003.$$

Об улучшении формы свидетельствует низкое значение коэффициента гармоник. Действующее значение напряжения при использовании БИХ фильтра равно 230,06 В. Значение измеренной частоты – 51,0134 Гц.

Ниже приведена структурная схема алгоритма моделирования устройства генерации, обработки и отображения сигнала:



Структурная схема состоит из четырех блоков: блок моделирования сигнала, блок обработки, блок измерения и блок отображения. В блоке моделирования сигнала осуществляется ввод исходных данных. В блоке обработки вводятся параметры модели. Блок измерения позволяет с помощью встроенных средств LabVIEW проводить измерения действующего значения напряжения и частоты [4, 5]. Блок отображения состоит из графических индикаторов (осциллографов) и цифровых индикаторов.

Использование цифровых фильтров в рамках данной задачи возможно исключительно для анализа качества напряжения электрогенератора. Сравнительная характеристика БИХ и КИХ фильтров показывает, что оба метода имеют как достоинства, так и недостатки. БИХ фильтр позволяет достаточно точно определить действующее значение напряжения. КИХ фильтр, наоборот, позволяет более точно определить значение частоты напряжения, чем БИХ фильтр. Оба фильтра справляются с задачей подавления высших гармоник и

обеспечивают низкие значения коэффициента гармоник. Данная методика в дальнейшем найдет свое применение в задачах измерения и контроля параметров напряжения на выходе универсального модуля генерации.

### **Библиографический список**

1. Юхименко М.Ю. Режимы управления преобразователями переменного напряжения с улучшенным гармоническим составом выходного напряжения/ М.Ю. Юхименко// Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского.
2. L-Card: [Электронный ресурс]. 1987-2016. Режим доступа: <http://www.lcard.ru/>.
3. ООО «Евротест»: [Электронный ресурс]. 2010-2016 Режим доступа: <http://www.metrel-russia.ru/>.
4. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие/ под ред. В.П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.
5. Суранов А.Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

УДК 621.3; ГРНТИ 45.31.29

## **ЭЛЕКТРОННО-ИМПУЛЬСНЫЕ ЗАРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ**

**Д.Д. Мансеров**

*Рязанский государственный радиотехнический университет*

*Аннотация.* Рассматриваются теоретические и практические вопросы применения различных зарядных станций для питания электромобиля.

*Ключевые слова.* Зарядные станции, электромобили.

### **CHARGERS FOR ELECTRIC VEHICLES**

**D.D. Mantserov**

*Ryazan State Radio Engineering University*

*Annotation.* The theoretical and practical aspects of applying different charging stations for electric power.

*Keywords.* Charging stations, electric vehicles.

В современном мире наибольшее распространение получили средства личного и грузового транспорта на двигателях внутреннего сгорания. В связи с тем, что запасы углеводородов не бесконечны и истощатся по оценкам в ближайшие полвека, с обострением экологических и геоэкономических проблем многие фирмы и конструкторские бюро в последние 20 лет начали искать пути избавления от углеводородов во многих сферах его применения.

Основной альтернативой автомобилю на двигателе внутреннего сгорания, в машиностроении, стали электромобили. Разработкой электромобилей занимаются уже более 100 лет, но основные проблемы не изменились:

- 1) уменьшение ценовой стоимости электромобиля и его комплектующих;
- 2) средство быстрой зарядки и их средняя плотность на автострадах и в городской черте.

- 3) эффективная и надежная аккумуляторная батарея;

Существует несколько типов аккумуляторных батарей:

- 1) свинцово-кислотные аккумуляторные батареи;

- 2) литий-ионные аккумуляторы;

- 3) натрий-никель-хлоридные аккумуляторы.

В данной статье нас не интересуют их достоинства и недостатки, скажем лишь, что сейчас для электрокаров применяются литий-ионные и натрий-никель-хлоридные аккумуляторы, так как обладают возможностью быстрой подзарядки. Сейчас автопроизводители используют аккумуляторы, состоящие из многих блоков низковольтных аккумуляторов. Также нельзя не отметить, что рыночная стоимость данных аккумуляторов довольно высока, а в обращении с литий-ионными аккумуляторами следует беречь их от ударов, так как это может привести к взрыву, а с натрий-никель-хлоридными следить за рабочей температурой.

Итак, проведя краткий экскурс в проблематику электромобилей, сосредоточусь на проблеме, которую хочу обсудить в данной статье, а именно средства быстрой зарядки и их средняя плотность. Для начала стоит сказать, что зарядные устройства необходимы, так как увеличивают скорость зарядки (около суток от домашней розетки и восемь часов от этой же розетки, но с использованием зарядной станции), обеспечивают повышенную безопасность (так как защищены от влаги и пыли улицы) и увеличивают срок службы аккумуляторов (хоть и незначительно, но, тем не менее, более стабильный ток зарядки лучше сказывается на аккумуляторе). Нельзя не сказать о том, что аккумуляторы имеют нелинейную скорость зарядки, но зарядные станции предусматривают и этот факт, изменяя выходной ток, если это требуется.

Перейдем к классификации зарядных устройств. По типу выходного тока зарядные станции делятся: на станции быстрой зарядки (напряжение входа 200-400 В, выходной ток постоянен со значением до 200 А, максимальная мощность до 100 кВт) и станции стандартной зарядки (200 В, выходной ток переменен до 32 А, максимальная мощность до 7 кВт). Также Международная электротехническая комиссия (МЭК) разделяет режимы работы зарядных станций:

- 1) медленная зарядка от обычной электрической розетки (1 или 3-фазный);
- 2) медленная зарядка от обычной розетки, которые оснащены EV защитой;
- 3) медленная или быстрая зарядка с помощью специального EV контакта или разъема (например, IEC 62196);
- 4) быстрая зарядка с помощью специальных технологий. Международный стандарт быстрой зарядки электромобилей постоянным током, изначально разработанный ассоциацией CHAdeMO.

По типу разъемов устройства делятся на 4 типа:

- 1) J1772, разработанный в США SAE в 2009 году; предлагает стандарт на 120 В и на 240 В. Планируется также добавить вариант разъема с дополнительными штифтами для размещения быстрой зарядки на 200-450 В.
- 2) IEC 62196-2, европейский стандарт до 400 В.
- 3) CHAdeMO, разработан в 2010 году одноименной ассоциацией, которая была основана крупнейшими японскими автопроизводителями. Большинство зарядок этого типа выполнены в диапазоне: 240V/30A в США и Японии, 240 В/70А в Канаде или 230 В/15А или 3Ф400 В/32А в Европе и Австралии.
- 4) CCS – единый стандарт, о котором договорились в 2012 году крупнейшие европейские и американские производители; позволяет использовать упомянутые выше разъемы для зарядки.

Следует отметить, что зарядка аккумулятора осуществляется тем быстрее, чем больше выходной ток зарядного устройства (токовые значения могут достигать до 200 А). С этим связан ряд технических сложностей при разработке блока питания, и требуются отдельный автомат и дополнительные средства защиты для розетки, с которой заряжается электрокар. На данный момент устройства зарядки электромобилей делятся по напряжению на два основных типа: 230 В (однофазные) и 400 В (трехфазные). Первые характеризуются медленной (в среднем около 8 часов) зарядкой, средним значением выходного тока в 16 А для большинства производителей. К преимуществам следует отнести общедоступность, так как розетка 220-230 В широко распространена в мире. Вторые (трехфазные) могут заряжать до 80% заряда аккумулятора за полчаса, остальные 20% заряжаются еще полчаса, итого общее время зарядки приблизительно составляет 1 час. Выходной ток 400-вольтного зарядника может быть и больше 200 А. К недостаткам следует отнести: повышенные требования безопасности, дополнительную установку систем охлаждения внутри зарядной станции, сложность ввиду несовместимого размещения розеток в 400 В. Сейчас большинство мощных преобразователей в зарядных станциях – это электронно-импульсные преобразователи, так как КПД данного преобразователя зависит от комплектующих и производителя, порядка 80-90 %.

В наше время сложилась неоднозначная ситуация с размещением зарядных станций в мире. Сегодня инфраструктура зарядных станций электромобилей активно увеличивается во всем мире, но ряд развитых стран ушел далеко вперед по развитию данной области.

В США сеть зарядных станций начала сильно увеличиваться после запуска правительственной программы субсидирования электрокаров в 2008 г. Государственный Правительственный план предусматривал налоговое обложение для гибридного электротранспорта менее чем через год после того, как будет продано 250 тыс. таких авто. В инфраструктуре также ввели льготы - компенсация за установку общественной зарядной станции достигает 50%, но не более 25 тыс. долларов. 30,868 станций и скоростных зарядок смогли развить США за несколько лет, что позволило им занять одно из ведущих положений в этой отрасли. Несмотря даже на то, что у большинства американцев электрокар - второй автомобиль, в стране работает 15 тысяч общественных зарядных станций.

Власти же КНР хотят построить к 2020 году зарядные станции в количестве, достаточном для обслуживания около 5 млн электромобилей. В свою очередь европейские страны используют разные способы развития инфраструктуры для электромобилей. Например, Германия ставит целью иметь 1 млн электромобилей к 2020 году. Для этого она пользуется приемами как США, так и КНР.

Другая европейская страна – Норвегия уже в девяностых годах начала стимулировать граждан к переходу на электромобили. Норвегия планирует отменить импортную пошлину и дорожные платежи для электрокаров.

А в Эстонии удалось создать один из наиболее удачных проектов инфраструктуры зарядных станций с помощью госпрограммы.

Также стоит отметить роль бизнеса, который активно вносит предложения по развитию электромобильной инфраструктуры – к примеру, голландская компания Fastned построила полсотни прогрессивных и доступных скоростных зарядных комплексов в Голландии и теперь нацелена на всю Европу.

На 2016 год ситуация с зарядными станциями в нашей стране не сильно изменилась по сравнению с 2015 годом (36 зарядных станций). Дело в том, что в РФ еще не сильно развиты продажа и техническое обслуживание электромобилей в силу их малого количества, так как экономическая ситуация и малая мобильность электрокаров не способствуют их развитию в нашей стране.

Но несмотря на малую потребность, концерн «Радиоэлектронные технологии» (КРЭТ) Госкорпорации Ростех разработал универсальные электрочарядные станции (ЭЗС) «ФОРА» для экспресс-зарядки аккумуляторов электромобилей российского и зарубежного производства. Две модификации опытных образцов электростанций, от которых могут подзаряжаться не только российская ВАЗ-1817 «Ellada» («быстрая» зарядка), но и все электромобили зарубежного производства («медленная» зарядка), будут представлены в павильоне КРЭТ (СЗ) на III Международном форуме «Технологии в машиностроении-2014» - сообщил нам 12 августа 2014 г. сайт [http://rostec.ru/content/files/press-rel/press\\_release-KRET-electrocrs-TVN2014.pdf](http://rostec.ru/content/files/press-rel/press_release-KRET-electrocrs-TVN2014.pdf)

Поэтому можно говорить о начале развития новой отрасли в нашей стране.

### **Библиографический список**

1. ГОСТ Р МЭК 61851-1.
2. Развитие инфраструктуры для электромобилей: мировой опыт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sea.com.ua/news/view3372.html> (дата обращения 20.02.2016).
3. Как заряжать литий-ионные аккумуляторы на электромобилях? [Электронный ресурс]. URL: <http://avto-flot.ru/blog/kak-zaryajat-litii-ionnyie-akkumulyatoryi-na-elektromobilyah.html> (дата обращения 20.02.2016).
4. КРЭТ создал универсальные зарядные станции для электромобилей [Электронный ресурс]. URL: [http://rostec.ru/content/files/press-rel/press\\_release-KRET-electrocrs-TVN2014.pdf](http://rostec.ru/content/files/press-rel/press_release-KRET-electrocrs-TVN2014.pdf) (дата обращения 20.02.2016).

## СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ».....	3
Цветков И.А. Бентовые функции выбора.....	3
Тярт Н.А., Степанов Н.Н. Метод k ближайших соседей и его программная реализация для автоматизированной классификации объектов.....	7
Толстова И.С., Гаврилов А.Н., Абрамов Г.В. Разработка программы для имитационного моделирования электродугового синтеза углеродных наноструктур.....	11
Ивутин А.Н., Ларкин Е.В. Оптимизационные задачи на сетях Петри-Маркова.....	13
Ежов А.А., Новиков А.С. Обзор основных видов нейронных сетей и их практическое применение.....	16
Софьин Е.А., Решетова В. С. Анализ работы алгоритмов роя частиц и пчелиного роя.....	21
Михеева О.Ю., Иванов М.А., Куликов К.В. Шаблоны компонента HEAT в OPENSTACK ..	25
Мартынова Л.Е., Цуканова Н.И. Разработка программного обеспечения для анализа эффективности работы электронной очереди.....	29
Макаров Д.В., Бурковский В.Л. Модели элементов распределенной информационной системы в рамках сети массового обслуживания.....	31
Ларионов С.М., Селяев А.А. Метод слежения за объектом на сложном фоне.....	33
Кузянов С.С. Анализ влияния изменений требований к программному обеспечению при его разработке.....	37
Майков К.А. Логико-лингвистическая модель коррекции ошибок нечеткого вывода.....	39
Корнев П.А., Шолохов А.В. Основы синтеза систем искусственного интеллекта для решения сетевых проблем.....	43
Клюева И.А. Исследование характеристик сходимости алгоритма роя частиц и его модификации в решении задачи глобальной оптимизации.....	46
Калачев А.В., Войнов А.С., Сенокосов И.В., Панюшкина Л.И. Моделирование системы управления топливозаправкой в среде программирования ПЛК "ГЕВ Automation".....	50
Неменко М.В., Лесько С.А., Жуков Д.О. Разработка алгоритмов моделирования работы транспортных сетей на основе теории перколяции.....	54
Жданкина Е.А. Исследование возможностей оптимизационного алгоритма распространения земляники.....	58
Елизаров Д.Э., Бурковский В.Л. Программное обеспечение моделей оптимального развития структуры мультисервисных сетей.....	63
Дубинин В.Н., Вашкевич Н.П., Климкина Л.П. Спецификация базисных функциональных блоков IEC 61499 с использованием языка AsmL.....	67
Веденяпин И.А. Разработка алгоритма многопоточного опроса объектов мониторинга локальной вычислительной сети.....	72
Астахова Н.Н., Демидова Л.А. Вопросы многоцелевой оптимизации в задачах индивидуального и группового прогнозирования временных рядов с применением моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора.....	76
СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ».....	80
Бакари К., Челебаев С.В. Система преобразования с частотными датчиками на основе радиально-базисной сети.....	80
Мясин П.Ю. Информационные угрозы автоматизированных систем управления военного назначения.....	83
Кашицына А.А. Исследование эффективности использования реляционных и объектных СУБД в функциональном проектировании программного обеспечения.....	86

Кузьмин Ю.М., Рыжиков А.С. Механизмы защиты от несанкционированного доступа в LINUX .....	91
Панченко А.А. Особенности оценки эффективности блокирования узкополосных аналоговых и широкополосных цифровых радиосигналов с помощью генератора электромагнитного шума.....	93
Овчинникова А.С., Пржегорлинский В.Н. Методы расчета коэффициентов индивидуальных особенностей голоса в системах голосовой аутентификации дикторов.....	97
Искаков Т.А. Использование информационных систем при организации культурно-массовых мероприятий.....	99
Барабанов В.Ф., Гребенникова Н.И., Нужный А.М. Разработка универсальной графической автоматизированной информационной системы.....	103
Волосенков В.О., Андреева О.Н. Оценка угроз информационной безопасности распределённых вычислительных систем.....	106
Майоров Г. О. Шифрование отдельных блочных устройств и полнодисковое шифрование в семействе ОС GNU/LINUX с использованием DM-CRYPT.....	109
<b>СЕКЦИЯ «ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ».....</b>	<b>114</b>
Ушенкин В.А. Комбинирование методов развертывания фазы при интерферометрической обработке радиолокационной информации.....	114
Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка информации от радиолокационных систем ДЗЗ с использованием априорных данных.....	117
Колесенков А.Н., Мелкова Д.А. Методы кластеризации данных в геоинформационных системах .....	121
Колесенков А.Н., Несова А.В. Генетические подходы в задачах экологического мониторинга объектов и территорий .....	124
Касимов А.Э., Суздальцев В.А. Построение трехмерной модели рельефа местности на основе данных картографии .....	127
Акинина Н.В., Акинин М.В., Таганов А.И. Детектирование несанкционированных свалок мусора на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли.....	129
Абдухаликов А.А., Беляков П.В., Никифоров М.Б. Реализация на ПЛИС алгоритма поиска ключевых точек на изображении.....	133
<b>СЕКЦИЯ «МИКРОВОЛНОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>137</b>
Смирнов В.А., Акимов П.И., Антонов В.В., Гладышев Д.А., Грызлов А.В., Потапов Ю.А., Сигалаев В.Н., Симонов А.С., Судаков Ю.С., Чудин В.Г. Катодные узлы для ускорителей электронов.....	137
Акимов П.И., Дударев К.П., Кузнецов И.С., Мартыненко М.А., Мельничук Г.В., Прокофьев Б.В., Саблин В.М., Сергеев К.Л., Терентьев Д.А., Фрейдович И.А., Фролов И.С., Чудин В.Г., Шведунов В.И. Мощный импульсный многолучевой клистрон для питания линейного ускорителя электронов .....	141
Ефремова М.В., Морев С.П., Муравьев Э.К. Особенности проектирования ЭОС ЛБВ миллиметрового диапазона с МПФС.....	146
Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Кравченков М.А., Морев С.П., Муравьев Э.К. Особенности проектирования электрооптической системы мощного вакуумного СВЧ прибора миллиметрового диапазона с реверсной магнитной системой.....	151
Акимов П.И., Гаврилин А.А., Никитин А.П., Саблин В.М., Чудин В.Г., Сыровой В.А., Богословская А.Б. Возможности расчета приборов СВЧ с плоскосимметричными электронными пучками.....	155
Калашников Д.А., Акимов П.И., Сенатов О.И., Чудин В.Г. Методика настройки магнетронов, используемых в линейных ускорителях электронов .....	159
Дударев К.П., Коннов А.В. Оптимизация циклического СВЧ дефростера .....	162

Воробьев М.Д., Кумов Я.С., Чудин В.Г., Юдаев Д.Н. Низкочастотные шумы, создаваемые дефектами эмитирующей поверхности термоэлектронных катодов .....	167
Акимов П.И., Асташов С.Г., Калашников Д.А., Котрелева Н.С., Коннов А.В., Сигалаев В.Н., Чудин В.Г. Проектирование магнетрона дециметрового диапазона.....	170
Акимов П.И., Грызлов А.В., Гладышев Д.А., Невский П.В., Смирнов В.А., Фрейдович И.А, Чудин В.Г., Шведунов В.И. Электронная пушка линейного ускорителя электронов.....	175
Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Цифровое управление вибрационной частотной подставкой в лазерном гироскопе.....	179
Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Собко А.А., Осинцев А.В. Методика проектирования ГТЕМ-камеры .....	184
Климаков В.В., Мишин В.Ю., Давыдов Г.В. Система регистрации для стенда тепловых испытаний инерциальных датчиков.....	187
Борисов М.В., Мишин В.Ю., Серебряков А.Е., Чиркин М.В. Применение метода вариации Аллана для анализа выходного сигнала лазерного гироскопа .....	190
Веснов И.Г. Критерий подобия для состава активной среды отпаянных волноводных СО2 лазеров с ВЧ возбуждением с разрядным каналом, полностью ограниченным диэлектрическими стенками.....	195
Веснов И.Г. Способы снижения степени диссоциации двуокиси углерода и содержания атомарного кислорода в активной среде щелевых СО2 лазеров с поперечным ВЧ возбуждением.....	198
Веснов И.Г. Основные физико-химические процессы в кинетике диссоциации и регенерации двуокиси углерода в активной среде отпаянных волноводных СО2 лазеров с ВЧ возбуждением .....	202
Веснов И.Г. Релаксация степени диссоциации двуокиси углерода после отключения накачки в отпаянных волноводных СО2 лазерах с ВЧ возбуждением.....	205
<b>СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ, МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА».....</b>	<b>208</b>
Толкач Н.М., Вишняков Н.В. Применение атомно-силовой микроскопии для исследования биообъектов.....	208
Семенов А.Р., Холомина Т.А. Прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по параметрам вольт-шумовых характеристик.....	212
Баскакова А.В., Грачев М.В., Бауков А.А., Дюбуа А.Б., Левцова Т.И., Машнина С.Н., Сафошкин А.С., Щигорев Е.Ю., Кучерявый С.И. Исследование температурных зависимостей времени электрон-электронного взаимодействия в гетеропереходе $Al_x Ga_{1-x} / GaAs$ .....	219
Баскакова А.В., Грачев М.В., Бауков А.А., Дюбуа А.Б., Левцова Т.И., Машнина С.Н., Сафошкин А.С., Щигорев Е.Ю., Кучерявый С.И. Расчет зонной структуры гетероперехода $Al_x Ga_{1-x} / GaAs$ .....	221
Май Н.Т., Козлов Б.А. Тепловые процессы в реакторе для электродугового синтеза фуллеренов.....	224
Вишняков Н.В., Маслов А.Д., Мишустин В.Г. Анализ методов расчета напряжения холостого хода в гомопереходных солнечных элементах.....	227
Мальченко С.И., Холомина Т.А., Шилин А.В., Зубков М.В. Применение современных информационных технологий в лабораторных практикумах кафедры Микро-и наноэлектроники РГРТУ .....	230
Мальцев М.В. Исследование деградации транзистора на основе GaN в ходе предварительных высокотемпературных испытаний.....	239
Луныков А.Е., Рыбина Н.В., Рыбин Н.Б. Исследование модельных поверхностей самоорганизующихся наноструктурированных материалов .....	243

Кусакин Д.С., Литвинов В.Г., Ермачихин А.В. Измерительный комплекс для локального исследования электрофизических свойств полупроводниковых наноматериалов и наноструктур .....	248
Козлов Е.И., Богданов Ю.М. Оценка влияния длины затвора на характеристики транзистора с высокой подвижностью электронов в ключевом режиме .....	252
Кадеев А.Д. Разработка в среде NI LABVIEW виртуального прибора для анализа параметров полупроводниковых СВЧ-пластин.....	256
Вишняков Н.В., Гудзев В.В., Литвинов В.Г., Мишустин В.Г. Исследование глубоких уровней в барьерных структурах на основе аморфного гидрогенизированного кремния.....	259
Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Вишняков Н.В., Кусакин Д.С. Измерительно-аналитический комплекс для диагностики полупроводниковых микро- и наноструктур .....	263
СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА».....	268
Саликов А.А. Линейность распределения электрического поля в ионно-оптических системах с планарными дискретными электродами .....	268
Павлов П.И., Круглов С.А., Серезин А.А. Исследование мощности, выделяющейся в цепях переменного тока.....	271
Кислов Д.С., Верещагин Н.М., Круглов С.А., Серезин А.А., Шатилов С.Г. Исследование влияния конструкции сеточного узла тиратрона на его электропрочность .....	275
СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ».....	280
Крысанов В.Н., Шарапов Ю.В., Рудков А.Л. Повышение энергоэффективности и энергосбережения промышленных узлов нагрузки.....	280
Демьянов А.А. Спектральный анализ выходного напряжения универсального модуля генерации на основе свободнопоршневого двигателя Стирлинга.....	285
Манцеров Д.Д. Электронно-импульсные зарядные устройства для электромобилей .....	289

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

**Научное издание**

**В 4 томах**

**Том 2**

Редактор О.В. Миловзоров

Подписано в печать 15.05.16. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. 18,5

Тираж

Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет  
Редакционно-издательский центр РГРТУ