

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Информатика, вычислительная техника и управление*

Применение карт Карно для полиномиального преобразования булевых функций	
<b>Ю.С. Акинина, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин.....</b>	<b>4</b>
Многоальтернативная система принятия решения для социотехнических объектов на основе теоретико-игровых методов и мультиагентных технологий в условиях риска	
<b>Д.В. Иванов.....</b>	<b>8</b>
Математическое исследование обтекания летательного аппарата	
<b>Т.Б. Буренко, В.А. Нестеров, А.П. Будник.....</b>	<b>15</b>
Модель оптимального развития структуры мультисервисных сетей на основе аппарата динамического программирования	
<b>Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>21</b>
Система поддержки принятия решений на примере распознавания сканированного рукописного текста	
<b>А.А. Мозговой.....</b>	<b>25</b>
Структура экспертной системы оперативной диагностики и лечения заболеваний легких	
<b>В.А. Васильченко, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>28</b>
О модификации алгоритма SIMPLER для решения задачи моделирования процесса непрерывного литья заготовок из цветных металлов	
<b>Е.Е. Фомина, Н.К. Жиганов.....</b>	<b>32</b>
Алгоритмизация принятия решений в процессе лечения острого пиелонефрита на основе метода анализа иерархий	
<b>А.А. Спирычин, Д.Е. Строева, А.В. Бурковский, А.В. Кузьменко.....</b>	<b>36</b>
Моделирование распределенной информационной системы на основе сети массового обслуживания	
<b>Д.В. Макаров, В.Л. Бурковский.....</b>	<b>40</b>

### *Энергетика*

Функционально-алгоритмическая организация систем регионального энергопотребления	
<b>В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд.....</b>	<b>44</b>
Анализ систем регенерации испарителей криоконцентраторов	
<b>В.Ю. Овсянников, С.М. Яценко, О.А. Семенихин, А.Н. Денежная.....</b>	<b>50</b>

### *Машиностроение и машиноведение*

Разработка универсального пуансона	
<b>М.В. Молод.....</b>	<b>55</b>
Повышение качества штамповой оснастки при изготовлении деталей самолёта	
<b>В.И. Максименков, М.В. Молод, Ю.А. Сидельникова.....</b>	<b>58</b>

### ***Радиотехника и связь***

Метод повышения точности и радиационной стойкости бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП космического назначения	
<b>В.С. Кононов.....</b>	<b>61</b>
Модель масштабируемого LDPC-декодера низкой мощности с использованием алгоритмического синтеза высокого уровня	
<b>А.В. Башкиров, Л.Н. Коротков, М.В. Хорошайлова.....</b>	<b>65</b>
Архитектуры бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП для космического применения	
<b>В.С. Кононов.....</b>	<b>70</b>
Микрополосковая диаграммообразующая схема для сетей телекоммуникаций на основе многолучевых антенных решеток	
<b>А.В. Останков, Н.Н. Щетинин, В.А. Мельник.....</b>	<b>74</b>

### ***Физика***

Изучение кислотного модифицирования алюмогеля с привлечением электрохимических методов исследования	
<b>В.П. Горшунова, В.А. Небольсин.....</b>	<b>78</b>
Молекулярно-динамическое моделирование Ван-дер-ваальсовой системы из нуклеотидной цепочки с наночастицами золота в матрице углеродной нанотрубки	
<b>М.А. Хусенов, Х.Т. Холмуродов.....</b>	<b>81</b>

**ПРИМЕНЕНИЕ КАРТ КАРНО ДЛЯ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ**

**Ю.С. Акинина, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин**

В данной статье предлагается новый подход к полиномиальному преобразованию булевых функций, базирующийся на методе минимизации булевых функций с помощью карт Карно

Ключевые слова: полином Жегалкина, булева функция, карта Карно

**Введение**

В [1-5] рассмотрены особенности полиномиальных логических преобразователей (ПЛП), представляющих собой матричные структуры, в которых используется логический базис Жегалкина  $\{\wedge, \oplus, 1\}$  [6]. Одна из таких структур представлена на рис. 1 и ей соответствует

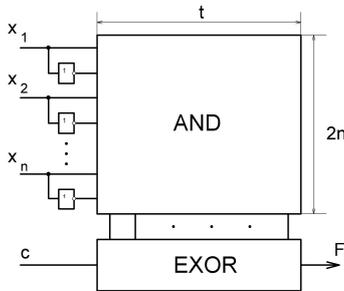


Рис. 1. Структурная модель ПЛП

следующая математическая модель (1):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C \oplus K_1 \oplus K_2 \oplus \dots \oplus K_t, \quad (1)$$

где  $K_i$  - ортогональные элементарные конъюнкции, в каждую из которых переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$  могут входить как с инверсией, так и без инверсии;

$\oplus$  - знак логической операции «исключающее ИЛИ» (exclusive-or – EXOR), которую часто называют «сумма по модулю 2»;

$C = \{0, 1\}$  – признак не инвертирования ( $C=0$ ) или инвертирования ( $C=1$ ) функции  $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

В отечественной литературе форму (1) часто называют «сумма по модулю два элементарных конъюнкций», а в зарубежной – ESOP (exclusive-or sum-of-products).

Акинина Юлия Сергеевна – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, e-mail: julakinn@mail.ru  
Подвальный Семен Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: spodvalny@yandex.ru  
Тюрин Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: svturin@mail.ru

Представленная на рис. 1 матричная структура позволяет реализовать булевы функции, которые аналитически должны представляться в виде полиномов Жегалкина, поляризованных полиномов Рида-Маллера (полиномы с фиксированной полярностью) или полиномов со смешанной полярностью (одинаковые переменные могут входить в полином и со знаком инверсии, и без него). Интерес к полиномиальным формам оправдывается тем, что число элементов в соответствующих им схемных реализациях часто оказывается меньше, чем в двухуровневых AND/OR – схемах, но, главное, структуры AND/EXOR легче диагностируются [7].

Следует отметить, что для некоторых булевых функций (БФ) полином со смешанной полярностью может содержать меньшее количество термов, по сравнению с полиномом Жегалкина и полиномами Рида-Маллера.

**Метод полиномиального преобразования БФ с помощью карт Карно**

В данной статье предлагается новый подход к полиномиальному преобразованию булевых функций, базирующийся на применении карт Карно, и который в дальнейшем может быть автоматизирован на основе широко известного метода Квайна-МакКласки, но с учетом того, что при построении матрицы покрытий минтермов булевой функции области объединения минтермов не должны пересекаться.

Предлагаемый в статье метод полиномиального преобразования БФ с помощью карт Карно можно проиллюстрировать следующей схемой, представленной на рис. 2:

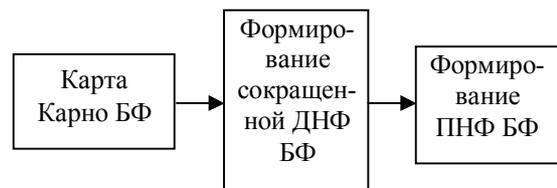


Рис. 2. Схема перехода от карты Карно БФ к ПНФ

Рассмотрим предлагаемый метод на примере. Пусть булева функция  $f(a, b, c, d)$  задана следующей картой Карно, представленной на рис. 3:

ab \ cd	00	01	11	10
00	1	1	1	1
01	0	0	1	1
11	1	1	1	1
10	1	0	0	1

Рис. 3. Карта Карно БФ

Минимизируем функцию  $f(a, b, c, d)$  с помощью карты Карно. Объединение ячеек в карте должно производиться таким образом, чтобы полученные в результате объединения овалы не пересекались, так как ПНФ БФ может быть получена только из ортогонализированной ДНФ БФ [7]. Минтермы функции  $f(a, b, c, d)$  целесообразно объединить в пять непересекающихся групп, так, как показано на рис. 4.

ab \ cd	00	01	11	10
00	1	1	1	1
01	0	0	1	1
11	1	1	1	1
10	1	0	0	1

Рис. 4. Минимизация БФ с помощью карты Карно

В результате такой минимизации будет получена тупиковая ДНФ, которая содержит безыбыточные простые импликанты и имеет следующий вид:

$$f^{DНФ} = \overline{a}c\overline{d} \vee a\overline{c}\overline{d} \vee \overline{b}c \vee bcd \quad (2)$$

Так как ортогонализированная ДНФ представляет собой логическую сумму полной группы несовместных событий, каждое из которых представляется соответствующей импликантой, то для любой пары импликант из (2) всегда справедливо [8] следующее тождество:

$$I_i \vee I_j = I_i \oplus I_j, \quad (3)$$

С учётом (3) представляется возможным в (2) каждый символ « $\vee$ » заменить на « $\oplus$ ». В результате будет получена ПФ со смешанной полярностью:

$$P(a, b, c, d) = \overline{a}c\overline{d} \oplus a\overline{c}\overline{d} \oplus \overline{b}c \oplus bcd \quad (4)$$

Полином Жегалкина для БФ  $f(a, b, c, d)$  может быть получен следующим образом. В выражение (4) логические переменные входят как с отрицаниями, так и без них. Известно, что

$$\overline{x_i} = x_i \oplus 1. \quad (5)$$

Тогда, если заменить все отрицания переменных в (4) на  $(1 \oplus x_i)$ , перемножить выражения по правилу (6)

$$(1 \oplus x_i)(1 \oplus x_j) = 1 \oplus x_i \oplus x_j \oplus x_i x_j \quad (6)$$

и сократить попарно равные конъюнкции (в силу  $x_i \oplus x_i = 0$  и  $x_j \oplus 0 = x_j$ ), то приходим к полиному Жегалкина:

$$\begin{aligned} f(a, b, c, d) &= (1 \oplus a)(1 \oplus c)(1 \oplus d) \oplus a(1 \oplus c) \oplus \\ &(1 \oplus b)c \oplus bcd = 1 \oplus a \oplus c \oplus ac \oplus d \oplus \\ &\oplus ad \oplus dc \oplus acd \oplus a \oplus ac \oplus c \oplus \\ &\oplus bc \oplus bcd \end{aligned} \quad (7)$$

После приведения подобных членов получаем искомую функцию в виде полинома Жегалкина:

$$P(a, b, c, d) = 1 \oplus d \oplus ad \oplus dc \oplus bc \oplus acd \oplus bcd \quad (8)$$

Следует отметить, что для булевых функций с числом переменных  $n > 6$  карты Карно становятся громоздкими и неудобными для практического применения. Однако предложенный в статье метод может быть алгоритмизирован и впоследствии программно реализован.

### Верификация метода полиномиального преобразования БФ с помощью карт Карно

Верификацию предложенного метода можно осуществить с помощью известного метода полиномиального преобразования БФ – метода треугольника Паскаля [8, 9].

Представим исходную функцию  $f(a, b, c, d)$ , карта Карно которой изображена на рис. 3, в общем виде полинома Жегалкина (9).

$$\begin{aligned} G(x_1, \dots, x_n) &= \sum_{i_1, \dots, i_n} \oplus a_{i_1, \dots, i_n} x_{i_1} \dots x_{i_n} = \\ &= a_0 \oplus \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \oplus \sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \oplus \dots \oplus a_{1, \dots, n} \cdot x_1 \cdot \dots \cdot x_n, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $a_{i_1, \dots, i_n} \in \{0, 1\}$ .

Получим:

$$\begin{aligned} f^{ПНФ}(a, b, c, d) &= \alpha_0 \oplus \alpha_1 a \oplus \alpha_2 b \oplus \alpha_3 ab \oplus \alpha_4 c \oplus \\ &\oplus \alpha_5 ac \oplus \alpha_6 bc \oplus \alpha_7 abc \oplus \alpha_8 d \oplus \alpha_9 ad \oplus \alpha_{10} bd \oplus \\ &\oplus \alpha_{11} abd \oplus \alpha_{12} cd \oplus \alpha_{13} acd \oplus \alpha_{14} bcd \oplus \alpha_{15} abcd \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) следует, что для получения ПНФ булевой функции  $f(a, b, c, d)$  необходимо определить значения  $\alpha_i, i = 0, 15$ .

Для этого построим треугольник Паскаля. Верхняя сторона треугольника будет содержать значения функции  $f(a, b, c, d)$  на соответствующих и упорядоченных наборах. Первая единица верхней строки треугольника соответствует значению функции на нулевом наборе аргументов. Вторая – на первом наборе аргументов функции и т.д. Любой другой элемент треугольника вычисляется как “сумма по модулю два” двух соседних элементов предыдущей строки. Построим треугольник Паскаля для нахождения коэффициентов функции  $f$  (табл. 1).

Таблица 1  
Треугольник Паскаля

Индекс $i$ коэффициентов $\alpha_i$ в ПНФ	Входные наборы БФ	Первая строка содержит упорядоченный вектор значений БФ $f(a, b, c, d)$ на соответствующих наборах
0	0000	1111110001011111
1	0001	000001001110000
2	0010	00001101001000
3	0011	0001011101100
4	0100	001110011010
5	0101	01001010111
6	0110	1101111100
7	0111	011000010
8	1000	10100011
9	1001	1110010
10	1010	001011
11	1011	01110
12	1100	1001
13	1101	101
14	1110	11
15	1111	0

Левая боковая сторона треугольника Паскаля представляет собой вектор  $A = \{\alpha_0, \dots, \alpha_{15}\}$ , содержащий коэффициенты полинома Жегалкина, т.е.:

$$\alpha_0=1; \alpha_1=0; \alpha_2=0; \alpha_3=0; \alpha_4=0; \alpha_5=0;$$

$$\alpha_6=1; \alpha_7=0; \alpha_8=1; \alpha_9=1; \alpha_{10}=0; \alpha_{11}=0;$$

$$\alpha_{12}=1; \alpha_{13}=1; \alpha_{14}=1; \alpha_{15}=0$$

Подставляя найденные коэффициенты в (10), получаем полином Жегалкина функции  $f(a, b, c, d)$ :

$$P(a, b, c, d) = 1 \oplus bc \oplus d \oplus ad \oplus dc \oplus acd \oplus bcd \quad (11)$$

### Результаты и их обсуждение

Как видно, результат (11) полностью совпадает с (8), что доказывает корректность предложенного

метода полиномиального преобразования БФ с помощью карт Карно и получения полиномиальной формы со смешанной полярностью.

Интересно было бы выяснить, какой из полиномов функции  $f(a, b, c, d)$  будет содержать минимальное число конъюнкций – полином со смешанной полярностью или минимальный полином Риды-Маллера. Определим минимальный полином Риды-Маллера для функции  $f(a, b, c, d)$ . Для этого воспользуемся также методом треугольника Паскаля, используя алгоритм переупорядочения исходного вектора значений БФ, представленный в [10, 11]. Все возможные поляризованные полиномы Риды-Маллера для функции  $f(a, b, c, d)$  представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Полиномы Риды-Маллера

Вектор поляризации (a b c d)	Полиномы Риды-Маллера для функции $f(a, b, c, d)$
0 0 0 0	$P_{0000}(a, b, c, d) = 1 \oplus bc \oplus d \oplus ad \oplus dc \oplus acd \oplus bcd$
0 0 0 1	$P_{0001}(a, b, c, d) = a \oplus c \oplus ac \oplus \bar{d} \oplus \bar{a}\bar{d} \oplus \bar{c}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 0 1 0	$P_{0010}(a, b, c, d) = 1 \oplus b \oplus \bar{b}\bar{c} \oplus \bar{b}\bar{d} \oplus \bar{c}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 0 1 1	$P_{0011}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{c} \oplus \bar{a}\bar{c} \oplus \bar{b}\bar{d} \oplus \bar{c}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 1 0 0	$P_{0100}(a, b, c, d) = 1 \oplus c \oplus \bar{b}\bar{c} \oplus d \oplus ad \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 1 0 1	$P_{0101}(a, b, c, d) = a \oplus c \oplus \bar{a}\bar{c} \oplus \bar{d} \oplus \bar{a}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 1 1 0	$P_{0110}(a, b, c, d) = \bar{b} \oplus \bar{c} \oplus \bar{b}\bar{c} \oplus d \oplus \bar{b}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{b}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
0 1 1 1	$P_{0111}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{c} \oplus \bar{a}\bar{c} \oplus d \oplus \bar{b}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
1 0 0 0	$P_{1000}(a, b, c, d) = 1 \oplus bc \oplus \bar{a}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus bcd$
1 0 0 1	$P_{1001}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{a} \oplus \bar{a}\bar{b} \oplus \bar{a}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
1 0 1 0	$P_{1010}(a, b, c, d) = 1 \oplus b \oplus \bar{b}\bar{c} \oplus \bar{b}\bar{d} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$
1 0 1 1	$P_{1011}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{a}\bar{c} \oplus \bar{b}\bar{c} \oplus \bar{a}\bar{c}\bar{d} \oplus \bar{b}\bar{c}\bar{d}$

1 1 0 0	$P_{1100}(a, b, c, d) = 1 \oplus c \oplus \bar{b}c \oplus \bar{a}d \oplus cd \oplus \bar{a}cd \oplus \bar{b}cd$
1 1 0 1	$P_{1101}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{a} \oplus \bar{a}c \oplus \bar{a}d \oplus cd \oplus \bar{a}cd \oplus \bar{b}cd$
1 1 1 0	$P_{1110}(a, b, c, d) = \bar{b} \oplus c \oplus \bar{b}c \oplus d \oplus \bar{b}d \oplus cd \oplus \bar{a}cd \oplus \bar{b}cd$
1 1 1 1	$P_{1111}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{a}c \oplus \bar{d} \oplus \bar{b}d \oplus \bar{c}d \oplus \bar{a}cd \oplus \bar{b}cd$

Как видно из табл. 2 наименьшее количество термов содержат полиномы:

$$P_{1000}(a, b, c, d) = 1 \oplus bc \oplus \bar{a}d \oplus \bar{a}cd \oplus bcd,$$

$$P_{1011}(a, b, c, d) = 1 \oplus \bar{a}c \oplus \bar{b}c \oplus \bar{a}cd \oplus \bar{b}cd. \quad (12)$$

Анализ полиномиальных форм (4), (8), (12) показывает, что минимальной среди них является полиномиальная форма именно со смешанной полярностью.

#### Заключение

Таким образом, предложенный в статье метод, базирующийся на применении карт Карно и выделении в них простых импликант (безызбыточных и неперекрывающихся), позволяет получать полиномиальные формы булевых функций со смешанной полярностью переменных. Данные формы для некоторых булевых функций являются минимальными по сравнению с другими полиномиальными формами.

В дальнейшем метод формирования полиномиальных форм со смешанной полярностью может быть автоматизирован на основе широко известного метода Квайна-МакКласки, но с учетом того, что при построении матрицы покрытий минтермов булевой функции области объединения минтермов не должны иметь пересечений.

#### Литература

1. Акинин, А. А. Метод бинарно-векторного полиномиального разложения булевых функций [Текст] / А. А. Акинин., Ю. С. Акинина, С. В. Тюрин // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2012. – №1. – С. 55-60.
2. Акинин, А. А. Сравнительная оценка вычислительных алгоритмов полиномиального преобразования булевых функций [Текст] / А. А. Акинин, С. Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного университета. – 2013. – Т. 9, – №1. – С. 31-35.
3. Hirayama T., Nagasawa K., Nishitani Y., Shimizu K. Double Fixed-Polarity Reed-Muller Expressions: A New Class of AND-EXOR Expressions for Compact and Testable Realization // IPSJ Journal, Apr. 2001, Vol. 42, № 4. – P. 983-991.
4. Тюрин, С.В. Способ тестопригодного проектирования логических преобразователей [Текст] / С.В. Тюрин, С.Л. Подвальный, Ю.С. Акинина // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2010. – №1. – С. 36-41.
5. Акинина, Ю.С. Способ тестопригодной реализации логических преобразователей [Текст] / Ю.С. Акинина, С.Л. Подвальный, С.В. Тюрин // патент на изобретение RUS 2413282 от 22.12.2008.
6. Жегалкин, И.И. Арифметизация символической логики [Текст] / И.И. Жегалкин Математический сборник Московского математического общества, 1927. – Т. 354. – С. 9-28.
7. Закревский, А.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств [Текст] / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 592с.
8. Алехина, М.А. Об одном методе построения полинома Жегалкина [Текст] / М.А. Алехина, П.Г. Пичугина // Дискретная математика для инженера. - 2006. – N 2. – С. 49-51.
9. Бохманн, Д. Двоичные динамические системы [Текст] / Д. Бохманн, Х. Постхоф. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
10. Романкевич, А.М. Построение легкотестируемых цифровых устройств с использованием форм Рида-Маллера [Текст] / А.М. Романкевич, В.В. Гроль, О.А. Мирошникова // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 7 (26). – С. 153– 157.
11. Akinin, A.A. Polynomial transformation of Boolean functions : analysis of computational algorithms / A.A. Akinin, A.V. Achkasov, S.L. Podval'nyi, S.V. Tyurin // Automation and Remote Control. – 2014. – Т. 75, – № 7. – С. 1301-1308.

Воронежский государственный технический университет

### THE APPLICATION OF KARNAUGH MAPS FOR THE POLINOMIAL TRANSFORMATION OF BOOLEAN FUNCTIONS

Ju.S. Akinina, S.L. Podvalniy, S.V. Tyurin

This article offers a new way of polinomial transformation of boolean functions based on the method of minimization of boolean functions by means of Karnaugh map

Key words: Zhegal'kin's polynomial, boolean function, Karnaugh map

## МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЦИОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВЫХ МЕТОДОВ И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ РИСКА

Д.В. Иванов

В статье рассматривается многоальтернативная система поддержки принятия решения, основанная на теоретико-игровом и мультиагентном подходах. В частности, рассмотрены принципы, методы и условия различных подходов формализации принятия решения, предложена теоретико-игровая модель на базе сценарного подхода, основанная на когнитивных данных, а также предложена имитационная событийная агентная модель в рамках мультиагентного подхода

Ключевые слова: принятие решения, социотехнический объект, теория игр, база знаний, мультиагентные технологии

В настоящее время со стороны исследователей проявляется всё больший интерес к созданию сложных гибридных систем функционирования технических объектов различной природы. Гибридные системы помогают эффективнее описать параметры и адекватность системы за счет подбора различного, подходящего в заданной предметной области математического аппарата. Одним из наиболее успешных классов решения подобной задачи является создание многоальтернативной системы принятия решений, основанной на различных математических технологиях для единой предметной области [1].

Среди научно-технических работ предложен широкий спектр математического обеспечения систем поддержки принятия решений (СППР). Необходимо исследовать различные подходы, которые наиболее часто применяются для работы СППР, а также принципы функционирования, общие закономерности и границы применимости. В частности, особый интерес представляют социотехнические объекты и инструменты управления этими объектами.

Одним из первых и самым простым подходом, который используется в СППР является ранжирование альтернатив в соответствии с количественной характеристикой. Здесь необходимо задать цель принятия решения аналитическим образом, определить количественные параметры системы и упорядочить результат. Данный подход является простым, как правило, всегда вычислительно эффективным, однако точность его может быть недопустимой, так как имеющаяся оценка параметров может быть грубой и зачастую отсутствует вся

необходима информация для построения аналитической модели объекта.

Следующий кластер математического обеспечения, который используется в СППР относится к экспертному подходу. Здесь помимо количественных характеристик добавляются критерии качества, описать которые можно, начиная от простейших способов опроса экспертов до динамических экспертных систем. В случае опроса экспертов выбирается метод опроса, учитываются субъективные оценки экспертов и обрабатываются данные. При обработке данных часто используют нормализацию качественных показателей с преобразованием их в количественную форму. Данный метод существенно повышает адекватность модели принятия решений в целом. Однако в этом случае требуется разработка алгоритмов обработки экспертных данных. К развитию экспертного подхода можно отнести принятие решений на основе нечеткой логики.

Следующим кластером математического обеспечения в системах поддержки принятия решений является моделирование различной природы: имитационное, нейросетевое и пр. Здесь точность результатов и доверие к ним значительно выше, однако требуются серьезные вычислительные мощности. После получения адекватной модели необходимо переходить к оптимизации задачи.

Следующим классом математического обеспечения является агентный подход, основанный на внедрении интеллектуальных агентов моделирующих окружающую среду. Агент представляет собой конкретную реализацию какого-либо типового класса элемента системы, в которой принимается решение. Соответственно, при формализации агента происходит описание класса какого-либо элемента системы, а при реализации моделирования генери-

руются конкретные агенты. Данный подход наиболее полно формализует предметную область, минимизирует погрешность, однако является одним из самых трудоемких. Развитие мультиагентного подхода в сочетании с другими подходами является перспективным направлением современных исследований.

В отдельный кластер следует выделить теоретико-игровой подход в принятии решений, который используется при наличии конфликтной среды. К достоинствам данного подхода следует отнести повышение адекватности модели, а также возможность принятия решений в условиях риска. Однако главной критикой классического теоретико-игрового подхода является формирование повышенных запасов в условиях риска. Развитие теоретико-игровых подходов в сочетаниях с другими математическими аппаратами приводит к принятию решений, уменьшающих формирование запасов, а также повышается точность результатов модели.

Рассмотренные подходы имеют применение в различных областях техники, в том числе в социотехнических системах. Социотехнический объект – это технический объект, элементы которого являются активными и способны самостоятельно принимать решения на основе собственных целей и в зависимости от параметров состояний внешней и внутренней сред. В силу самостоятельного принятия решения элементами системы возможны конфликтные ситуации между ними. Примеры социотехнических систем можно встретить в сфере медицины, ликвидации ЧС, экономики и др.

К математическому обеспечению системы поддержки принятия решений в системах подобного класса применяются специфические требования, что выражается в реализации следующих принципов:

- сбор и интеллектуальная обработка информации;
- хранение начальной информации и результатов ее обработки;
- построение структуры СППР, отражающей специфику принятия решений;
- отражение внешней и внутренней сред;
- разработка математических методов и алгоритмов, учитывающих специфику социотехнических объектов.

При принятии решения в социотехнических системах принципиальным остается факт информации: о внешней и внутренней средах и о самом объекте.

Принятие решения в подобных системах выходит за рамки рассмотрения одного лишь объекта. Для эффективного принятия решения требуется учет интересов других активных элементов системы, в том числе природы, которая выражается в виде внешней среды. На практике зачастую отсутствует вся необходимая информация. Отсюда возникает необходимость применения различных методов или их комбинации для удовлетворения потребностей математическому обеспечению СППР в необходимой информации. Качественное изменение объема информации может приводить к необходимости пересмотра всей структуры принятия решений.

Следующим принципиальным фактором являются условия, в которых функционирует объект. Выход каких-либо параметров системы из диапазона, принятого в рамках заданной структуры системы принятия решения, приводит к необходимости пересмотра структуры, в том числе и пересмотра математического обеспечения.

Из этих принципиальных факторов следует необходимость построения СППР, учитывающая необходимость изменения структуры принятия решений в силу принципиального изменения условий функционирования объектов. Данное обстоятельство особенно важно, когда параметры объекта могут варьироваться в диапазоне, который не полностью удовлетворяет применяемому математическому обеспечению. Отсюда возникает необходимость построения многоальтернативных систем принятия решений, где структура принятия решений является условно-постоянной, но в зависимости от условий функционирования объекта будут применяться различные математические модели и алгоритмы.

Построение многоальтернативных систем поддержки принятия решения должно основываться на следующих основных принципах:

- модульность - для упорядочения структуры систем принятия решений;
- открытость - для расширения возможностей системы при появлении новой информации;
- единое информационное пространство - для обмена информацией между элементами системы по единым протоколам данных.

В структуре СППР (рис. 1) необходимо выделить такие характерные для всех систем принятия решения элементы как внешние данные, блок обработки внешних данных, блок формирования целей и определения критериев,

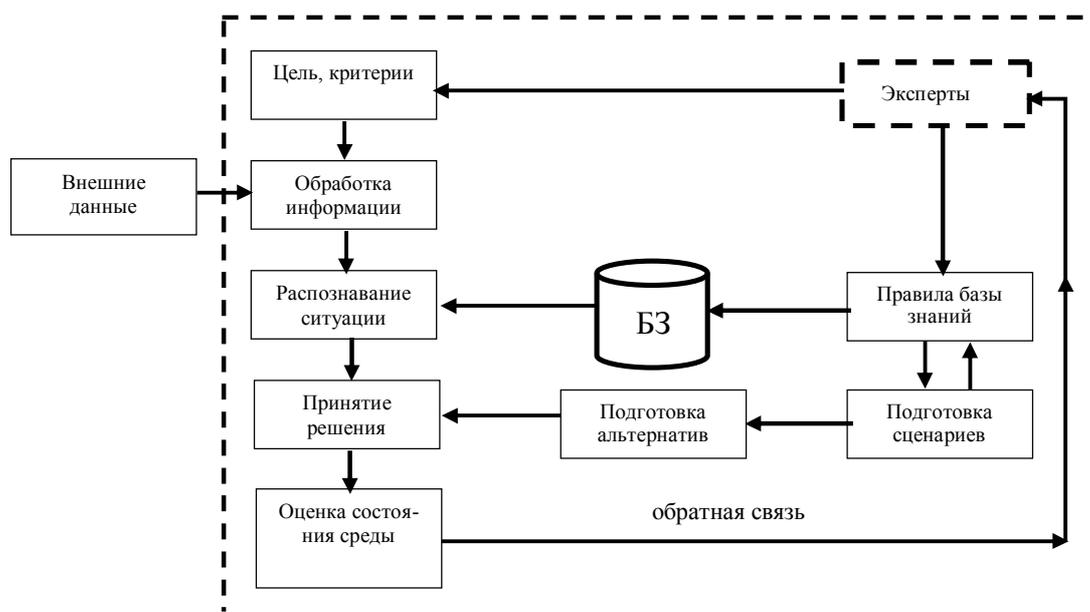


Рис. 1. Схема принятия решения

блок принятия решения, а также следует отметить такие характерные элементы для многоальтернативных систем как базу знаний, правила базы знаний, экспертов, блок формирования сценариев, блок формирования альтернатив и блок распознавания ситуации [5, 6].

В рамках принятия решения могут применяться различные математические методы, отвечающие заданным условиям функционирования объектов. Актуальными для социотехнических систем являются подходы, основанные на интеллектуализации нейросетевых технологий, экспертных систем различного уровня, теоретико-игрового подхода, имитационного моделирования, а также мультиагентных технологии. В рамках данной работы рассмотрим два основных характерных модуля для социотехнических систем: теоретико-игровой подход и подход основанный на мультиагентных технологиях.

Теоретико-игровой подход применяется в системах конфликтной природы, где на стратегии активного элемента системы - в данном случае игрока - оказывается воздействие других игроков. Для решения данной задачи необходимо получить равновесие в системе по Нэшу или по Парето.

В общем виде необходимо построение целевых функций всех игроков, параметры которых должны отражать воздействие других игроков, затем декларировать все ограничения в системе и проводить оптимизацию данной модели. С увеличением количества игроков, увеличивается и порядок требуемых вычислительных возможностей системы [3].

Принятие решения рассматривается с точки зрения одного из игроков, как правило, центра, который выступает регулятором системы и принимающим решения, например, по распределению ресурсов в системе. Следовательно, результат действий других игроков может быть аккумулирован и оформлен в виде обобщенных стратегий единого игрока, а именно: природы. Однако данное обобщение является существенным и грубым в случае преобразования аккумулированного эффекта нескольких игроков. Для повышения адекватности модели необходимо определение сценарных стратегий природы, а воздействие игроков необходимо оформить в виде правил база знаний.

При принятии решения в условиях риска в теоретико-игровом подходе, как правило, рассматриваются три ситуации: базовая, базовая оптимистическая и базовая негативная. В отдельных случаях может быть рассмотрена четвертая стратегия: крайне негативная (стрессовая). При рассмотрении каждой из ситуации задаются параметры, определяющие стратегию природы.

Элементом платежной матрицы является функция выигрыша рассматриваемого игрока. Параметры стратегий первого игрока обозначим как вектор  $X$ . Параметры состояния внешней среды обозначим как  $Y$ .

Тогда имеем игру  $\Gamma(A, P, v)$ , которая описывается платежной матрицей ( $A$ ), вероятностью применения игроками своих стратегий ( $P$ ) и выигрышем ( $v$ ). Платежная матрица имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} f(X_1, Y_1) & \dots & f(X_1, Y_j) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(X_i, Y_1) & \dots & f(X_i, Y_j) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Целевая функция в общем виде примет вид:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} p_i^X p_j^Y \rightarrow \max. \quad (2)$$

Сложность вычислений заключается в неопределенности отклонений оценки стратегий при определенных условиях внешней среды. В этом случае необходимо создать базу знаний на основе продукционной модели, с помощью которой будет определяться каждый элемент матрицы выигрышей в зависимости от параметров векторов  $X$  и  $Y$ .

Каждое правило есть продукционно-вычислительное отношение. Продукция имеет следующий вид [2]:

$$\text{ЕСЛИ } \textit{antec}_j \text{ ТО } \textit{conseq}_j, \quad (3)$$

где  $\textit{antec}_j$  – посылка  $j$ -й продукции,  $\textit{conseq}_j$  – следствие продукции.

Посылка и следствие правила имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \textit{antec}_j &= g_{j1} \text{ и } g_{j2} \text{ и } \dots \text{ и } g_{jq}, \\ \textit{conseq}_j &= h_{j1} \text{ и } h_{j2} \text{ и } \dots \text{ и } h_{jt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $g_{jq}$  –  $q$ -я элементарная посылка  $j$ -й продукции;

$h_{jt}$  –  $t$ -я элементарное следствие  $j$ -й продукции.

Таким образом, каждый параметр векторов  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  и  $Y(y_1, y_2, \dots, y_m)$  должен иметь лингвистическую функцию  $L_i(T_1, T_2, \dots, T_l)$ , где  $T_l$  – терм-множество лингвистической переменной, представленное в виде треугольной формы нечеткого множества [8].

Тогда векторы стратегий игроков примут вид:

$$\begin{aligned} X(L_1^X, L_2^X, \dots, L_n^X), \\ Y(L_1^Y, L_2^Y, \dots, L_m^Y), \end{aligned} \quad (5)$$

а результирующий вектор  $Z$ , получаемый в результате логического вида примет вид:

$$Z(L_1^Z, L_2^Z, \dots, L_k^Z). \quad (6)$$

Таким образом, количество лингвистических переменных определяется числом  $(n+m+k)$ , а число терм-множеств каждой переменной определяется в каждом случае отдельно, но, как правило, не менее трех. Соответственно, в силу больших размерностей требуется универсальный способ хранения информации в базе знаний. За основу способа хранения информации будет принят язык разметки XML.

Существуют различные способы изменения треугольного нечеткого множества: изменяя ширину интервала (основания) и изменяя площадь под нечетким множеством. Следует отметить, что площадь является мерой неопределенности; более подробно это описывается в [7]. Таким образом, если представить рассматриваемые величины в виде нечетких множеств треугольной формы с возможностью изменения вида множества, то у эксперта появляется возможность в полной мере выразить свои предпочтения.

Этот факт необходимо предусмотреть при работе с правилами базы знаний. Для удобного хранения в структуре записи XML необходимо разделить модель множества треугольной формы на ключевые параметры.

Например, если терм-множество, обозначающий множество «средний» какой-либо лингвистической переменной имеет следующую форму:

$$y = \begin{cases} x, & \text{если } x > 0; \\ 3, & \text{если } 1 \geq x \geq 2; \\ -x, & \text{если } x > 2; \end{cases} \quad (7)$$

тогда запись в формате XML примет следующий вид:

<T Name="средний" p1="x" p2="3" p3="-x">.

Тогда обобщенный вид записи лингвистической переменной в базе знаний примет вид:

```
<xsd:fl name="FLName">
  <xsd:term>
    <xsd:term name="name" />
```

```

<xsd:term Ttype="type"/>
<xsd:term P1="value"/>
<xsd:term P2="value"/>
<xsd:term P3="value"/>
</xsd:term>
</xsd:fl>

```

Правило базы данных должно содержать информацию посылки и следствия продукций в соответствии с (3) и (4), тогда запись в хранилище примет следующий вид:

```

<xsd:rule name="RuleName">
  <xsd:group name="GroupName" logical="logical_type">
    <xsd:fl name="FLName">
      <xsd:term>
        <xsd:term name="name"/>
        <xsd:term Ttype="type"/>
        <xsd:term P1="value"/>
        <xsd:term P2="value"/>
        <xsd:term P3="value"/>
      </xsd:term>
    </xsd:fl>
  </xsd:group>
</xsd:rule>

```

Следует отметить, что тип Group должен повторяться два раза: первый раз в качестве посылки, второй раз в качестве следствия продукций, что регламентируется с помощью параметра logical.

Теоретико-игровой подход имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что оценка стратегий происходит на конец рассматриваемого периода для принятия решения. Поэтому не учитывается динамика реализации стратегии игроков, которая при негативном сценарии способна нарушить устойчивость системы, где принимается решение. Выход системы из устойчивого состояния может привести к изменениям игроками своих стратегий, которые изначально не заложены в теоретико-игровой модели. В этом случае требуется принципиально другой подход к принятию решений. Один из таких подходов основан на мультиагентных технологиях.

Агент представляет собой активный элемент системы, способный к самостоятельному принятию решения на основе анализа состояния среды и собственных стратегий поведения. Агент состоит из двух основных блоков (рис. 2): блок параметров, хранящий значения состояние агента, и блок поведения, отвечающий за принятие решения [4]. Блок поведения разделен на модуль когнитивных ме-

тодов, призванных для работы с базой данных, и модуль расчетных методов, отвечающих за реализацию заданных функций агента.

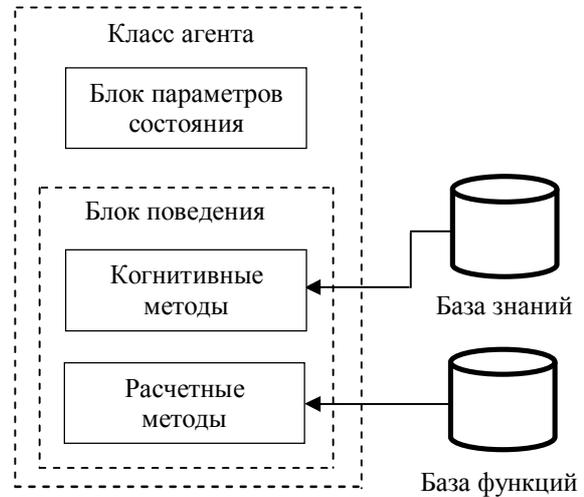


Рис. 2. Обобщенный класс агента

В общем виде агенты могут взаимодействовать между собой и с центром (рис. 3).

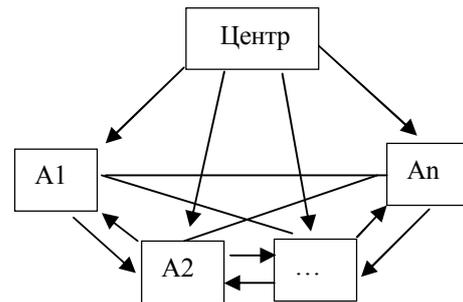


Рис. 3. Взаимодействие агентов

В силу сложности вычислений взаимодействия каждого агента с каждым и как это взаимодействие отражается на состоянии других элементов системы будем рассматривать опосредованное воздействие элементов на систему через среду системы (рис. 4).

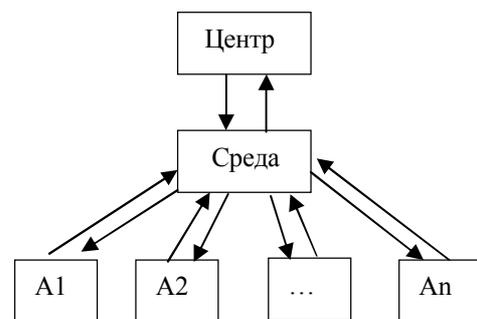


Рис. 4. Опосредованное взаимодействие агентов

Для моделирования агентного взаимодействия необходимо разработать имитационную модель (ИМ), особенностью которой будет являться событийный подход. Событие – это действие элемента (-ов) системы, приводящее к изменению параметров элементов системы, в которой принимаются решения. Реализация события означает возможность изменения значений параметров элементов системы, в том числе, определяющие поведение агента, а также исполнение функций (скриптов), определяющие поведение элемента системы.

В условиях риска следует добавить события, определяющие риск для агентов системы и сред. Так же под риском может пониматься возможность, например, риск получения сверхприбыли. Таким образом, при рассмотрении стратегии поведения агента в имитационной модели следует совместить события, относящиеся к реализации стратегии, внешней среды, риска, возможности. Получившаяся последовательность событий определяет основу поведения агента. На рис. 5 изображены события агента, определяющие его стратегию поведения ( $E1, E2, E3$ ), события, определяющие риск для агента ( $R1, R2$ ) и события, определяющие возможности ( $O1, O2$ ).

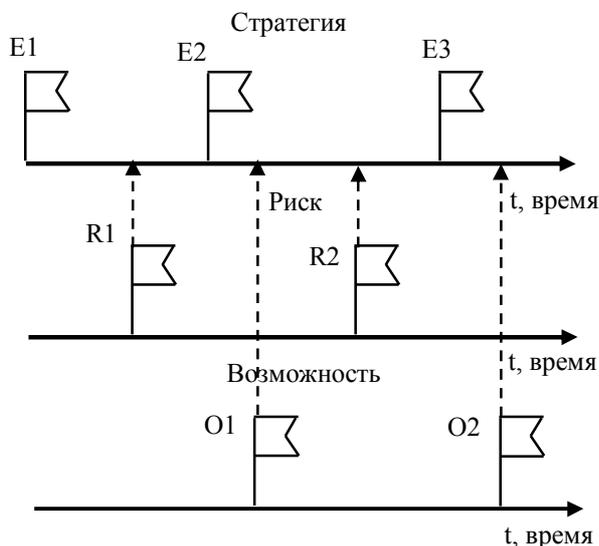


Рис. 5. Стратегия агента, состоящая из последовательности событий

Событие, относящееся к риску, аксиоматически является вероятностным. Определив вероятности реализации событий, можно переходить к следующему этапу моделирования, который заключается в установлении связей между элементами системы. Данный этап включает в себя установление смысловых за-

висимостей и ограничений, когда не все элементы системы могут взаимодействовать между собой. Подобные зависимости определяют структуру принятия решения в каждой ее конкретной реализации.

Приведем алгоритм функционирования имитационной модели (рис. 6).

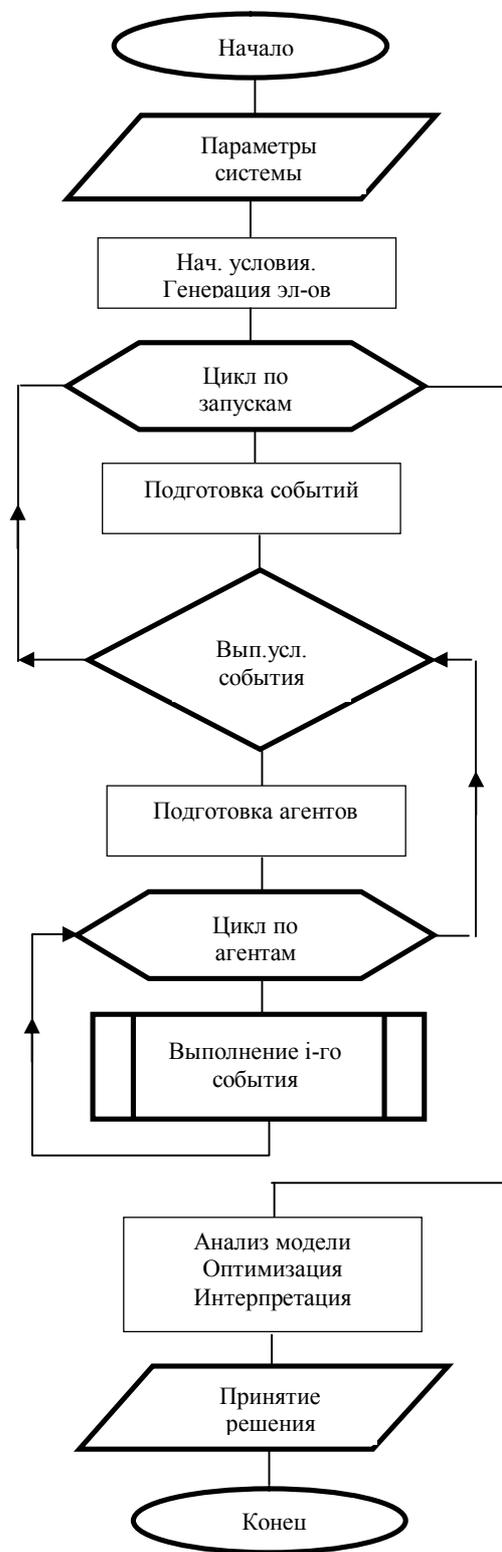


Рис. 6. Алгоритм функционирования ИМ

Суть алгоритма сводится к определению параметров элементов системы, генерации внешней среды и агентов, в том числе, в соответствии с заданной выборкой и в дальнейшем выполнение событий с изменением состояний элементов. При этом цикл по агентам должен выполняться в соответствии с заданной приоритетностью, чтобы не нарушать последовательность применения агентами своих стратегий в соответствии с той информацией, которой они обладают. Этап оптимизации предполагает поиск оптимальных параметров полученной имитационной модели.

Таким образом, предложена многоальтернативная система принятия решения для социотехнических объектов, в которой рассмотрены два основных подхода: теоретико-игровой и мультиагентный. В основу теоретико-игрового подхода заложено использование когнитивных структур, позволяющие получить результат взаимодействия игроков с последующей оптимизацией параметров. Мультиагентный подход повышает адекватность теоретико-игрового подхода, однако требуется создание агентной имитационной модели, ключевой особенностью которой является работа с событиями, происходящими в системе. Приведены структуры взаимодействия и алгоритм функционирования имитационной модели.

Программное обеспечение для автоматизации приведенных процедур должно основываться на принципах модульности, открытости, объектно-ориентированного программирования и ссылочных типов данных. Применение универсального языка разметки XML при формализации команд агентов позволит реализовать принцип единого информационного пространства в системе при проектировании элементов и правил базы знаний, а также описании агентов и событий.

1. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 48. – № 2. – С. 4-13.

2. Иванов, Д.В. Интеллектуализация принятия решений при распределении инвестиционных ресурсов в условиях неопределенности [Текст] / Д.В. Иванов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т.10. – №4. – С. 28-31.

3. Львович, Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения [Текст] / Я.Е. Львович. – Воронеж: Издательство «Кварт», 2006. – 415 с.

4. Павлов, А.И. Архитектура системы поддержки проектирования агентов для имитационных моделей сложных систем / А.И. Павлов, А.В. Столбов // Программные продукты и системы. – Тверь: ЗАО НИИ «Центрпрограммсистем», 2015. – №1. – С.12-16.

5. Леденева, Т.М. Системы искусственного интеллекта и принятия решений [Текст]: учеб. пособие / Т.М. Леденева, С.Л. Подвальный, В.И. Васильев. – Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2005. – 206 с.

6. Иванов, Д.В. Проектирование интеллектуальной подсистемы моделирования мультиагентных систем [Текст] / Д.В. Иванов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы международной научно-практической конференции. – Тамбов: Тамбовский гос. техн. ун-т, 2015. – С. 70-73.

7. Чернов, В.Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе аппарата нечетких множеств [Текст] / В.Г. Чернов. – М.: Горячая книга – Телеком, 2007. – 312 с.

8. Иванов, Д.В. Алгоритмизация процедур принятия решений в рамках инвестиционных процессов в условиях неопределенности [Текст] / Д.В. Иванов // Инновационный Вестник Регион. – 2013. – № 3. – С. 47-51.

Воронежский государственный технический университет

## **MULTIALTERNATIVE SYSTEM OF DECISION MARKING FOR SOCIOTECHNICAL OBJECTS ON BASIS OF THE GAME THEORY AND MULTIAGENTS TECHNOLOGIES IN THE RISK**

**D.V. Ivanov**

The article deals with multi-alternative decision support system based on game-theoretic and multi-agent approaches. In particular, we consider the principles, methods, and conditions are different approaches formalization of the decision, proposed by game-theoretic model based on the scenario approach based on the cognitive data, as well as the proposed event driven simulation agent model in the framework of multi-agent approach

Key words: decision making, socio-technical objects, game theory, knowledge base, multi-agent technology

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Т.Б. Буренко, В.А. Нестеров, А.П. Будник

Описана методика получения аэродинамических характеристик летательного аппарата. Задача осуществляется с помощью систем компьютерной инженерии средствами пакета программ газодинамического анализа и твердотельного моделирования. Описаны основные особенности данного метода по сравнению с традиционными испытаниями в аэродинамических трубах. Проведено сопоставление данных вычислительного эксперимента с проведённым в аэродинамической трубе (АДТ) для проверки результатов на сходимость. Полученные параметры необходимы для моделирования траекторий отбрасываемых объектов в окрестности самолета-носителя (СН)

Ключевые слова: скос потока, твердотельное моделирование, газодинамический анализ, метод конечных объемов, KEAKN

**Введение.** Для разработки новых и модернизации существующих боевых летательных аппаратов (ЛА) одними из немаловажных вопросов являются разработка комплексов авиационного вооружения, средств спасения лётчика и системы защиты самолёта. Для обеспечения применения данных комплексов реализуется ряд технических решений направленных на безопасность отделения всевозможных изделий от СН. Под безопасностью отделения в общем случае понимается выполнение следующих условий при полете в окрестности носителя груза после его выброса из пусковых установок:

- отделение груза от ЛА без его соударения с элементами конструкции СН или с другими подвесными изделиями;
- отсутствие термодинамического воздействия (струи ракетного двигателя твёрдого топлива (РДТТ) или ложной тепловой цели (ЛТЦ)) на силовую установку ЛА, элементы его конструкции и транспортируемые грузы.

Технические решения, направленные на обеспечение безопасного использования отделяемых средств, проверяются с помощью имитационного моделирования сброса/пуска/отстрела данных средств и последующего анализа пространственного движения груза в окрестности СН.

**Описание задачи.** Решается задача обтекания СН дозвуковым потоком при различных углах атаки. Результаты численного моделирования обтекания сравниваются с данными эксперимента в АДТ.

Необходимо определить аэродинамические параметры, влияющие на траектории полёта груза, находящегося в возмущённом потоке вблизи СН.

На поведение груза при отделении от носителя в общем случае влияют следующие параметры:

- углы атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  груза,
- скорость набегающего потока  $M$ ,
- конструктивная конфигурация груза  $W_I$ , наличие оперения.

Зависимость аэродинамических коэффициентов груза можно формально представить в виде уравнений:

$$C^{gp}(C_x^{gp}, C_y^{gp}, C_z^{gp}) = f(\alpha_{gp}, \beta_{gp}, M_{gp}, W_I)$$

$$m^{gp}(m_x^{gp}, m_y^{gp}, m_z^{gp}) = f(\alpha_{gp}, \beta_{gp}, M_{gp}, W_I)$$

Так же на поле течения скоростей в окрестности самолёта оказывают влияние такие факторы как:

- высота и скорость полёта СН в виде числа Маха  $M$ ,
- положение и координаты груза относительно СН  $R_{отн}^{gp}$
- вариант загрузки самолёта авиационными подвесными изделиями (АПИ)  $N_I$ ,
- углы атаки  $\alpha$  и скольжения  $\beta$  СН в момент отделения груза.

Зависимость интерференционных аэродинамических коэффициентов ЛА можно формально представить в виде уравнений:

$$C^{инт}(C_x^{инт}, C_y^{инт}, C_z^{инт}) = f(R_{отн}^{gp}, \alpha_{СН}, \beta_{СН}, M_{СН}, N_I)$$

$$m^{инт}(m_x^{инт}, m_y^{инт}, m_z^{инт}) = f(R_{отн}^{gp}, \alpha_{СН}, \beta_{СН}, M_{СН}, N_I)$$

В связи с вышеперечисленным задача определения влияния интерференционных характеристик на отделяемый груз является многофакторной. Она содержит в себе такие аспекты, как конфигурация груза и положение его и СН по отношению к набегающему потоку с течением времени после отделения.

**Подходы к решению задачи.** Для получения аэродинамических характеристик ЛА существует несколько способов: 1) продувка его модели в аэродинамической трубе, 2) натурные лётные испытания, 3) выполнение «виртуальных» продувок.

В данном случае задачу будем решать методами вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics - CFD), которые всё шире применяются в связи с высокими темпами развития производительности ЭВМ и систем автоматизированного проектирования (САПР).

Буренко Тимофей Борисович – МАИ, аспирант, e-mail: bureni4@mail.ru

Нестеров Виктор Антонович – МАИ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(909) 980-38-21

Будник Александр Павлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(920) 218-40-64

Метод расчёта параметров потока представляет собой численное решение системы уравнений в частных производных, определяющих законы сохранения энергии и уравнения состояния газа. Математическая модель основана на решении уравнений Навье-Стокса, уравнения неразрывности, уравнений диффузионного переноса скалярной величины и модели турбулентности. Для расчётной области строится структурированная неравномерная сетка с разбиением по мере приближения к поверхности модели, и на участках с большими градиентами физических параметров текучей среды, определяемыми во время расчёта.

Моделирование обтекания основано на конечно-объёмном методе (МКО) решения уравнений гидродинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с местным разбиением. Уравнения Навье-Стокса решаются методом расщепления по физическим процессам.

Для получения достаточно точной картины распространения линий тока вокруг исследуемой модели необходима расчётная сетка с ячейками меньше самого малого вихря. Для её обеспечения необходима масса операционного времени на современных ЭВМ. Чтобы избежать его неоправданной траты были разработаны различные модели турбулентности, ускоряющие вычислительный процесс поля течений.

Все существующие модели турбулентности основаны на предположении о том, что динамическая вязкость жидкости/газа может быть представлена в следующем виде:

$$\mu = \mu_l - \mu_t,$$

где  $\mu_l$  – молекулярная вязкость,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость.

В зависимости от количества переменных, входящих в выражение для турбулентной вязкости, модели турбулентности могут быть условно разделены на одно- и двух- параметрические.[2]

Далее будет использована двухпараметрическая  $k - \varepsilon$  модель с низкорейнольдсовой модификацией (k-ε модель Abe-Kondoh-Nagano — KEAKN).

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu,$$

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\varepsilon$  – диссипация этой энергии,  $\rho$  – плотность текучей среды,  $C_\mu=0,09$ . Функция  $f_\mu$  является модификацией стандартной  $k - \varepsilon$  модели (KES), с её помощью моделируется переход ламинарного течения в турбулентное и наоборот. Эта функция определяется следующим образом:

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_T}\right);$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l}; \quad R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon},$$

$y$  – расстояние от поверхности стенки.[1]

Описанные процессы работают автоматически согласно заданным по умолчанию характеристикам установок этих процессов применительно к

каждому дискретному элементарному объёму построенной расчётной сетки для текучей среды. В центральной точке каждой ячейки сохраняется значение величин для контрольного объема. Далее для повышения устойчивости и ускорения сходимости применяется процедура сглаживания получаемого решения в ячейках.

**Вычислительный эксперимент.** Далее будет представлен проведённый расчёт в программе CFD (гидродинамического моделирования) модели СН в среде SolidWorks Flow Simulation.

Чтобы эффективно удвоить число ячеек сетки не меняя нагрузку на ЭВМ можно рассматривать только половину математической модели, так как она является симметричной. Но нам необходимо рассмотреть модель самолёта в двух вариантах построения (со стабилизаторами и без них). Это необходимо для сравнения с результатами испытаний ЦАГИ в аэродинамической трубе Т-103, где стабилизаторы были сняты и на их место установлены измерительные приборы (шестиствольный насадок №6 ЦАГИ). В связи с этим было принято решение для наглядности исследовать оба варианта на одной модели. При её рассмотрении можно будет сразу определить различия в поведении потока при его визуализации. В связи с тем, что стабилизаторы существенно разнесены и, вдобавок, разделены киллями, можно предполагать, что отсутствует влияние их друг на друга в математическом эксперименте.

Скорость набегающего потока в АДТ  $V=40$ м/с. Масштаб продуваемой модели – 1:6,35. Угол атаки  $\alpha=6^\circ$  отсчитывался от строительной горизонтали фюзеляжа. Замеры углов продольного и бокового скосов потока  $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$  за крылом в области расположения горизонтального оперения проводились вдоль оси Y при одних и тех же значениях X и Z, соответствующих углу атаки  $\alpha=0^\circ$ .

На первом этапе моделирования в глобальных настройках расчётной модели (рис. 1) выбираем внешнюю нестационарную задачу (external).

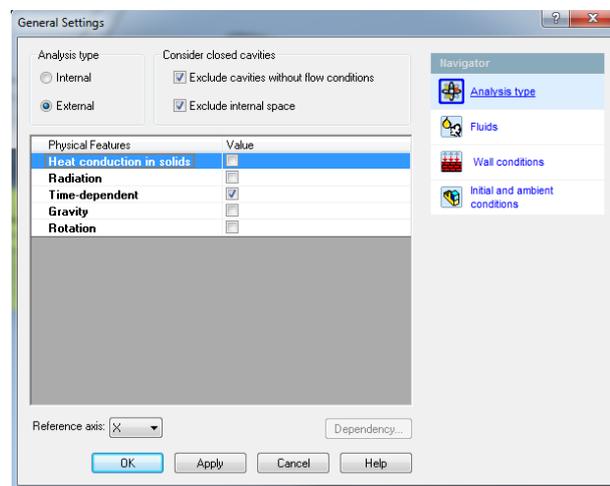


Рис. 1. Тип анализа

Так же включим опции Exclude internal space (исключить внутреннее пространство) и Exclude cavities without flow conditions (исключить полости без граничных условий). С их помощью игнорируются все возможные замкнутые полости внутри математической модели.

Далее в качестве текучей среды назначаем воздух (рис. 2).

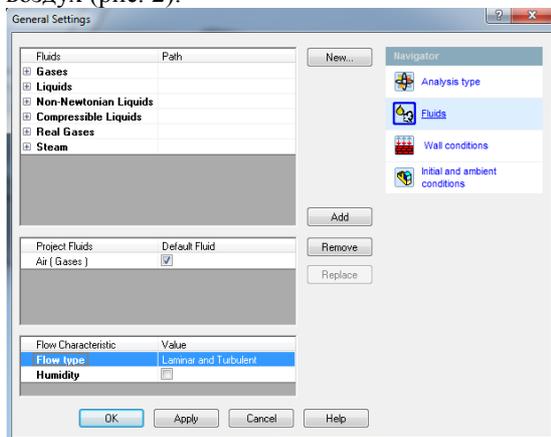


Рис. 2. Текучая среда

Теперь в граничных условиях (рис. 3) вводятся газодинамические значения параметров текучей среды (давление, температура, плотность, влажность), скорость набегающего потока и параметры турбулентности. Рекомендуется перевести скорость в число Маха с учётом давления в среде по ГОСТ 4401-81 [3]. Скорости по осям X и Y вычисляются в зависимости от угла атаки  $\alpha$  следующим образом:

$$v_x = v \cdot \cos(\alpha);$$

$$v_y = v \cdot \sin(\alpha).$$

Для угла атаки  $\alpha=6^\circ$  и скорости потока  $V=40\text{м/с}$  граничные условия будут выглядеть, как показано на рис. 3.

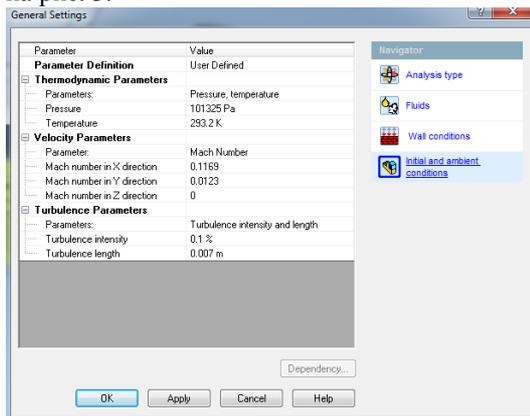


Рис. 3. Граничные условия

После задания глобальных настроек, в связи с тем, что на первом шаге выбрана задача внешнего обтекания, автоматически формируется расчётная область (Computational Domain) (рис. 4). Она ограничивает пространство вокруг модели, в котором производится расчёт. Для экономии времени расчёта область можно уменьшить, но с достаточным удалением стенок от рассчитываемой

модели, т. к. область возмущения может оказаться больше заданных пределов, что мешает получить корректный результат.

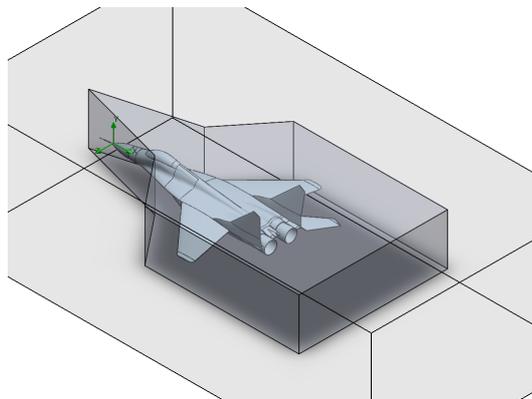


Рис. 4. Расчётная область модели со вспомогательным объёмом

Далее необходимо задать параметры плотности сетки для расчётной области. Здесь их можно задать автоматически, как показано на рис. 5.

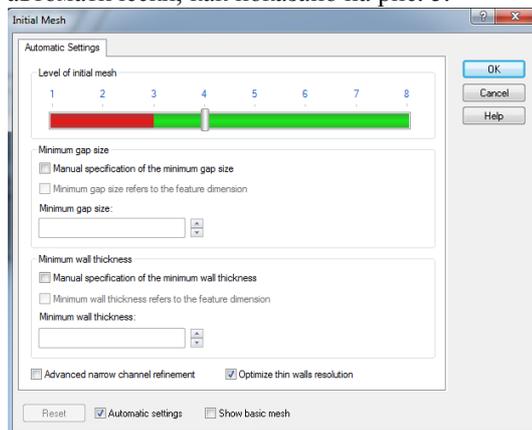


Рис. 5. Начальная сетка

Для получения более плотной сетки в интересующих нас областях необходимо построить дополнительное тело, непосредственно охватывающее продуваемый объект (рис. 4). После его построения применяем клавишу Local Initial Mesh (локальная расчётная сетка), выбираем только построенный объём (рис. 6). Необходимо включить функцию Disable solid components, чтобы это тело считалось текучей средой аналогичной окружающей.

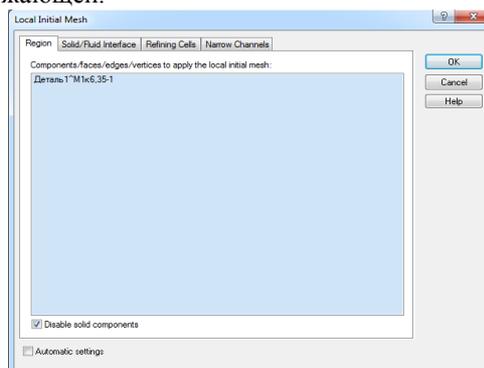


Рис. 6. Назначение локальной сетки

Во вкладке Solid/Fluid Interface для границы между телом и средой необходимо получить качественную аппроксимацию геометрии. Для этого ставим ползунок Curvature refinement level (уровень разрешения сеткой кривизны поверхности) на уровень 2 (рис. 7). Он контролирует максимальный уровень дробления ячеек базовой сетки. Curvature refinement criterion (критерий разрешения сеткой кривизны поверхности) устанавливаем равным 3°. Это значит, что допустимый максимальный угол между нормальными к поверхности модели в расчётной ячейке, которая используется в качестве критерия разрешения начальной расчётной сеткой кривизны поверхности модели, не может превышать 3°.[4]

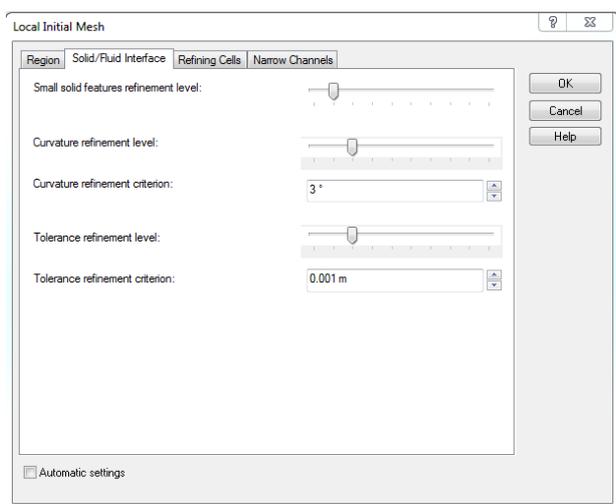


Рис. 7. Параметры сетки для границы между телом и средой

Параметру Tolerance refinement criterion (критерий разрешения сеткой выступов поверхности) задаём значение 0,001м (рис. 7), установив тем самым допустимую максимальную выпуклость.

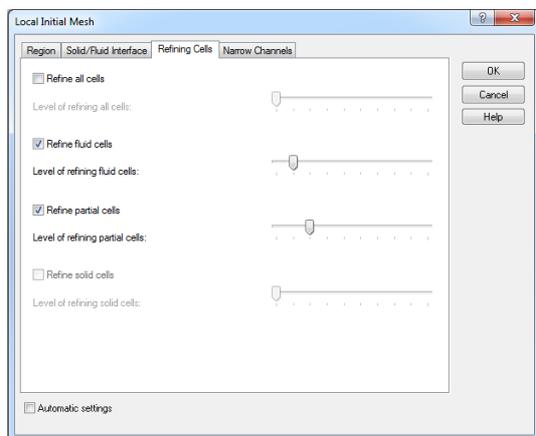


Рис. 8. Параметры локальной сетки для дополнительного объёма

Во вкладке Refining Cells (дробление ячеек) регуляторы Level of refining fluid cells (уровень дробления всех ячеек в текучей среде) и Level of

refining partial cells (уровень дробления всех частичных ячеек) устанавливаем в положения 1 и 2 соответственно (рис. 8).

Для расчёта обтекания объекта использовалась динамически адаптивная сетка, которая позволяет уменьшать шаг расчёта в местах с наибольшим возмущением. Это даёт приемлемую точность метода, но не требует значительного увеличения мощности ЭВМ. Данный подход является одним из наиболее эффективных для увеличения точности расчёта. С его помощью в сетку включаются дополнительные узлы в окрестностях локализации особенностей решения. Результат данного разбиения в сечении крыла модели можно наблюдать на рис. 9.

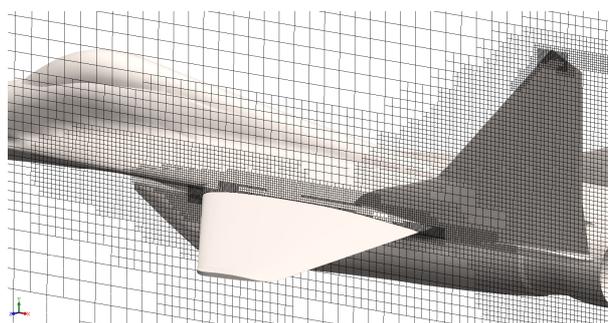


Рис. 9. Динамически адаптивная сетка в сечении

С помощью функции Point Parameters (точечные параметры) задаём координаты точек, в которых необходимо получить замеры. В окне измеряемых параметров выставляем Velocity (скорость) по всем трём осям. После нажатия Show (отобразить) выводится таблица с их значениями.

Скос потока — это отклонение вектора местной скорости набегающего потока от направления невозмущенного потока, обусловленное приращениями скорости при обтекании тела. Угол его считается положительным, когда вертикальная составляющая местной скорости направлена вниз. Имея значения осевых составляющих скорости в каждой точке замера из полученной таблицы, скос можно вычислить следующим образом:

$$\varepsilon_{\alpha} = \alpha - \arctg\left(\frac{v_y}{v_x}\right);$$

$$\varepsilon_{\beta} = \beta - \arctg\left(\frac{v_z}{v_x}\right);$$

где  $\varepsilon_{\alpha}$  — продольный скос (угол скоса в вертикальной плоскости),  $\varepsilon_{\beta}$  — боковой скос (угол скоса в горизонтальной плоскости).

**Результаты численного эксперимента.** Полученные в результате газодинамического анализа линии тока отображены на рис. 10. Они проходят через вертикальную линию, по длине которой с шагом 25мм производились замеры углов скоса потока на модели в эксперименте в АДТ. Нулевая координата соответствует строительной горизонтали фюзеляжа.

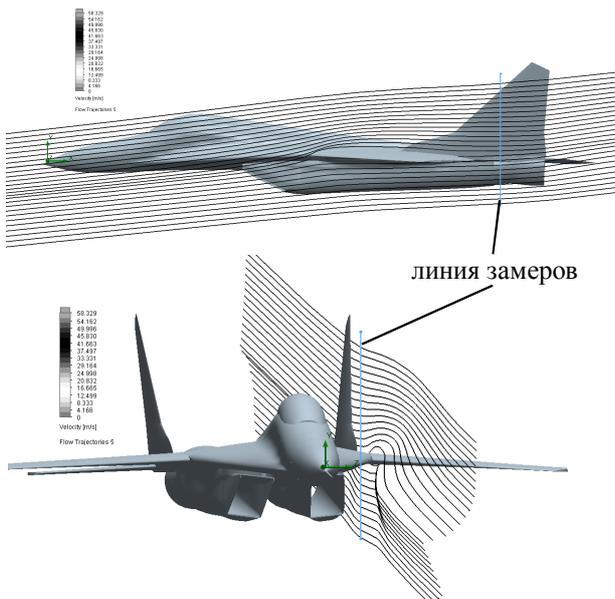


Рис. 10. Линии тока, проходящие через область замеров

Достоверность расчетных данных, полученных по описанной методике, проверена сравнением с результатами продувок в АДТ Т-103 ЦАГИ и представлена на рис. 11. Как видно из графиков зависимости углов скоса от высоты замера на линии, результаты расчета хорошо сходятся с экспериментальными данными.

Нужно отметить, что на показания насадков (применявшихся в аэродинамической трубе) полного и статического давлений может оказать значительное влияние угол скоса потока относительно оси насадка. Это влияние в значительной степени зависит от конструкции приемника давления. То есть само измерительное оборудование оказывает влияние на измеряемые величины. Так же следует иметь в виду, что полученные в результате продувок в АДТ характеристики, исходя из опыта множеств исследований, могут весьма отличаться от значений, полученных из результатов летных экспериментов по ряду причин.

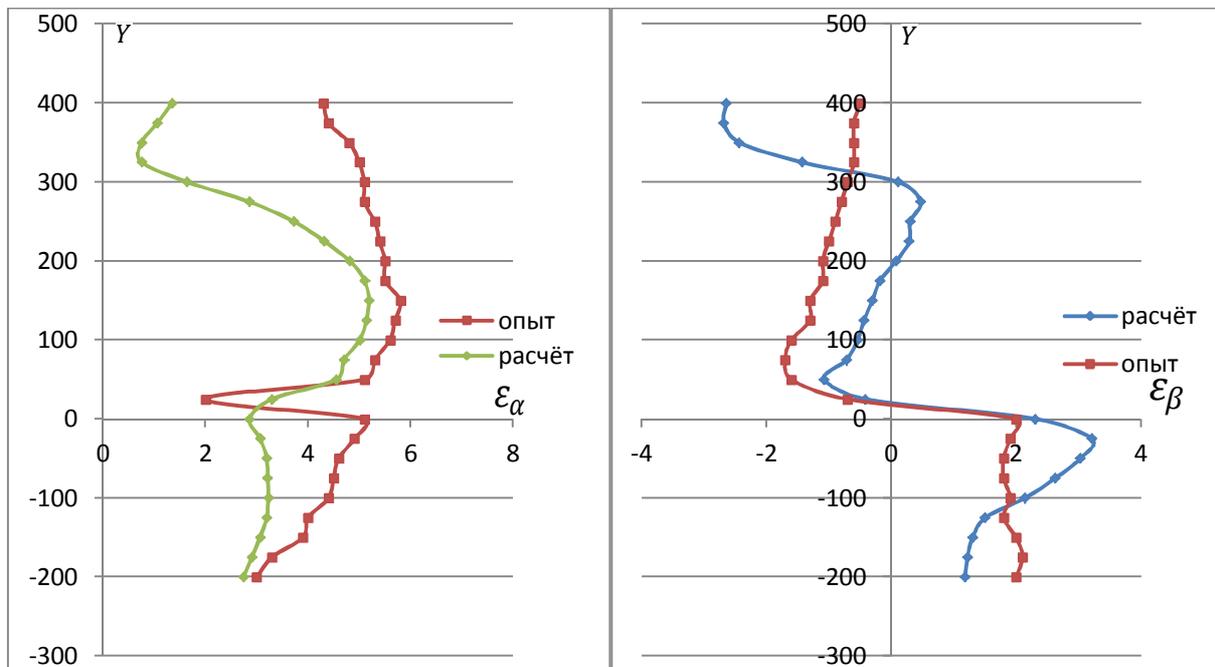


Рис. 11. Зависимости  $f(\epsilon_\alpha, y)$  и  $f(\epsilon_\beta, y)$  соответственно

**Вывод.** Во время численного моделирования обтекания была получена трёхмерная модель распределения основных гидродинамических параметров в окрестности модели СН.

Для решения данной частной задачи были адаптированы расчётные параметры для методики вычисления применяемой программы. Удовлетворительной сходимости удалось достигнуть путём сравнения результатов ряда расчётных исследований обтекания с продувочным экспериментом.

При том, что углы скоса потока являются довольно «тонкими» и не статичными величинами, описанный способ расчёта позволяет определить аэродинамические параметры полей течения

набегающего потока в окрестном пространстве ЛА с приемлемой точностью. Полученные данные можно использовать для расчёта траекторий пространственного движения отбрасываемых средств защиты самолёта (ЛТЦ) с целью оценки безопасности их отделения. Проведённые вычисления являются необходимой частью задачи об отделении, которые говорят о сходимости расчётных данных с продувочным экспериментом. В дальнейшем будут проводиться вычисления в большом диапазоне режимов полёта СН.

Предварительное определение аэродинамических параметров местных течений снижает необходимость в большом количестве трубных экспериментов, тем самым уменьшая стоимость и

время исследовательской работы. Это, в свою очередь, сокращает время оптимизации компоновки отбрасываемого груза и метода его отделения на этапе проектирования.

Данную методику можно применять для предварительного расчёта течения потока как применительно к существующим, так и к разрабатываемым ЛА для получения подробных данных о влиянии поля течения на изучаемый объект.

#### Литература

- 1.Алямовский А. А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарёв Н.Б. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. — СПб.:БХВ-Петербург, 2005. — 800с. — ISBN 5-94157-558-0.
- 2.Субботина П.Н., ООО «Тесис», Решение задач внешнего обтекания с использованием различных моделей турбулентности в FlowVision
- 3.ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры. М.: ИПК Издательство стандартов. 2004г.
- 4.Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — СПб.:БХВ-Петербург, 2012. —448С.: ил. ISBN 978-5-9775-0763-9.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
Воронежский государственный технический университет

## MATHEMATICAL RESEARCH OF FLOW AROUND AN AIRCRAFT

**T.B. Burenko, V.A. Nesterov, A.P. Budnik**

The article comments on the technique of obtaining the aerodynamic characteristics of the mathematical model of the aircraft. The task is performed by means of computer engineering with the help of a gas-dynamic analysis software package, and solid modeling. It describes the main features of this method comparing to traditional full-scale wind tunnel tests. Method of using the data of computational experiment is shown to test the convergence of the results obtained by calculating with the available experimental data. The obtained characteristics are required for required for the modeling of trajectories of droppable objects in the vicinity of the carrier aircraft

Key words: downwash, solid modeling, gas-dynamic analysis, finite volume method, KEAKN

## МОДЕЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ СТРУКТУРЫ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АППАРАТА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский

В статье рассматривается модель выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей. Предлагаются ее практическая реализация в виде программы, рассматриваются основные модули, необходимые для работы программы

Ключевые слова: динамическое программирование, дискретное программирование, мультисервисные сети

### Введение

В настоящее время, в связи с широким внедрением мультисервисных сетей, а также постоянным ростом конкуренции на рынке предоставления телекоммуникационных услуг населению, большую актуальность приобретает задача оптимизации развивающихся структур таких сетей, решение которой нацелено на расширение сферы влияния компании-поставщика услуг, привлечение новых пользователей и удержание существующих. В связи с этим, требуются новые средства оптимальной реорганизации структуры и модернизации компонентной базы сети в процессе ее развития [1,2].

Решение данной проблемы включает в себя решение двух основных задач: задачи оптимального размещения дополнительных узлов, включаемых в сеть, и задачи оптимального выбора комплекса технических средств (КТС) из множества альтернативных устройств различных производителей для узлов, включенных в сеть [2]. Рассмотрим детально каждую из них.

### Задача размещения узлов сети

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, сведем задачу оптимального размещения вводимых в сеть узлов к задаче минимизации суммарных затрат на их размещение и представим ее в формате линейного целочисленного программирования [1,3,4,5,6]:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

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

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J z_{ij} v_j \geq V_{\min} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J z_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, I}. \quad (4)$$

В данном случае ограничение (3) означает, что общее число задействованной емкости (подключенных пользователей) должно превышать минимальный порог задействованной емкости  $V_{\min}$ .

Ограничение (4) гарантирует, что один узел может быть размещен только в одном из альтернативных мест [4,5,6].

### Задача оптимального выбора КТС

Рассмотрим данную задачу в условиях фиксированного спроса на услуги сети, и может быть сведена к динамической задаче дискретного программирования [1,3,4,5].

Для дальнейшего рассмотрения необходимо ввести 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;

---

Елизаров Дмитрий Эдуардович – ВГТУ, аспирант, e-mail: elizarovdm@list.ru

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

$c_e$  - 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  $b_e$ .

Сформулируем задачу выбора оптимального состава КТС на детерминированном временном интервале  $[0; T]$ , используя введенные обозначения. Данная задача может быть сведена к задаче дискретного динамического программирования. Для каждого подынтервала  $\tilde{t}_k \in [0; T]$ ,  $k = \overline{1, K}$ , необходимо выбрать оптимальный состав КТС каждого включенного в сеть узла с учетом минимизации затрат на установку и деинсталляцию оборудования. Таким образом, данную задачу можно формально свести к следующей постановке [1,3]:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E Q(t_{kie}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$Q(t_{kie}) = \begin{cases} 0, & \text{если } (\overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap \overline{x(t_{kie})}) \cup \\ & \cup (\overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap x(t_{kie})); \\ c_e, & \text{если } \overline{x(t_{(k-1)ie})} \cap x(t_{kie}); \\ d_e, & \text{если } x(t_{(k-1)ie}) \cap \overline{x(t_{kie})}, \end{cases} \quad (6)$$

$$x(t_{kie}) = \begin{cases} 1, & \text{оборудование } b_e \text{ включается} \\ & \text{в состав} \\ & \text{узла } u_i \text{ на подынтервале } t_{kie}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E v_e x(t_{kie}) \geq V_k^{\min}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (8)$$

Данная задача является модифицированной версией задачи о ранце [7]. Воспользуемся модифицированным методом динамического программирования для ее решения.

Допустим, что решение о включении оборудования типа  $b_e$  в состав узла  $u_i$  для каждого момента времени  $\tilde{t}_k$  принимается на отдельном подынтервале времени  $t_{kie} \in [0; T]$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $e = \overline{1, E}$ . Тогда  $S(t_{KIE}, V')$  - оптимальное значение целевой функции. Таким образом справедливы следующие рекуррентные соотношения [1,3,8,9,10]:

$$S(t_{111}, V') = \begin{cases} 0, & V' = 0, \\ c_1, & 0 < V' \leq v_1, \\ +\infty, & V' > v_1; \end{cases} \quad (9)$$

Если  $k = 1 \cap x(t_{(k-1)ie}, V') = 0$ :

$$S(t_{kie}, V') = \min \begin{cases} S(t_{kie} - 1, V'), & x(t_{kie}, V') = 0, \\ c_e + S(t_{kie} - 1, \max\{0, V' - v_e\}), \\ x(t_{kie}, V') = 1 \end{cases} \quad (10)$$

Если  $k > 1 \cup x(t_{(k-1)ie}, V') = 1$ :

$$S(t_{kie}, V') = \min \begin{cases} S(t_{kie} - 1, V'), & x(t_{kie}, V') = 1, \\ d_e + S(t_{kie} - 1, \max\{0, V' - v_e\}), \\ x(t_{kie}, V') = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{\min} \leq V' \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{e=1}^E v_e. \quad (12)$$

### Модель выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей

Предлагается реализовать модель динамической оптимизации, позволяющую решать сформулированные задачи [3,4,5].

Входными данными настоящей модели будут служить данные о текущем состоянии сети. А именно: текущая структура узлов, входящих в состав сети, структура линий связи между узлами, текущая структура КТС каждого узла сети, а также сведения о пользователях, подключенных к установленному оборудованию. Кроме этого, для корректной работы модели оптимизации необходимо также предоставить сведения о возможных альтернативных местах размещения дополнительных узлов с приложением затрат на установку и актуальными уровнями потребностей в услугах сети для каждой альтернативной территории и оборудовании, которое возможно установить в узлах сети с затратами на его установку и максимальной емкостью данного оборудования.

На основе входных данных предлагаемой модели необходимо в первую очередь решить задачу размещения дополнительных узлов в зависимости от спрогнозированного фиксированного спроса на услуги сети, статической постановке. Далее, используя результат решения задачи размещения, необходимо решить задачу оптимизации состава КТС для каждого узла на планируемый временной период, входящего в состав сети. Таким образом, результатом работы модели является оптимальная структура узлов сети, а также план развития состава КТС на рассматриваемый период времени.

Факторами, служащими для запуска процесса оптимизации структуры мультисервисной сети могут послужить [3,5]:

1. Увеличение уровня потребности в услугах сети на территории, обслуживаемой сетью. В данном случае, возможно, необходима реорганизация КТС одного или нескольких узлов,

включенных в состав сети, для обеспечения возможности подключения новых пользователей.

2. Увеличение уровня потребности в услугах сети на территории не обслуживаемой сетью. В данном случае необходима реорганизация структуры узлов сети наряду с реорганизацией КТС для установки дополнительного узла и удовлетворение спроса на большей территории.

3. Уменьшение уровня потребности в услугах сети на территории, обслуживаемой сетью. В

данном случае происходит отток пользователей (отключение от сети) и, возможно, необходимо исключить один или несколько узлов из состава сети или реорганизовать КТС некоторых узлов.

С использованием описанных входных данных модели и факторов, влияющих на развитие сети, предлагается следующая структурная схема модели динамической оптимизации структуры мультисервисных сетей, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема модели выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей

### Программа выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей

В качестве практической реализации описанной модели разработана программа, в состав которой должны быть включены следующие модули:

1. Модуль ввода данных пользователя. Отвечает за ввод исходных данных, необходимых для работы оптимизационной модели.

2. Модуль оптимизации структуры узлов сети. Служит для решения задачи размещения включаемых в сеть дополнительных узлов на основе данных введенных пользователем.

3. Модуль динамической оптимизации КТС узлов сети. Служит для решения задачи

оптимизации КТС для планируемого временного интервала. Входными данными для данного модуля являются исходные данные введенные пользователем о структуре КТС узлов сети, а также результаты работы модуля оптимизации структуры узлов сети.

4. Модуль хранения данных. Отвечает за хранение данных, введенных пользователем, а также сохранение результатов оптимизации.

5. Модуль справки и поддержки. Служит для оказания пользователю справки по работе с программой.

6. Модуль вывода графических данных. Обеспечивает вывод результирующих данных в

виде, доступном для понимания пользователю программы.

Обобщенная схема взаимодействия модулей программы выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей представлена на рис. 2.

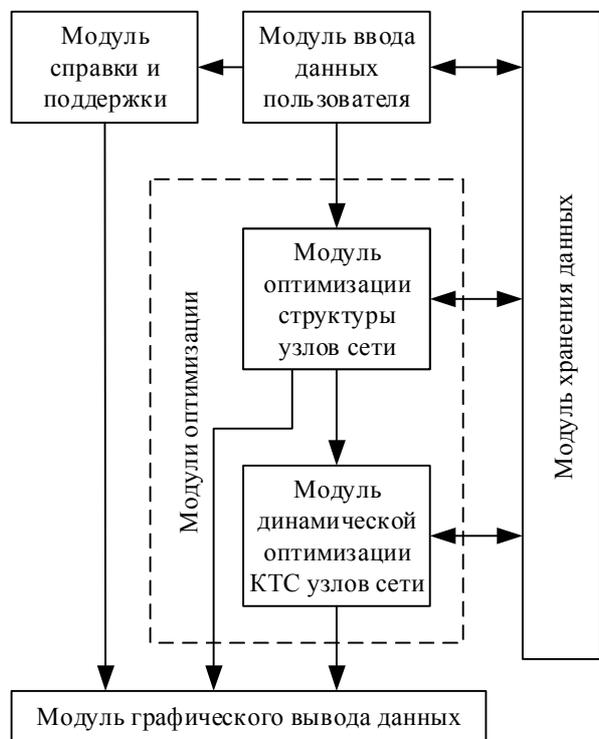


Рис. 2. Обобщенная схема взаимодействия модулей программы выбора оптимального развития структуры мультисервисных сетей

### Заключение

Использование рассмотренной модели оптимального развития структуры мультисервисных сетей позволяет спланировать процесс развития на долгосрочный период в условиях фиксированного спроса пользователей на услуги и минимизации затрат на оперативную реорганизацию структуры узлов сетей и модернизацию КТС, что способствует расширению сферы влияния, привлечению новых пользователей и удержанию существующих. Применение данной программы позволит повысить

Воронежский государственный технический университет

## MODEL OF THE OPTIMAL DEVELOPMENT STRUCTURE FOR MULTISERVICE NETWORKS

**D.E. Elizarov, V.L. Burkovsky**

The article describes the model of the selection of the optimal development structure for multi-service networks. Offers its practical implementation in the form of the program, describes the basic modules required for the program

Key words: dynamic programming, discrete programming, multiservice networks

качество проектных решений по планированию развития сети, что особенно важно в условиях высокой конкуренции [3,4,5].

### Литература

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 телеграфика 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. Елизаров Д.Э. Модели проектирования развивающихся мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Перспективные исследования и разработки в области информационных технологий. - 2014. – С. 4.
6. 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. - 136с.
7. Pisinger D. Knapsack problems [Текст] / D. Pisinger, H. Kellerer, U. Pferschy. – Springer Science & Business Media, 2013. – 548 с.
8. 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.
9. Беллман, Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных [Текст] / Р. Беллман, Э. Энджел. – М.: Мир, 1974. - 204 с
10. Беллман Р., Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. - М.: Наука, 1965. - 460 с.

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСПОЗНАВАНИЯ СКАНИРОВАННОГО РУКОПИСНОГО ТЕКСТА

А.А. Мозговой

В статье показаны результаты внедрения элементов системы поддержки принятия решений в графический интерфейс программы распознавания сканированного рукописного текста. Внедрение элементов поддержки принятия решений в виде экспертных оценок позволяет значительно увеличить качество распознавания сканированного рукописного текста

Ключевые слова: оптическое распознавание, рукописный, СММ, СППР

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная вариативность в написании рукописных слов делает задачу автоматизации процесса распознавания сканированного рукописного текста весьма нетривиальной. Суммирование ошибок на каждом этапе процесса в конечном итоге приводит к увеличению процента нераспознанных слов до значительной величины,

что ограничивает возможность практического применения разработанной подсистемы.

В данной статье рассматривается возможность внедрения элементов системы поддержки принятия решений на основе экспертных оценок [1] в графический интерфейс программы распознавания сканированного рукописного текста [2] в целях увеличения качества распознавания. Структурная схема предлагаемого решения показана на рис. 1.

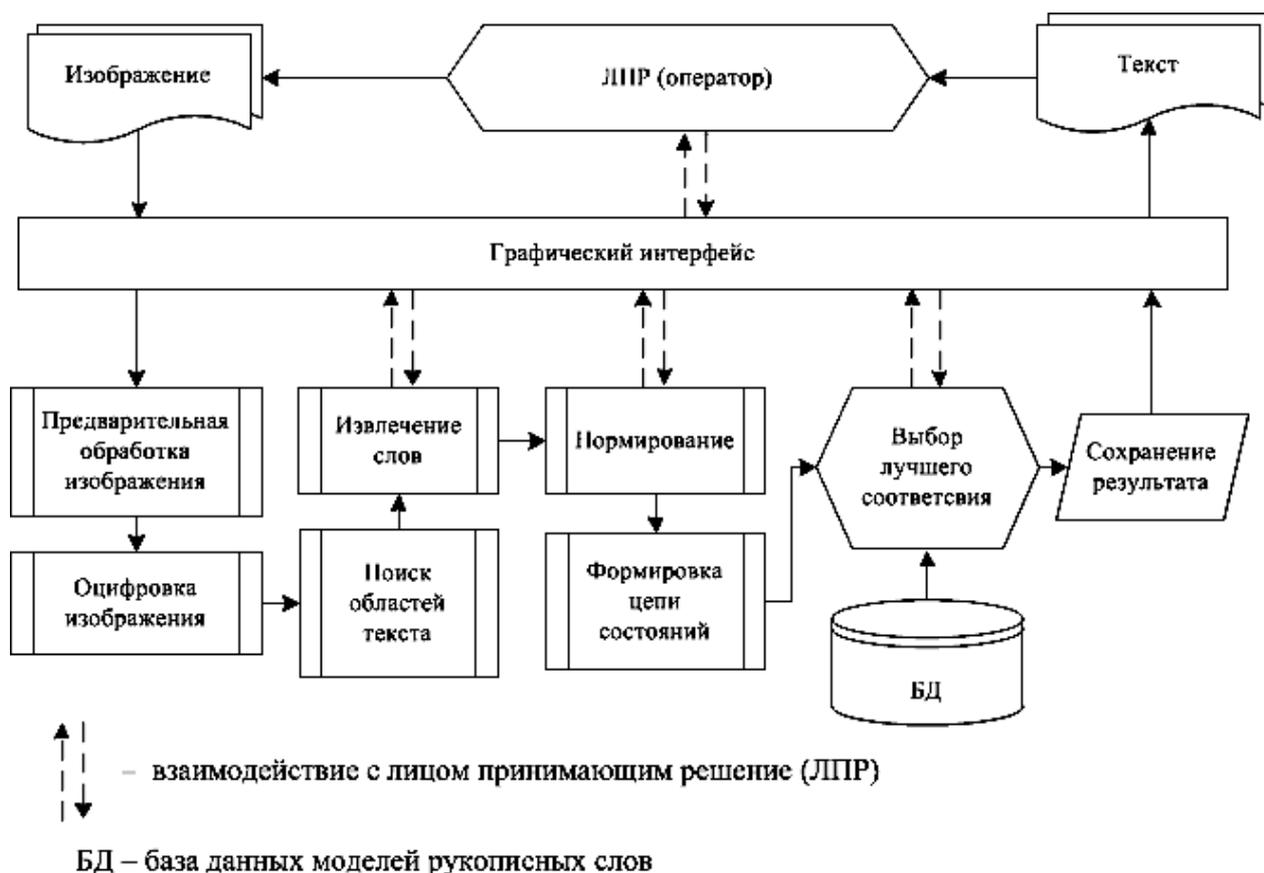


Рис. 1. Структурная схема роли ЛПР в распознавании рукописных слов

Взаимодействие осуществляется посредством графического интерфейса в интерактивной форме [3]. Применение пунктирных линий обозначает, что взаимодействие с ЛПР на этапе распознавания,

строго говоря, не является обязательным. Если применяемые оптимальные характеристики по умолчанию позволяют получить на выходе приемлемый результат, то вмешательства ЛПР не требуется.

Наибольший негативный вклад в уменьшение процента распознанных рукописных слов происходит на следующих этапах:

- извлечение слов из изображения (вероятность отказа - 5%);
- нормирование изображений слов (вероятность отказа - 5%);
- распознавание слов (вероятность отказа - 4%).

Итоговый процент распознавания в 86,64% показан на рис. 2.



Рис. 2. Итоговый процент распознавания

### ИЗВЛЕЧЕНИЕ СЛОВ ИЗ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Эффективность этапа извлечения слов из изображения определяется двумя эмпирическими коэффициентами  $a$  и  $\partial$ , которые используются при расчёте расстояния между словами по горизонтали (1) и вертикали (2).

$$d = \rho_{\tau} \times a = \frac{\sum_j (\sum_i d_i)}{N_d} \times a, \quad d_i = \begin{cases} d_i, & d_i < d_m \\ 0, & d_i \geq d_m \end{cases}, \quad (1)$$

где:  $d_m = \frac{I_w}{N_d}$

$d_i$  – ширина промежутка  $i$  для  $j$ -ой строки в пикселях,  
 $N_d$  – количество суммируемых промежутков,  
 $I_w$  – ширина изображения в пикселях,  
 $a$  – эмпирический коэффициент ( $a=1,2$ ).

$$\sigma = ((y1_{max} - y1_{min}) + (y2_{max} - y2_{min}))/\partial, \quad (2)$$

где  $y1_{max}, y2_{max}, y1_{min}, y2_{min}$  – вертикальные координаты верхних и нижних точек прямоугольных областей совокупностей точек,  $\partial$  – коэффициент, найденный эмпирическим путём ( $\partial = 4$ ).

Значения коэффициентов  $a$  и  $\partial$  были подобраны после анализа базы изображений, полученной при сборе образцов почерков [4]. Однако в ряде случаев лучшие результаты получаются при использовании других пар значений.

Для выявления наиболее подходящих пар эмпирических коэффициентов предлагается привлечение экспертных оценок лица принимающего решение (ЛПР), организованное в виде графического интерфейса с возможностью выбора наиболее оптимального варианта из предложенных итоговых изображений (см. рис.3).

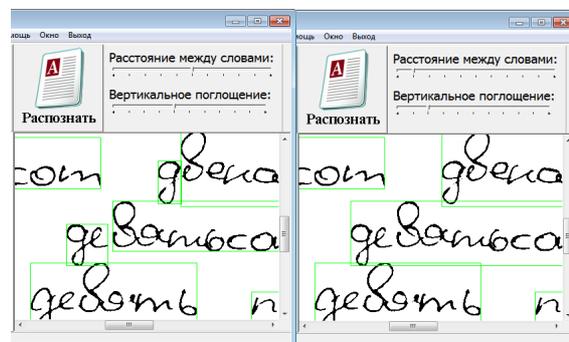


Рис. 3. Выбор лучшей пары коэффициентов на основе экспертной оценки

Применение экспертных оценок позволяет увеличить эффективность этапа извлечения слов из изображения с 95% до 98%.

### НОРМИРОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЁННЫХ СЛОВ

Задача нормирования извлечённых изображений рукописных слов по высоте осложняется особенностью в написании русских слов, заключающейся в наличие верхних (буквы «б», «в», иногда - «д») и нижних (буквы «д», «з», «р», «у», «ф») графических элементов. В целом разработанная автором подпрограмма нормирования справляется с поставленной задачей, однако в ряде случаев, связанных с небрежностью написания, происходят сбои (см. рис.4).

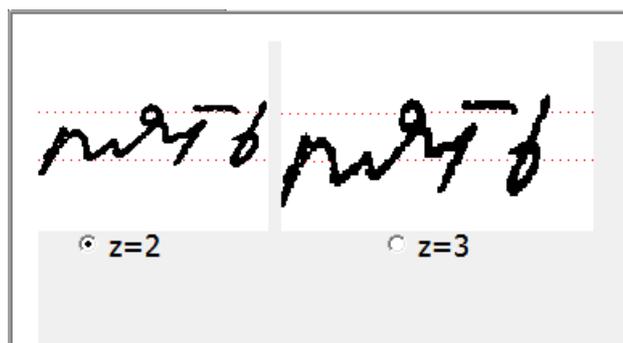


Рис. 4. Выбор лучшего коэффициента нормирования на основе экспертной оценки

Качество нормирование удаётся улучшить путём экспертной оценки коэффициента  $z$ , используемого для вычисления границ средней зоны слова (3).

$$H = H_{max} - H_{max}/z, \quad (3)$$

где  $H_{max}$  – максимальное количество значащих пикселей анализируемого изображения слова,  $z$  – коэффициент, найденный эмпирическим путём ( $z = 2$ ).

Эффективность этапа увеличилась более чем на 4,5 процента с 90,25% до 95,06%.

### РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЛОВ

На завершающем этапе распознавания также предлагается использование экспертных оценок, которое заключается в предложении к оценке ЛПР нескольких вариантов слов из выпадающего списка [5], имеющих близкие коэффициенты соответствия  $\rho$  (4) моделям слов, ранжированные по убыванию коэффициента (рис. 5).



Рис. 5. Выбор вариантов распознавания из выпадающего списка

Итоговый процент распознавания с применением СППР в 93,15% показан на рис. 6.



Рис. 6. Итоговый процент распознавания с применением СППР

$$\rho(O|\lambda) = \sum_{i=1}^n \alpha_T(i), \quad (4)$$

где  $\rho$  – вероятность генерирования исследуемой последовательности наблюдений анализируемой моделью.

$$\alpha_1(i) = \pi_i b_i(O_1),$$

Воронежский институт высоких технологий

## DECISION SUPPORT SYSTEM BY THE EXAMPLE OF THE OFF-LINE HANDWRITTEN TEXT RECOGNITION

A.A. Mozgovoy

The paper reviews results of the implementation of elements of a decision support system in the graphical user interface of the off-line handwriting text recognition system. The elements of decision support in the form of expert assessments can significantly enhance the quality of handwriting text recognition

Key words: optical recognition, handwriting, HMM, DSS

$$\alpha_{t+1}(j) = \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_t(i) a_{ij} \right] b_j(O_{(t+1)}).$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внедрение в графический интерфейс программы распознавания рукописного текста элементов поддержки принятия решений в виде экспертных оценок ЛПР позволяет значительно (на 6,5%) увеличить качество распознавания сканированного рукописного текста. Особенностью предлагаемого решения является реализация интерактивного взаимодействия с ЛПР на ключевых этапах распознавания рукописного текста с визуализацией корректирующего воздействия в режиме реального времени. Применение заранее рассчитанных оптимальных коэффициентов позволяет увеличить производительность системы за счёт возможности ограничения привлечения ЛПР в ряде случаев.

### Литература

1. Семенов, С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем. Практика применения метода экспертных оценок / С.С. Семенов // Ленанд, 2015 г., 352 стр., 978-5-9710-1972-5
2. Мозговой, А.А. Проблемы применения скрытых марковских моделей при распознавании рукописного текста / А.А. Мозговой // В мире научных открытий. 2013. №6. С.186-198.
3. Судаков, В.А. Унификация разработки программного обеспечения прикладных СППР / В.А. Судаков, В.П. Осипов // XII всероссийское совещание по проблемам управления / ВСПУ-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 8855-8863.
4. Мозговой, А.А. Проблемы извлечения рукописных слов из сканированного изображения [Электронный ресурс] / А.А. Мозговой // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. №1. [http://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/mozgovoy\\_1\\_13\\_1.pdf](http://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/04/mozgovoy_1_13_1.pdf) (дата обращения 14.05.2013).
5. Рогов, А.А. Автоматизированная система распознавания рукописных исторических документов / А.А. Рогов, А.Н. Талбонен, А.Г. Варфоломеев // Труды 12-ой Всероссийской научной конференции "Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции" - RCDL/2010, Казань, Россия, 2010, С. 469-475.

## СТРУКТУРА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛЕГКИХ

В.А. Васильченко, В.Л. Бурковский

В статье предлагается интегральная структура базы знаний, являющейся основой построения распределенной медицинской информационной системы оперативной диагностики и лечения заболеваний легких

Ключевые слова: эксперт, диагностика, коэффициент доверия

### Введение

Разработка интеллектуальных систем лечения заболеваний легких, основанных на знаниях, является составной частью исследований по информационным технологиям, и имеет цель: создание компьютерных методов решения медицинских проблем, обычно требующих привлечения экспертов-специалистов – пульмонологов.

Взаимодействие пользователя-врача, эксперта пульмонолога и структурных частей экспертной медицинской системы диагностики можно представить в виде следующей базовой структуры.

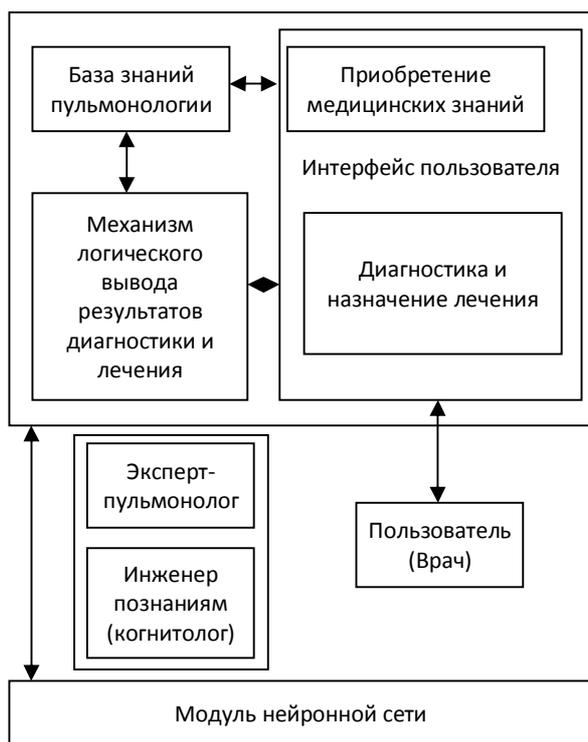


Рис. 1. Базовая структура взаимодействия структурных частей медицинской интеллектуальной системы

Васильченко Владислав Алексеевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: v.a.vasilchenko@gmail.com  
Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

### Аналитическая часть

Предлагаемая экспертная система оперативной диагностики и лечения заболеваний легких включает следующие функциональные возможности:

- ввод, редактирование и хранение данных о современных медицинских препаратах;
- ввод, редактирование и хранение данных о пациентах и историях их болезни;
- диагностика легочных заболеваний;
- выбор и назначение оптимального метода лечения легочного заболевания;
- интеллектуальная диагностика легочных заболеваний на основе нейронной сети;
- проверка эффективности существующего метода лечения;
- получение актуальной медицинской справочной информации о заболеваниях легких и медицинских препаратах для борьбы с этими заболеваниями.

Основу предлагаемой медицинской экспертной системы составляет база знаний, которая хранит некоторое множество фактов и набор правил, полученных от ведущих экспертов-врачей пульмонологов, а также из специализированной литературы. Основное отличие базы знаний от базы данных заключается в том, что в базе данных объем информации представляет собой не связанные друг с другом сведения. В базе знаний элементы уже имеют связи, как между собой, так и с объектами внешнего мира, что особенно актуально для медицинских вопросов. Информация в базе знаний – это все, что необходимо для понимания, формирования и решения проблемы. Она включает в себя два основных элемента: факты (знания) из предметной области (в данном случае из пульмонологии) и правила или специальные эвристики, которые управляют использованием фактов при решении задач диагностики.

### Выбор структуры базы знаний

Знания об объекте пульмонологии предлагается систематизировать в виде продукционной базы знаний. Данный вид представления знаний характерен своей наглядностью, легкостью внесения каких-либо дополнений и изменений, а также высокой модульностью. Каждое правило базы знаний

записывается в следующем виде «Если ..., то ...»: первая часть (т.е. «Если») соответствует условию, а вторая (т.е. «то») соответствует выводу. Отсюда следует, что лицо, которое принимает решение, разбивая объект на различные продукционные группы, следует правилам следующего вида «Если температура больного высокая и присутствует ощущение нехватки воздуха, то возможно у пациента воспаление легких». Для построения правил представленной структуры следует использовать математический аппарат нечетких множеств. Каждой координате необходимо представить лингвистические переменные с дифференцируемыми терминами, например такими, как «большой», «средний», ... «маленький», «очень маленький». Это значит, что можно сформировать базу знаний о действии независимых координат  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  на значение зависимой координаты  $Y$  в виде сочетания логических высказываний и правил следующего типа:

$$\begin{aligned} & \text{ЕСЛИ } (x_1 = a_{1j_1}) \text{ И } (x_2 = a_{2j_1}) \text{ И ... И } (x_n = a_{nj_1}) \\ & \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1j_2}) \text{ И } (x_2 = a_{2j_2}) \text{ И ... И } (x_n = a_{nj_2}) \dots \\ & \text{ИЛИ } (x_1 = a_{1j_k}) \text{ И } (x_2 = a_{2j_k}) \text{ И ... И } (x_n = a_{nj_k}) \\ & \text{ТО } y = d_j, j \in [1, m], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_{nj_k}$  – терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в строчке с номером  $j_p$  ( $p \in [1, k_j]$ ;  $k_j$  – количество строчек-конъюнкций, у которых выход оценивается термом  $d_j$ ;  $m$  – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходного параметра  $y$ . База пульмонологических знаний в сокращенном виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \rightarrow y = d_j, j \in [1, m]. \quad (2)$$

Требуемую пульмонологическую базу знаний имеется возможность построить либо с помощью нечеткого логического вывода Мамдани, либо вывода Сугено. База знаний Мамдани проектируется с использованием аппроксимации зависимости типа  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами. База Сугено подобна базе знаний Мамдани, кроме правил  $d_j$ , которые задаются не нечеткими терминами, а линейной функцией от входов.

$$\begin{aligned} & \bigcup_{p=1}^{k_j} \left[ \bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp}) \right] \\ & \rightarrow y = b_{j0} + \sum_{i=1}^n (b_{ji} * x_i), j \in [1, m]. \end{aligned} \quad (3)$$

Правила в базе знаний Сугено, являющиеся своего рода коммутаторами с одного линейного закона «входы-выход» на другой, так же линейны. Границы подобластей размытые, значит, одновременно могут выполняться некоторое количество линейных законов, но с различными степенями принадлежности. Принципиально, что базу знаний Мамдани можно построить, используя знания лица, принимающего решение, а базу знаний Сугено наиболее подходяще использовать в случае отсутствия у лица, принимающего решение, необходимых знаний об объекте. Из выше сказанного следует сделать вывод, что в экспертной системе диагностики максимально эффективно будет использование базы знаний Мамдани, так как возможно применение значительного опыта, накопленного медиками.

#### Особенности построения и организации экспертных систем

Основу медицинской экспертной системы составляет совокупность знаний, структурированных в целях упрощения процесса принятия решения. Для экспертов в области искусственного интеллекта термин знания означает информацию, которая требуется программному обеспечению, чтобы оно вело себя "интеллектуально". Эта информация принимает форму правил и фактов. Правила и факты в медицинской экспертной системе не всегда либо истинны, либо ложные. В отдельных случаях существует некоторая степень неуверенности в достоверности представленного факта или точности правила. Если это сомнение очевидно для наблюдателя, то его называют "коэффициентом доверия".

Большая часть правил экспертных систем является эвристиками, то есть эмпирическими упрощениями, которые эффективно ограничивают поиск решения. Экспертные медицинские системы используют эвристики, так как задачи диагностики и лечения заболеваний, которые они решают, трудны, не до конца понятны и не поддаются алгоритмическому решению или строгому математическому анализу. Алгоритмический метод дает гарантии на корректное или оптимальное решение задачи диагностики, в то время как эвристический метод предлагает наиболее приемлемое решение в подавляющем большинстве случаев.

Знания в представленной пульмонологической экспертной системе организованы таким образом, чтобы информацию о предметной области отделить от других типов знаний системы, таких как общие сведения о том, как решать задачи диагностики или сведения о том, как взаимодействовать с пользователем-врачом. Выделенные и сгруппированные определенным образом знания о медицинской области называются базой медицинских знаний, в то время как общие знания о

нахождении решений поставленных задач диагностики называются механизмом вывода.

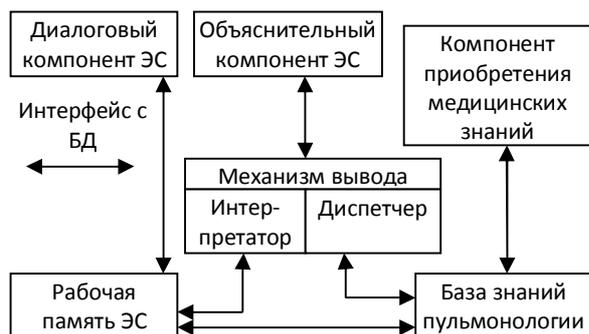


Рис. 2. Структура работы экспертной системы

База пульмонологических знаний содержит факты заболеваний легких (данные) и правила, которые используют эти факты за основу для принятия решений.

Механизм вывода экспертной системы содержит:

- интерпретатор, который определяет, как использовать правила для вывода результатов диагностики на основе информации, хранящейся в базе знаний;

- диспетчер, который устанавливает порядок применения правил.

База знаний экспертной системы диагностики является статической, так как здесь существует возможность не учитывать изменения окружающего мира за все время решения задачи.

В работе экспертной медицинской системы можно выделить три основных режима работы:

- режим приобретения медицинских знаний
- режим постановки диагноза (режим консультации или режим использования)
- режим назначения подходящего метода лечения.

В режиме приобретения знаний работу с экспертной системой осуществляет эксперт (высококвалифицированный пульмонолог). Используя компонент приобретения знаний, врач описывает проблемную область в виде совокупности правил и фактов. Другими словами, "заполняет" экспертную систему знаниями, которые дают возможность ей самостоятельно решать задачи из проблемной области. Стоит отметить, что данному этапу при традиционном подходе к программированию соответствуют следующие этапы: создание алгоритма, программирование и отладка, выполняемые разработчиком. Следовательно, в отличие от традиционного подхода, в случае медицинской экспертной системы наполнение программ осуществляет не программист, а врач-эксперт, не владеющий навыками программирования.

В режиме постановки диагноза взаимодействие с экспертной системой осуществляет врач-пульмонолог, которого интересует результат

диагноз и (или) способ его получения. Необходимо сказать, что в отличие от традиционных программ экспертная система при решении задачи диагностики не только исполняет предписанную алгоритмом последовательность операций, но и сама предварительно создает ее.

В режиме назначения лечения система, используя накопленные знания о предметной области, а также полагаясь на интегрированный модуль нейронной сети, предлагает врачу-пользователю наиболее оптимальные для каждого случая методы лечения легочного заболевания.

## Заключение

Предлагаемая экспертная система диагностики и лечения имеет возможность самообучаться на решаемых задачах, пополняя автоматически свою базу знаний результатами полученных выводов и решений. Ограниченность задачи диагностики и лечения легочных заболеваний, решаемой с помощью экспертной системы, была решена с помощью комбинации нейронной сети и обычных математических методов и построением из нее иерархических блоков, одни из которых используют для своих действий результаты работы других. Стоит отметить, что применение неявных алгоритмов не противоречит и даже не отменяет использование формальных методов, а в действительности, значительно дополняет их. К примеру, если с помощью нейронной сети определяется наиболее эффективная комбинация лекарств для лечения пациента, но существует совершенно четкое и однозначное противопоказание к назначению определенного лекарства, то в экспертную систему может быть введен логический блок с исключением, который будет препятствовать назначению этого лекарственного препарата независимо от решения нейронной сети.

Данная медицинская экспертная система значительно упростит работу врачей-пульмологов по диагностике легочных заболеваний и назначению лечения. Результатом использования системы станет точная постановка диагноза, выбор наиболее оптимального метода лечения, а также быстрая оценка эффективности лечения.

## Литература

1. Проталинский, О. М. Проверка достоверности первичной информации в АСУ ТП с использованием нечетких множеств [Текст] / О. М. Проталинский // Известия вузов Северо-Кавказского региона. Техн. науки. – Прил. – 2003. – № 3. – С. 60–63.
2. Семейкин, В.Д. Моделирование искусственных нейронных сетей в среде MATLAB [Текст] / В. Д. Семейкин и др. // Вестн. Астрахан. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Управление, вычисл. Техн. Информ. – 2009. – № 1. – С. 159–164.
3. Золин, А.Г. Применение нейронных сетей в медицине [Текст] : [Электронный ресурс] / А.Г. Золин. – Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://old.creativeconomy.ru/articles/25938/>.

4. Губин, И.М. Разработка и внедрение новой автоматизированной информационной системы ЦКБ [Текст] / И.М. Губин и др. // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2000. – № 4. – С. 51–54.
5. Дуданов, И.П. Создание "паспорта здоровья" больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями с использованием информационной системы [Текст] / И.П. Дуданов и др. // Медицинский академический журнал. – 2003. – Том 3. – № 3. – С. 125–133.
6. Фернстейн, С. Подставляемость и преобразование объектных типов в иерархии [Текст] : [Электронный ресурс] / С. Фернстейн. – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: [http://www.oracle.com/ru/oramag/june2002/index.html?dev\\_subst.html](http://www.oracle.com/ru/oramag/june2002/index.html?dev_subst.html).
7. Гусев, А.В. Информационные системы в здравоохранении [Текст] / А.В. Гусев и др. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. – 120 с.
8. Гусев, А.В. Особенности в проектировании и практической разработке медицинской информационной системы [Текст] : [Электронный ресурс] / А.В. Гусев. – Режим доступа: Worl Wide Web. URL: <http://citforum.ru/consulting/articles/med/>.
9. Шеррер, Ж. Информационные системы в здравоохранении: технология и организация [Текст] / Ж. Шеррер // Кремлевская медицина. Клинический вестник. – 2000. – № 4. – С. 15–17.
10. Боровиков В.П. Программа STATISTICA для студентов и инженеров [Текст] / В.П. Боровиков // М: КопьютерПресс. – 2001. – 301с.
11. Microsoft Corporation. Принципы проектирования и разработки программного обеспечения. Учебный курс MCSD [Текст]: / Microsoft Corporation, пер. с англ. – М.: Русская Редакция, 2002. – 736 с.
12. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход. 2-е издание [Текст] / С. Рассел // Вильямс. – 2006. – 1424 с.
13. Боровиков В.П. Нейронные сети [Текст] / В.П. Боровиков // М.: Горячая линия – Телеком. – 2008. – 392 с.
14. Ramamoorthy, C.V. Software Engineering: problems and perspectives [Текст] / C. V. Ramamoorthy и др. // Computer. Outubro. – 1984. – № 10. – С. 191–209.

Воронежский государственный технический университет

## **STRUCTURE OF EXPERT SYSTEM OPERATIVE DIAGNOSIS AND TREATMENT OF LUNG DISEASES**

**V.A. Vasilchenko V.L. Burkovsky**

The article proposes an integrated structure of the knowledge base is the basis for building a distributed medical information system operational diagnosis and treatment of lung diseases

Key words: expert, diagnostics, coefficient of confidence

## О МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА SIMPLER ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Е.Е. Фомина, Н.К. Жиганов

В работе описана математическая модель процесса непрерывного вертикального литья цилиндрических заготовок из цветных металлов. Для решения системы определяющих уравнений литья предложена модификация алгоритма SIMPLER, которая позволила увеличить скорость сходимости метода

Ключевые слова: математическое моделирование, литье металла

### 1. Введение

Актуальность исследования. Непрерывное литье – один из основных способов получения продукции из цветных металлов. В настоящее время разработано большое число математических моделей, описывающих данный процесс, а также предложены алгоритмы для численного решения определяющих уравнений литья. Среди таких алгоритмов можно отметить алгоритм SIMPLE [1] и его модификации, описанные в работах [2, 3], а также алгоритм SIMPLER, который дает более быструю сходимость, по сравнению с предыдущими методами, и как следствие занимает лидирующую позицию.

Однако при решении практических задач и реализации алгоритма с использованием ЭМВ на мелкой сетке требуются большие вычислительные затраты, так как расчет полей скорости, давления, температуры и других величин происходит в каждой узловой точке сетки по всему продольному сечению слитка. В процессе конструирования литейной технологии, особенно сложного технологического процесса, это является не совсем удобным, так как требует значительных временных затрат.

В связи с этим модификация алгоритма SIMPLER, позволяющая увеличить скорость сходимости и сократить временные затраты на расчет процесса является актуальной.

*Цель исследования.* Целью исследования является разработка модификации алгоритма SIMPLER, предназначенного для расчета процесса непрерывного литья цилиндрических заготовок из цветных металлов, позволяющего увеличить скорость сходимости итерационного процесса и сократить временные затраты на расчет.

*Объект исследования.* Процесс непрерывного литья цветных металлов.

*Предмет исследования.* Процесс непрерывного и дискретно-непрерывного

вертикального литья цилиндрических заготовок из цветных металлов, а также алгоритм решения системы определяющих уравнений.

### 2. Постановка и решение задачи

В работе рассматривался технологический процесс вертикального непрерывного и дискретно-непрерывного литья цилиндрических заготовок, согласно которому расплавленный металл подается в медный кристаллизатор (кристаллизатор имеет форму цилиндра радиуса  $R$  (м) и длиной  $L_{кр}$  (м)) через кольцеобразные пристеночные отверстия или через отверстие, диаметр которого равен диаметру кристаллизатора. Предусмотрена возможность дополнительного подогрева расплава за счет внешнего источника тепла. Заготовка вытягивается из формы (длиной  $L$ , где  $L > L_{кр}$ ) с постоянной скоростью  $u_{лит}$  (непрерывное литье), либо с периодическими остановками (дискретно-непрерывное литье) для повышения производительности процесса (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема непрерывного литья с вытяжкой заготовки вниз (разрез кристаллизатора в продольном и поперечном сечении):  $R$  – радиус формы,  $L$  – длина формы,  $L_{кр}$  – длина кристаллизатора,  $r_1, r_2$  – внутренний и внешний радиусы кольца, через которое осуществляется дополнительный подогрев,  $r_f$  – внутренний радиус кольца для литья

Фомина Елена Евгеньевна – ТвГТУ, канд. техн. наук,

доцент, e-mail: [f-elena2008@yandex.ru](mailto:f-elena2008@yandex.ru)

Жиганов Николай Константинович – ТвГТУ, д-р физ.-мат.

наук, профессор, e-mail: [jiganov2005@yandex.ru](mailto:jiganov2005@yandex.ru)

Математическая модель процесса описывается следующей системой определяющих

уравнений и граничных условий.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial r\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(r\rho(u + u_{\text{лит}})) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) = 0, \quad (1)$$

где  $u_{\text{лит}}$  – постоянная скорость литья ( $\text{м/с}$ );

$\rho$  – плотность металла ( $\text{кг/м}^3$ );

$u$  – вертикальная компонента вектора скорости вдоль оси  $Ox$  ( $\text{м/с}$ );

$v$  – горизонтальная компонента вектора скорости вдоль оси  $Or$  ( $\text{м/с}$ );

$r$  – расстояние от оси  $Or$  до текущей точки слитка ( $\text{м}$ );

$x$  – расстояние от оси  $Ox$  до текущей точки слитка ( $\text{м}$ );

$t$  – время ( $\text{с}$ ).

Уравнения движения

вдоль оси  $Ox$ :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\rho(u + u_{\text{лит}})u) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho uv) \right] = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial u}{\partial r}) \right] + Au + \rho g, \quad (2) \end{aligned}$$

вдоль оси  $Or$ :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\rho(u + u_{\text{лит}})v) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v^2) \right] = \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\mu \frac{\partial v}{\partial r}) \right] - \frac{2\mu v}{r^2} + Av, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $p$  – давление ( $\text{кг/м}\cdot\text{с}^2$ );

$\mu$  – эффективная вязкость ( $\text{кг/м}\cdot\text{с}$ );

$g$  – ускорение свободного падения ( $\text{м/с}^2$ ).

Так как формирование микропористости в отливке происходит в условиях затрудненного течения расплава сквозь дендритный каркас, формирующийся в двухфазной зоне отливки, то для описания более адекватной картины микропористости в модели была учтена проницаемость дендритного каркаса ( $K$ ). Проницаемость дендритного каркаса в уравнениях (2) и (3) определялась по закону Кармана-Козени:

$K = Au$  ( $K = Av$ ), где  $A = -C(1 - f_L)^2 / f_L^3$ ,  $C$  – коэффициент Дарси, равен  $10^8$  ( $1/\text{с}$ ), с параметром  $f_L$ , который равен 1 в жидкой, 0 в твердой и меняется линейно с температурой в мягкой зоне.

Уравнение энергии:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\rho(u + u_{\text{лит}})\phi) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\phi) \right] = \\ = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r}(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) \right] - \\ - \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(r\rho(u + u_{\text{лит}})\Delta H) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v\Delta H) \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где  $c$  – теплоемкость ( $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$ );

$\phi$  – энтальпия ( $\text{Дж}\cdot\text{К/кг}\cdot\text{с}$ );

$T$  – температура ( $\text{К}$ );

$\lambda$  – теплопроводность ( $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ );

$\Delta H = \lambda \Delta H_f$  и  $\Delta H_f$  – общая скрытая

теплота ( $\text{Дж/кг}$ ).

Граничные условия:

А) На боковых стенках ( $r=R$ ):

Если  $T \geq T_{\text{сол}}$ :

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_c (T - T_{\text{кр}}) \Big|_{r=R}, \\ u(x; R) = -u_{\text{лит}}, \quad v(x; R) = 0, \quad (5) \end{aligned}$$

где

$\alpha_c$  – коэффициент теплообмена при соприкосновении формы и слитка ( $\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ );  
 $T_{\text{сол}}$  – температура солидуса ( $\text{К}$ ).

Если  $T < T_{\text{сол}}$ :

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sigma \varepsilon_{\text{мв}} (T^4 - T_{\text{кр}}^4) \Big|_{r=R}, \quad L_{\text{кр}} \leq x \leq L, \\ u(x; R) = 0, \quad v(x; R) = 0 \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{и } -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sigma \varepsilon_{\text{мв}} (T^4 - T_{\text{окр}}^4) \Big|_{r=R}, \quad x < L_{\text{кр}},$$

$u(x; R) = 0, \quad v(x; R) = 0,$  (7)  
где  $\sigma$  – константа Стефана-Больцмана ( $5,667 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}^4$ );

$\varepsilon_{\text{мв}}$  – степень черноты внутренней поверхности кристаллизатора;

$T_{\text{кр}}$  и  $T_{\text{окр}}$  – температуры поверхности кристаллизатора и окружающей среды;

$L$  и  $L_{\text{кр}}$  – длины поверхности формы и кристаллизатора.

Б) Нижняя граница формы ( $x=0$ ):

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad u(0; r) = 0, \quad v(0; r) = 0. \quad (8)$$

В) Верхняя граница формы ( $x=L$ ):

Если  $r_1 \leq r \leq r_2$ , то

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{\text{пучка}} - \sigma \varepsilon_{\text{жид}} (T^4 - T_{\text{окр}}^4) \Big|_{x=L}, \quad (9)$$

где  $q_{\text{пучка}}$  – поток тепла от пучка электронов ( $\text{Вт/м}^2$ );

$\varepsilon_{\text{жидк}}$  – степень черноты окружающей среды.

Если  $r < r_1$  или  $r_2 < r < r_f$ , где

$r_f$  – внутренний радиус кольца для литья, то

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = \sigma \varepsilon_{\text{жид}} (T^4 - T_{\text{окр}}^4) \Big|_{x=L}. \quad (10)$$

Если  $r_f < r < R$ , то

$$T(L; r_f < r < R) = T_{\text{пл}}, \quad u(L, r) = 0. \quad (11)$$

В силу симметрии заготовки относительно оси  $Ox$  (рис. 1) в качестве расчетной области выступала правая половина слитка. Была построена следующая пространственно-временная сетка:

$$W_{\Delta x \Delta r}^{\Delta t} = \left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \\ x_i = i\Delta x, i = 0, N, r_j = j\Delta r, \\ \rightarrow \\ j = 0, M, t^k = k\Delta t, k = 1, 2 \end{array} \right\}.$$

Пространственная дискретизация уравнений осуществлялась методом конечных объемов, описанным в работе С. Патанкара [1].

Расчетная область разбивалась на конечное число непересекающихся объемов так, что в каждом объеме содержался только один узел сетки. Все дискретные аналоги были построены с использованием равномерной, фиксированной, шахматной сетки, компоненты скорости на которой рассчитываются на гранях контрольных объемов, а значения давления и температуры – в узловых точках (рис. 2). Дискретные аналоги получены путем интегрирования соответствующих уравнений по конечному объему.

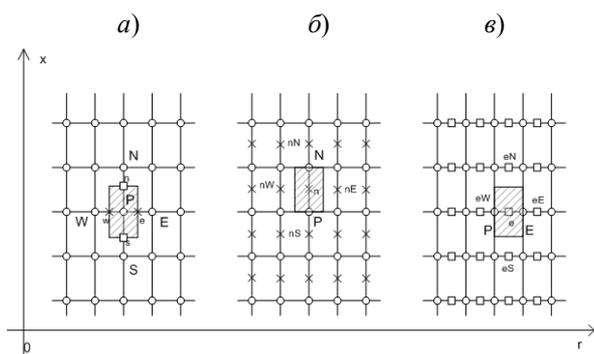


Рис. 2. Шахматная сетка с конечными объемами: а) для температуры и давления; б) для компоненты скорости  $u$ ; в) для компоненты скорости  $v$

Временная сетка строилась с шагом по времени  $\Delta t$ . При дискретизации по времени использовалась полностью неявная схема.

Для коррекции полей давления и скоростей применялся метод нижней релаксации.

Для расчета процесса за основу взят алгоритм SIMPLER [1], который был модифицирован исходя из особенностей решаемой задачи и физических соображений. Так как значения температуры, скорости и других величин, рассчитываемых в верхней части слитка, мало влияют на значения этих же величин в нижней его части, то не рационально задавать начальное приближение и просчитывать поле течения сразу по всему продольному сечению слитка, как это осуществляется в алгоритме SIMPLER. Было предложено задавать начальное значение величин на первом сеточном горизонтальном слое (первый сеточный слой совпадает с верхней границей кристаллизатора), пересчитывать их до тех пор, пока не будет выполнено условие сходимости, а затем переносить информацию на следующий горизонтальный слой. Таким образом, полученные значения будут выступать в качестве начального приближения для расчета значений величин на следующем слое. Такая процедура проводится до последнего слоя, а затем проверяется условие сходимости уже по всему слитку. В результате информация будет передаваться постепенно сверху вниз (вертикально), с текущего слоя на следующий, по направлению движения расплава, исходя из физических особенностей процесса. В качестве алгоритма

решения задачи предлагается следующая последовательность действий:

1. Вводится начальное предположение о полях скорости, давления, температуры и других величин на первой сеточной горизонтальной координатной линии.

2. Фиксируется первая сеточная линия  $i = 1$  ( $i$  – счётчик сеточных координатных линий по горизонтали).

3. Рассчитывается поле скорости и давления.

4. Решается уравнение теплопроводности.

5. Проверяется условие сходимости. Если оно выполнено, то переход к п. 7, иначе – к п. 3.

6. Полученная информация переносится на следующую сеточную линию:  $i = i + 1$ .

7. Если сеточная линия последняя, то переход к п. 8, иначе – к п. 3.

8. Осуществляется проверка условия сходимости по всему слитку. Если оно выполнено, то вывод результатов расчета – значений основных величин в каждой узловой точке сетки, – в противном случае переход к пункту 2.

Данная процедура позволяет увеличить скорость сходимости и сэкономить временные затраты.

Для проверки работы алгоритма разработан программный комплекс «Моделирование нестационарных процессов непрерывного литья цветных металлов и их сплавов» [4]. Используя [4] была решена поставленная выше задача (1) – (11) для следующих исходных данных: литье алюминиевой заготовки,  $R = 0,195$  м,  $L = 1$  м,  $L_{кр} = 0,8$  м,  $T_{окр} = 295$  К,  $T_{распл} = 950$  К.

Адекватность математической модели и предложенного метода подтверждена выполнением условия адекватности по критерию Фишера ( $F > F_{0,95}^{табл}$ ) для параметра  $H_z$  – глубина зоны затвердевания (определяется как максимальное расстояние от верхнего края кристаллизатора до границы затвердевшего металла), расчет которого осуществляется в программном комплексе [5], а экспериментальные значения были взяты из [6].

Исследовалась скорость сходимости при решении задачи (1) – (11) с использованием алгоритма SIMPLER и с использованием его предложенной модификации (рис. 3).

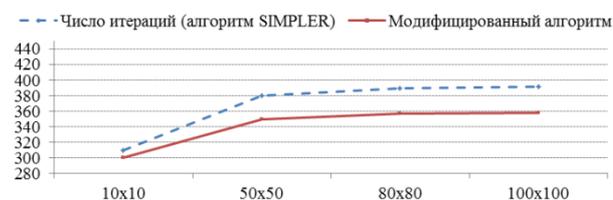


Рис. 3. Зависимость скорости сходимости от размера сетки

Как видно из графика (рис. 3) модификация алгоритма, которая предполагает последовательный перенос рассчитанных значений величин от текущего горизонтального слоя к следующему слою

и использование этих значений в качестве начального приближения для расчета новых значений позволяет увеличить скорость сходимости за счет уменьшения числа итераций. Исходя из вышесказанного, данный модифицированный метод целесообразно применять при решении задач моделирования процессов непрерывного литья цветных металлов. Предложенная модификация будет уместной и для моделирования теплогидродинамики процесса горизонтального литья металлов. В качестве первой сеточной линии, на которой задается начальное приближение, будет выступать вертикальная линия, совпадающая с той границей, начиная от которой идет движение расплава. Далее информации о значениях величин будет передаваться горизонтально от слоя к слою по направлению вытягивания слитка.

3. Выводы. В работе была предложена модификация алгоритма SIMPLER применительно к решению системы определяющих уравнений, описывающих процесс непрерывного литья цилиндрических заготовок из цветных металлов. Было установлено, что предложенная модификация метода увеличивает скорость сходимости, следовательно, возможно ее применение для конструирования и расчета процессов непрерывного вертикального литья.

Тверской государственный технический университет

## **A MODIFICATION OF THE SIMPLER ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF MODELING THE PROCESS OF CONTINUOUS CASTING OF NON-FERROUS METALS**

**E.E. Fomina, N.K. Zhiganov**

The article describes a mathematical model of the process of continuous vertical casting of cylindrical billets of non-ferrous metals. To solve the system of governing equations of casting was suggested the modification of the SIMPLER algorithm, which allows to increase the convergence rate of the method

Key words: mathematical modeling, metal casting

### Литература

1. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]/ С. Патанкар. М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152 с.
2. Есаулов, А.Н. О маршевом методе решения уравнений Навье-Стокса на многопроцессорных вычислительных системах [Текст]/ А.О. Есаулов, А.В. Старченко // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: Труды Всероссийской научной конференции (22-27 сентября 2008 г., г. Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 338-341.
3. Мартыненко, С.И. Совершенствование вычислительных алгоритмов для решения уравнений Навье-Стокса на структурированных сетках [Текст]/ С. И. Мартыненко. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки", №2, 2008. С. 78-94.
4. «Моделирование и оптимизация процессов получения кристаллических заготовок из цветных металлов методами непрерывного литья». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013616906 от 25 июля 2013 г.
5. Моделирование и оптимизация процессов дискретно-непрерывного литья цветных металлов и их сплавов: монография [Текст] / Н.К. Жиганов, И.Н. Вольнов, Е.Е. Фомина, А.Н. Жиганов. Тверской государственный технический университет, 2009. - 107 с.
6. Добаткин, В.И. Непрерывное литье и литейные свойства сплавов [Текст]/ В.И. Добаткин. ОБОРОНГИЗ, 1948. - 154 с.

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЛЕЧЕНИЯ ОСТРОГО ПИЕЛОНЕФРИТА НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

А.А. Спирычин, Д.Е. Строева, А.В. Бурковский, А.В. Кузьменко

В статье описывается алгоритмизация принятия решений в процессе лечения острого пиелонефрита на основе метода анализа иерархий

Ключевые слова: алгоритмизация, метод анализа иерархий, принятие решений, пиелонефрит

### Введение

Ниже рассматривается алгоритм принятия решений в процессе лечения острого пиелонефрита, предназначенный для ранжирования методик лечения по степени их эффективности, который является частью интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений [1] в условиях выбора тактики лечения хронических заболеваний на основе облачных технологий [2].

Пиелонефрит – это неспецифический инфекционно-воспалительный процесс, в который вовлекается собирательная система и паренхима почки.

Острый пиелонефрит - потенциально опасное для жизни заболевание. Неверный диагноз и несвоевременное лечение могут привести к сепсису, септическому шоку, почечной недостаточности, летальному исходу. Течение этого заболевания усугубляется его осложнениями: бактериотоксический шок и в 10,3% случаев развивается сепсис, в 42,1% - нарушением функциональной способности почек [3]. При генерализации инфекции и развитии уросепсиса летальность достигает 80% [4].

### Метода анализа иерархий

Метод анализа иерархий предполагает реализацию системного подхода с использованием математических инструментов для решения конкретной сложной задачи [5]. Он требует выделения всех факторов для оценки альтернатив, сравнения относительной значимости каждого фактора в ходе попарного сравнения по шкале относительной важности Саати, нормирования всех числовых значений факторов для расчёта значения приоритета для каждой альтернативы. Альтернатива с максимальным значением приоритета и является

самой эффективной с точки зрения лица, принимающего решения. Стоит отметить, что данный метод интересен тем, что позволяет формализовать процесс принятия решений конкретным ЛППР для лечения конкретного заболевания, в том числе острого пиелонефрита.

### Исходные данные

Предлагаемый алгоритм предполагает предварительный сбор информации о выделенных факторах, о результатах попарного сравнения этих факторов, о количественных физиологических показателях и о показателях здорового человека. На основе этих данных алгоритм нормирует значения показателей и осуществляет итеративные вычисления для поиска значения приоритета для каждой альтернативы с заданной точностью вычислений.

Ниже приведены методики, положенные в основу данного алгоритма, а также ограничения в процессе сбора медицинской информации при лечении острого пиелонефрита.

Критерием исключения из исследования больных с острым пиелонефритом стали наличие сопутствующей острой и хронической патологии, в том числе нефрологического происхождения, беременности и лактации, отягощенного аллергологического анамнеза, ожирения, сахарный диабет, возраста старше 60 лет.

Диагноз у пациентов был подтвержден амнестическими данными, данными объективного обследования, результатами лабораторных (общеклинических и биохимических) и инструментальных методов исследования.

Пациенты были распределены на 3 группы по 30 человек. В контрольной группе проводилась только стандартная терапия острого серозного пиелонефрита. Медикаментозная терапия проводилась на основании клинических рекомендаций по урологии. В неё входили: антибактериальная, спазмолитическая и противовоспалительная, дезинтоксикационная терапии.

Во второй группе стандартная терапия сочеталась с фототерапией (использованием аппарата «Светозар»), проводившейся в минимальные пики психоэмоциональной и физиологической активности организма.

---

Спирычин Александр Александрович – ВГТУ, аспирант, e-mail: spirjachin@rambler.ru  
Строева Дарья Евгеньевна - ВГМУ им. Н.Н. Бурденко, аспирант, e-mail: dasha-cowboy@mail.ru  
Бурковский Александр Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: bav@vorstu.ru  
Кузьменко Андрей Владимирович - ВГМУ им. Н.Н. Бурденко, д-р мед. наук, профессор, e-mail: kuzmenkoav09@yandex.ru

В третьей группе проводили стандартную терапию пиелонефрита с фототерапией в максимальные пики повышения психоэмоциональной и физиологической активности организма.

Данные пики были определены с помощью компьютерного комплекса для оценки функционального состояния организма человека «Динамика» [6].

Лечебные эффекты модулированного светового излучения широко используется в стоматологии, оториноларингологии, гнойной хирургии и других областях медицины [7]. Доказано, что воздействие низкоинтенсивного светового излучения с мощностью, не превышающей 100мВт/см<sup>2</sup>, улучшает реологические, гемостатические свойства крови и ее микроциркуляцию в очаге поражения; активирует репаративные процессы в тканях; оказывает антибактериальный эффект [8].

В последние годы существенно возрос научный и практический интерес к проблеме ритмической организации функционального состояния организма, как в норме, так и при патологии [9].

Знания о закономерностях биоритмов используют в лечении заболеваний человека (хрономедицина) [10].

Известно, что все процессы в живой природе, а значит и в организме человека подчинены определенным ритмам [11].

В процессе тестирования алгоритма в качестве исходных данных использовались данные, полученные в ходе лечения острого пиелонефрита. Основу данных составляют индивидуальные физиологические показатели пациента на каждом этапе лечения [12].

Лечение проводилось в утренние часы в одно и то же время, экспозиция - 5 минут, количество процедур - 10. Множество показателей фиксировались трижды за период лечения: первые сутки, третьи-пятые сутки и девятые-десятые сутки лечения.

### Критерии оценки альтернатив

Всего было выделено и зафиксировано 29 видов физиологических показателей, в том числе и лабораторных показателей по каждому сгруппированному пациенту. Среди них лейкоциты мочи, лейкоциты крови, гемоглобин крови, эритроциты крови, мочевины, креатинин и другие. Экспертом были произведены попарные сравнения всех 29 показателей и сведены в таблицу. Пример части этих данных представлен в таблице:

	Лейкоциты мочи	Лейкоциты крови	Гемоглобин крови	Эритроциты крови	Мочевина	Креатинин
Лейкоциты мочи	1	1\5	0	0	0	0
Лейкоциты крови	5	1	5	5	0	0
Гемоглобин крови	0	1\5	1	1	0	0
Эритроциты крови	0	1\5	1	1	0	0
Мочевина	0	0	0	0	1	0
Креатинин	0	0	0	0	0	1

### Алгоритмизация

Нормировка значений критериев, средних для группы, производится по следующей формуле:

$$a_i^{нов} = \frac{a_i^{стар} - a_i^{мин}}{a_i^{max} - a_i^{мин}}, \quad (1)$$

где  $a_i^{стар}$  - среднее значение критерия в группе,  $a_i^{мин}$  - показатель здорового человека,  $a_i^{max}$  - худший показатель из всех 90 случаев.

Введём в рассмотрение матрицу парных сравнений  $B$ , а также  $W$  - вектор весов.

Тогда алгоритм расчёта вектора  $W$  является итерационным и включает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Положить номер итерации:

$$k=0 \quad (2)$$

Шаг 2. Положить:

$$p^0 = \pi^0 = (1)_n \quad (3)$$

Шаг 3. Задать:

$$\varepsilon > 0 \quad (4)$$

Шаг 4. Положить:

$$k = k+1 \quad (5)$$

Шаг 5. Вычислить:

$$p^k = B \times p^{(k-1)} \quad (6)$$

Шаг 6. Вычислить  $\pi^k$  - вектор из относительных значений по правилу:

$$\forall_i \pi_i^k = \frac{p_i^k}{\sum_{j=1}^n p_j^k} \quad (7)$$

Шаг 7. Проверить условие:

$$\forall_i = \overline{1, n} \left( |\pi_i^k - \pi_i^{k-1}| \leq \varepsilon \right) \quad (8)$$

Если оно выполняется, то вектор весов

$$\omega = \pi^k, \quad (9)$$

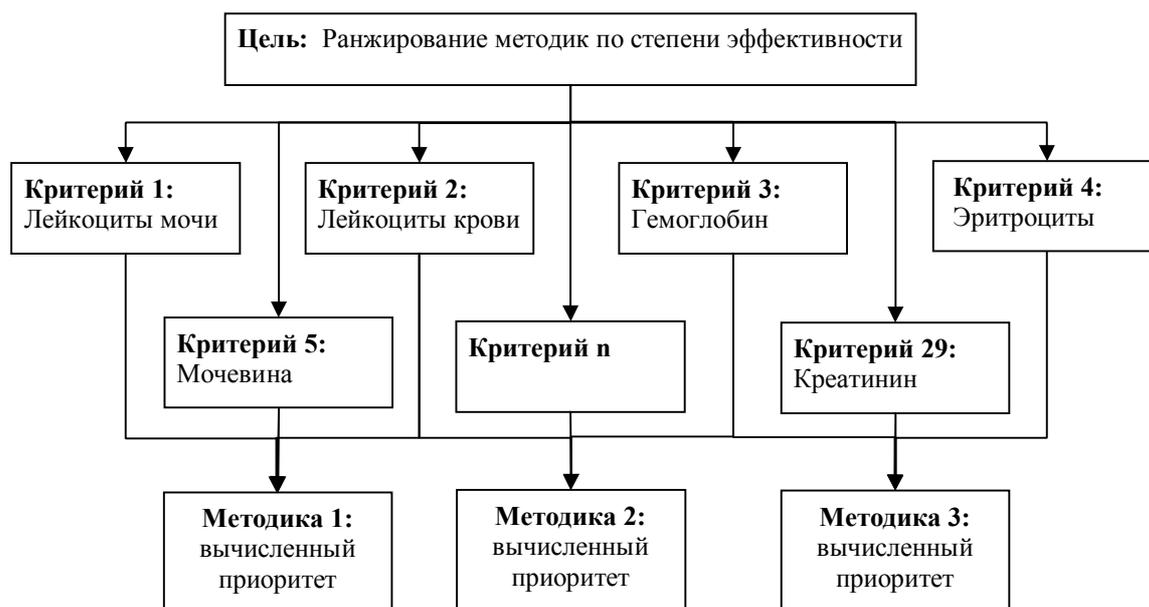
то есть искомый вектор сформирован, иначе – перейти к шагу 4.

После того, как искомый вектор сформирован, необходимо выполнить аддитивную свёртку показателей по формуле:

$$F(\omega, A) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot a_i \quad (10)$$

После вычисления аддитивной свёртки, результатом которого является значение приоритета, необходимо отсортировать список альтернатив по убыванию значений приоритета.

На рисунке представлена иерархическая структура, соответствующая поставленной задаче ранжирования методик лечения пиелонефрита по степени их эффективности:



### Заключение

Таким образом, на основе сформированных приоритетов для каждой методики ЛПР предоставляется информация о наиболее эффективных альтернативах – методах лечения пиелонефрита.

### Литература

1. Спиричин А.А. Анализ эффективности использования метода нечёткой классификации и генетических алгоритмов в интеллектуальной системе

поддержки принятия врачебных решений [Текст] / А.А. Спиричин, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - №2 - С. 45-48.

2. Спиричин А.А. Интеллектуальная система принятия решений в условиях выбора тактики лечения хронических заболеваний на основе облачных технологий [Текст] / А.А. Спиричин, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - №5-1 - С. 57-60.

3. Интегративная урология. Руководство для врачей / под ред. П.В. Глыбочко, Ю.Г. Аляева.- М.: «Медфорум», 2014. - 432 с.

4. Заболевания мочеполовых органов: справ. для практ. врачей / Ю.Г. Аляев [и др.] // Под ред. Ю.Г. Аляева. – Москва: Литтерра, 2007. – 118 с.

5. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.

6. Строева Д.Е., Кузьменко А.В., Кузьменко В.В., Курносова Н.В., Куташов В.А., Попов Д.В. Особенности психо-эмоционального статуса больных серозным необструктивным пиелонефритом // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание / Тула: Издательство: Тульский государственный университет, 2013, №1, С. 255

7. Применение низкоинтенсивных лазеров в клинической практике / под. Ред. О. К. Скобелкина. – М., 1997.

8. Лукьянович П.А., Кунин А.А и соавт. Механизм действия и терапевтические эффекты модулированного светового излучения, 2009.

9. Романов Ю. А. От хронобиологии к хронотопобиологии / Ю. А. Романов // Вестник Рос. АМН, 2006, № 8. С. 8-11.

10. Романов Ю.А. Проблемы хронобиологии. / Ю.А.Романов- М.: Знание, 1989.-С.-64.

11. Агаджанян Н.А. Нормальная физиология / Н.А. Агаджанян, В.М. Смирнов. - М.: «Медицинское информационное агентство», 2007.- С 520

12. Фототерапия в комплексном лечении острого серозного необструктивного пиелонефрита [Текст] / Д.Е. Строева, А.В. Кузьменко, В.В. Кузьменко, Н.В. Курносова, В.А. Куташов, Д.В. Попов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2015. – Т. 14, №1. - С. 75-78

Воронежский государственный технический университет

Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко

## **ALGORITHMIZATION OF DECISION-MAKING DURING TREATMENT OF ACUTE PYELONEPHRITIS BASED ON ANALYTIC HIERARCHY PROCESS**

**A.A. Spirychin, D.E. Stroeve, A.V. Burkovsky, A.V. Kuzmenko**

The article describes algorithmization of decision-making during treatment of acute pyelonephritis based on analytic hierarchy process

Key words: algorithmization, analytic hierarchy process, decision-making, pyelonephritis

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕТИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Д.В. Макаров, В.Л. Бурковский

В статье рассматриваются модели анализа характеристик неоднородной замкнутой сети массового обслуживания (СеМО) с вероятностями перехода, зависящими от состояния сети. Предложен алгоритм, позволяющий формировать СеМО распределенной информационной системы с использованием моделей ее элементов

Ключевые слова: структурная модель, математическая модель, сеть массового обслуживания, узел обработки транзакций, СеМО

### Введение

Математическая модель распределенной информационной системы в формате сети массового обслуживания (СеМО) 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. 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.

### Описание модели СеМО

Рассмотрим некоторый узел СеМО. Интенсивность обслуживания обозначим  $\mu$ , а интенсивность пуассоновского входящего потока

заявок  $\lambda$ . Внутренняя архитектура узла такова, что внутри него происходит обслуживание заявок, находящихся на более низком уровне. То есть в рамках обработки одной заявки, находящейся в составе узла, происходит обработка нескольких заявок внутри него (рис. 1). Обработка заявок производится внутри узла. 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.

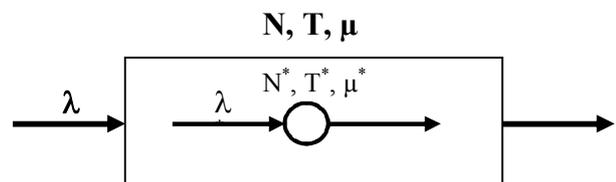


Рис. 1. Структурная модель устройства обработки заявок

Через интенсивность обслуживания и интенсивность входного потока можно выразить такие характеристики системы как среднее время обслуживания  $T$  и среднюю длину очереди  $N$ .

$$N = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\mu(1 - \rho)} = \frac{1}{(\mu - \lambda)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - загрузка (утилизация)  $\rho = \lambda/\mu$ .

Рассмотрим узел, структура которого приведена на рис. 2.

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.

Макаров Дмитрий Викторович – ВГТУ, начальник отдела ИСК, e-mail: makarov@otonit.vorstu.ru  
Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

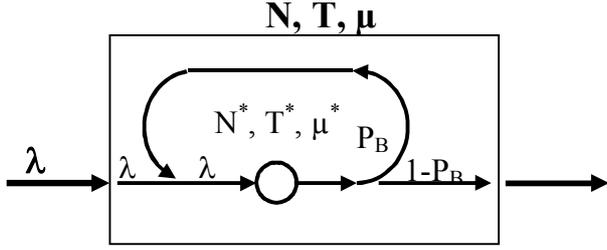


Рис. 2. Структурная модель эквивалентного узла

Через значение интенсивности потока  $\lambda$ , входящего в узел, можно выразить значение интенсивности внутреннего потока  $\lambda^*$  и на основе этого составить уравнение. Интенсивность потока, который отправлен на повторное обслуживание, получаем равной  $P_B \lambda^*$ . Следовательно, интенсивность входного потока получаем равной

$$\lambda = \lambda^* (1 - P_B),$$

а внутреннего потока:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{(1 - P_B)}. \quad (3)$$

Для времени обслуживания каждой заявки внутри узла получаем следующее выражение:

$$T' = \frac{1}{(\mu^* - \lambda^*)}. \quad (4)$$

Подставляя в (3) выражение (4) получим:

$$T' = \frac{1}{\left( \mu^* - \frac{\lambda}{(1 - P_B)} \right)} = \frac{1 - P_B}{\mu^* (1 - P_B) - \lambda}. \quad (5)$$

Через время обслуживания заявки во внутреннем узле обслуживания выразим общее время пребывания заявки в узле. После того как заявка будет обслужена во внутреннем узле она покидает узел с вероятностью  $1 - P_B$  или с вероятностью  $P_B$  возвращается в начало очереди, после чего с вероятностью  $1 - P_B$  может покинуть устройство обработки транзакций и т.д. Из этого следует, что вероятность того, что заявка  $n$  раз получит обслуживание внутренним устройством, перед тем как покинуть узел, равна

$$P(n) = (1 - P_B) P_B^{n-1}. \quad (6)$$

Количество обслуживаний заявки внутренним устройством имеет прямую зависимость от времени обслуживания. Время обслуживания равно  $T'n$ . Среднее время обслуживания в этом случае равно

$$T^* = \sum_{n=1}^{\infty} n T' P(n) = T' \sum_{n=1}^{\infty} n (1 - P_B) P_B^{n-1} = (1 - P_B) T' \sum_{n=1}^{\infty} n P_B^{n-1}. \quad (7)$$

Определим далее сумму ряда:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{n=1}^{\infty} n q^{n-1} = 1 + 2q + 3q^2 + \dots + nq^{n-1} = \\ &= (1 + q + q^2 + \dots + q^n) + q(1 + q + q^2 + \dots + q^n) + q^2(1 + q + q^2 + \dots + q^n) = \\ &= (1 + q + q^2 + \dots + q^n) \cdot (1 + q + q^2 + \dots + q^n) = \left( \sum_{n=1}^{\infty} q^n \right) \cdot \left( \sum_{n=1}^{\infty} q^n \right) = \\ &= \frac{1}{1 - q} \cdot \frac{1}{1 - q} = \frac{1}{(1 - q)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Полученный ряд представлен произведением двух бесконечно убывающих (при  $0 < q < 1$ ) геометрических прогрессий. Используя результат, полученный в (8) и преобразуя (7) получим:

$$T^* = (1 - P_B) T' \sum_{n=1}^{\infty} n P_B^{n-1} = (1 - P_B) T' \frac{1}{(1 - P_B)^2} = \frac{T'}{(1 - P_B)}. \quad (9)$$

Подставляя (4) в (9), определим среднюю длительность обслуживания узла с рассматриваемой структурой:

$$T^* = \frac{1 - P_B}{\mu^* (1 - P_B) - \lambda} \cdot \frac{1}{(1 - P_B)} = \frac{1}{\mu^* (1 - P_B) - \lambda}. \quad (10)$$

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. Из равенств (2) и (10) вычислим вероятность перехода на повторное обслуживание:

$$\begin{aligned} T &= T^*, \\ \frac{1}{\mu - \lambda} &= \frac{1}{\mu^* (1 - P_B) - \lambda}. \end{aligned}$$

Значение вероятности перехода на повторное обслуживание можно выразить через значения интенсивности входящего и внутреннего потоков. В результате получаем:

$$P_B = \frac{\mu^* - \mu}{\mu^*}, \quad (11)$$

$$P_B = \frac{\lambda^* - \lambda}{\lambda^*}. \quad (12)$$

Выразим вероятность повторного перехода через интенсивности потока входящих заявок  $\lambda$  и интенсивность потока во внутренний центр обслуживания. При этом искомую вероятность можно вычислить по формуле (12). При этом интенсивность обслуживания в исходном и измененном узле связаны выражением:

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 - P_B}. \quad (13)$$

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. Проверим выполнение этого условия. Определим  $N^*$  по формуле:

$$N^* = \frac{\lambda^*}{\mu^* - \lambda^*}. \quad (14)$$

Подставим в выражение для интенсивности входного потока уравнение (3) и выражение для интенсивности обслуживания, полученное из (11), будем иметь:

$$N^* = \frac{\frac{\lambda}{(1 - P_B)}}{\frac{\mu}{(1 - P_B)} - \frac{\lambda}{(1 - P_B)}} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = N. \quad (15)$$

Из полученного выражения следует, что

количество заявок внутри устройства обработки транзакций остается неизменным. Можно так же 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  $P_{Bii}$ .

Иначе, если в преобразованной матрице вероятностей переходов заменить  $i$ -й узел, то все элементы  $i$ -го столбца будут умножены на коэффициент  $(1-P_{Bii})$ , а  $P_{ii}$  будет равным  $P_{Bii}$ :

$$|P^*| = \begin{vmatrix} P_{11} & \dots & P_{i1}(1-P_{Bii}) & \dots & P_{N1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & P_{N2} \\ P_{1i} & \dots & P_{Bii} & \dots & P_{Ni} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{1N} & \dots & P_{iN}(1-P_{Bii}) & \dots & P_{NN} \end{vmatrix} \quad (16)$$

Вероятности переходов входят в формулы в качестве коэффициентов  $x_i = e_i / \mu_i$  и в явном виде не участвуют в формулах для вычисления основных характеристик СеМО. В этом случае  $\mu_i$  - интенсивность обслуживания в узле  $e_i$  и вычисляется из системы уравнений (17):

$$\sum_{i=1}^N e_i P_{ij} = e_j, j = \overline{1, N}. \quad (17)$$

Если для СеМО не производить замену одного элемента системы уравнений (учитывая, что  $P_{ii}=0$ ), то она имеет вид:

$$\begin{cases} e_1(P_{11}-1) & +e_2P_{21} & \dots & +e_iP_{i1} & \dots & +e_NP_{N1} \\ e_1P_{12} & +e_2(P_{22}-1) & \dots & +e_iP_{i2} & \dots & +e_NP_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_1P_{1i} & +e_2P_{2i} & \dots & +e_i(0-1) & \dots & +e_NP_{Ni} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{cases} \quad (18)$$

Подставим в (18) преобразованную матрицу

вероятностей переходов (16), тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} e_1^*(P_{11}-1) & +e_2^*P_{21} & \dots & +e_i^*P_{i1}(1-P_{Bii}) & \dots & +e_N^*P_{N1} \\ e_1^*P_{12} & +e_2^*(P_{22}-1) & \dots & +e_i^*P_{i2}(1-P_{Bii}) & \dots & +e_N^*P_{N2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_1^*P_{1i} & +e_2^*P_{2i} & \dots & +e_i^*(P_{Bii}-1) & \dots & +e_N^*P_{Ni} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{cases} \quad (19)$$

Из вышеизложенного следует, что система уравнений (19) может быть получена из системы уравнений (18) умножением  $i$ -го столбца на множитель  $(1-P_{Bii})$ . Преобразование такого вида неизменно приведет к изменению решения системы уравнений. Коэффициент  $e_i^*$  будет определять отличие полученного решения от решения системы исходной СеМО:

$$e_i^* = e_i / (1 - P_{Bii}). \quad (20)$$

Вычислим динамические изменения коэффициентов  $x_i$ . В измененной системе коэффициент  $x_i^*$  будет равен:

$$x_i^* = \frac{e_i^*}{\mu_i}. \quad (21)$$

Подставим в (21) выражения (13) и (20), имеем:

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

Из вышесказанного можно сделать вывод, что если заменить элемент СеМО по предложенной схеме, то не произойдет изменение 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.

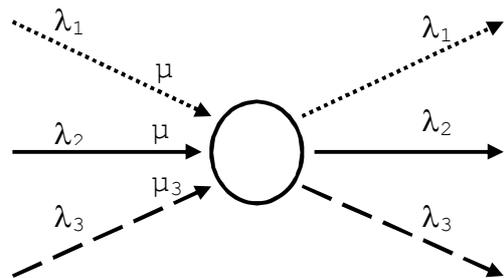


Рис. 3. Устройство обслуживания с несколькими классами заявок

В качестве примера приведем узел, в который поступает  $n$  потоков заявок, которые имеют интенсивности  $\lambda_i$  и интенсивности обслуживания  $\mu_i$ ,  $i=(1,n)$ . Устройство обработки нескольких классов заявок представлено на рис. 3.

Для преобразованного узла выберем такое значение интенсивности обслуживания, чтобы оно было больше или равно наибольшему значению интенсивности обслуживания для заявок всех классов. Рассчитаем вероятности возможности повторного обслуживания по формуле (12), на основе полученных расчетов заменим узел эквивалентным ему. В этом случае получим структуру преобразованного узла, вид которого показан на рисунке 4.

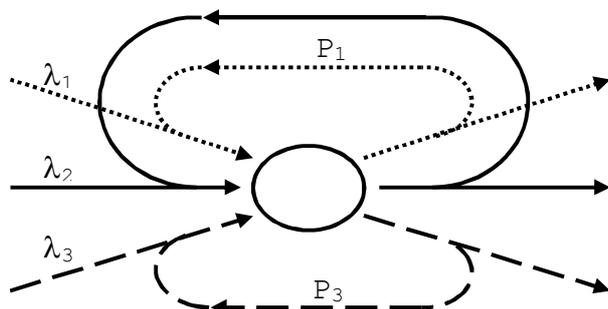


Рис. 4. Преобразованный узел с несколькими классами заявок

#### Выводы

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 применимого 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.

#### Литература

1. Кирпичников, А.П. Прикладная теория массового обслуживания [Текст] / А. П. Кирпичников. – Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2008. – 118 с.
2. Штоян, Д. Качественные свойства и оценки стохастических моделей [Текст] / Д. Штоян. - М.: Мир, 1979. – 162 с.
3. Шварц, М. Сети ЭВМ. Анализ и проектирование [Текст] / М. Шварц. - М.: Радио и связь, 1981. – 336 с.
4. Бурковский, В.Л. Моделирование и анализ распределенных распределенных систем обработки информации [Текст] : монография / В.Л. Бурковский, А.Е. Соколов. - Воронеж : ВГТУ, 2002. – 148с.
5. Смолко, А.Е. Алгоритмизация задачи высоконадежного функционирования распределенных информационных систем управления [Текст] / А.Е. Смолко, В.Л. Бурковский // Современные проблемы информатизации: Тез. докл. IV Междунар. электронной науч. конф. Воронеж, 1999. – С.170.
6. Соколов, А.Е. Метод преобразования стохастической модели системы обработки информации для применения эффективных алгоритмов анализа [Текст] / А.Е. Соколов, В.Л. Бурковский // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: сб. науч. тр. VI Междунар. открытой науч. конф. Воронеж, 2001. –С.79.
7. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей [Текст] / В.М. Вишневецкий. – М.: Техносфера, 2004. – 512с.
8. Соколов А.Е. Повышение отказоустойчивости современных распределенных систем обработки информации [Текст] / А.Е. Соколов, В.Л. Бурковский // Современные проблемы информатизации в непромышленной сфере и экономике: Сб. науч. тр. V Междунар. электронной науч. конф. Воронеж, 2000. – С.131.
9. Соколов, А.Е. Проблемы алгоритмизации формирования отказоустойчивых структур распределенной системы управления [Текст] / А.Е. Соколов, В.Л. Бурковский // Информационные технологии моделирования и управления: Межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 1999. –С.48–54.

Воронежский государственный технический университет

## MODELLING OF THE DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM ON THE BASIS OF QUEUEING NETWORK

D.V. Makarov, V.L. Burkovsky

The article deals with the analysis of the characteristics of inhomogeneous closed queueing network with the transition probabilities, depending on network conditions. The algorithm allowing to form queueing network of the distributed information system with use of models of its elements is offered

Key words: structural model, a mathematical model, queueing network, transaction processing unit

**ФУНКЦИОНАЛЬНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
СИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ**

**В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд**

В статье рассматривается функционально-алгоритмическая организация современных систем регионального энергопотребления и оптимизация их параметров

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оптовый рынок электроэнергии и мощности, алгоритмы оптимизации

Исторически так сложилось, что электроэнергетические системы (ЭЭС) в нашей стране были организованы по принципу монопольных структур, имеющих вертикальную систему планового управления [1,2]. При этом, все затраты в электроэнергетике учитывались в регулируемых тарифах, в которых были заложены и учтены все процессы (строительство объектов генерации, распределительных сетей, транспортно-заготовительные, топливные и прочие расходы). Фактически тарифы выполняли исключительно расчётную задачу по балансировке межотраслевых направлений в рамках плановой экономической модели.

С прекращением функционирования планового народного хозяйства остро встал вопрос распределения затрат между различными группами ЭЭС в России. Прежняя организация в новых условиях не позволяла вести учёт затрат никаким иным образом, как только посредством «единого котла». При этом, как показал опыт [3,4], инвестиционная привлекательность отрасли являлась крайне низкой, так как требовала от владельцев капитала вложений в достаточно непрозрачную структуру. Устаревание материально-технической базы во всех элементах ЭЭС только усугубляло низкую степень привлекательности отрасли. С другой стороны, государство, с переходом к свободной экономике уже не могло единолично обеспечивать ЭЭС, так как смежные отрасли (транспорт, добыча полезных ископаемых) были отданы в частные руки, а, следовательно, не могли как прежде участвовать в едином балансе, позволяющем покрыть все затраты.

В итоге сложилась ситуация, когда необходимо было привлечение в ЭЭС частных капиталом (с сохранением руководящей роли государства – в силу стратегической важности рассматриваемого направления экономики).

Такая ситуация требовала детальной привязки всех видов затрат в ЭЭС к конкретному сегменту. С целью достижения указанной задачи по повышению привлекательности капиталовложений в отрасль, было решено произвести декомпозицию единой системы на блоки, технологически слабо зависящие друг от друга: генерация, транспорт (магистральные и распределительные сети), сбыт электроэнергии. При этом, для каждого направления был применён свой собственный тариф.

Важным этапом на пути к решению поставленной задачи является запуск оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) 1 сентября 2006 года. В рамках данного финансово – административного образования появилась конкуренция между различными субъектами оптового рынка (в первую очередь, между объектами генерации), и наблюдается повышение привлекательности для капиталовложений в эти сферы.

Ценовая модель ОРЭМ включает в себя следующие виды рынков:

- регулируемые договоры;
- «на сутки вперёд»;
- балансирующий;
- мощности;
- системных услуг.

Регулируемые договоры (РД) заключаются только в отношении объемов электроэнергии и мощности, предназначенных для поставок населению, приравненным к населению группам потребителей, а также гарантирующим поставщикам, контролируемым МРСК Северного Кавказа.

Рынок «на сутки вперёд» (РСВ) представляет собой модель конкурентного отбора заявок генераторов и потребителей электроэнер-

---

Крысанов Валерий Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-920-228-56-06, e-mail: sovteh2000@mail.ru  
Руцков Алексей Леонидович - ВГТУ, аспирант, тел. 8-952-540-98-89, e-mail: alex\_8\_90@mail.ru  
Шукур Омар Шукур Махмуд - ВГТУ, аспирант, e-mail: shukurmakhmud@mail.ru

гии, производимый, как следует из названия, на дискрет времени одни сутки (т.е. на промежутки  $X+1$ ,  $X$  – текущие сутки).

Балансирующий рынок (БР) является внутрисуточным аукционом ценовых заявок генерации и потребителей, не отобранных в рамках РСВ. РСВ и БР являются нерегулируемыми (в них участники рынка самостоятельно определяют посредников, цены и объёмы поставок).

Рынок мощности предоставляет участнику оптового рынка особый вид ресурса – величину мощности, постоянно доступную при заключении договоров на соответствующем рынке.

Рынок системных услуг – оказание СО услуг по диспетчерскому управлению и поддержанию заданных параметров электроэнергии, передаваемой потребителям.

В непосредственном управлении ОРЭМ участвуют СО ЕЭС (осуществление диспетчерского управления и выборки заявок для участия в аукционах), некоммерческое партнёрство – администратор торговой сети – НП «АТС» (осуществление регулирования финансовых потоков и выборки заявок для участия в аукционах), Федеральная служба по тарифам (установление тарифов по РД).

Обобщённая структурная схема ОРЭМ представлена на рис. 1.

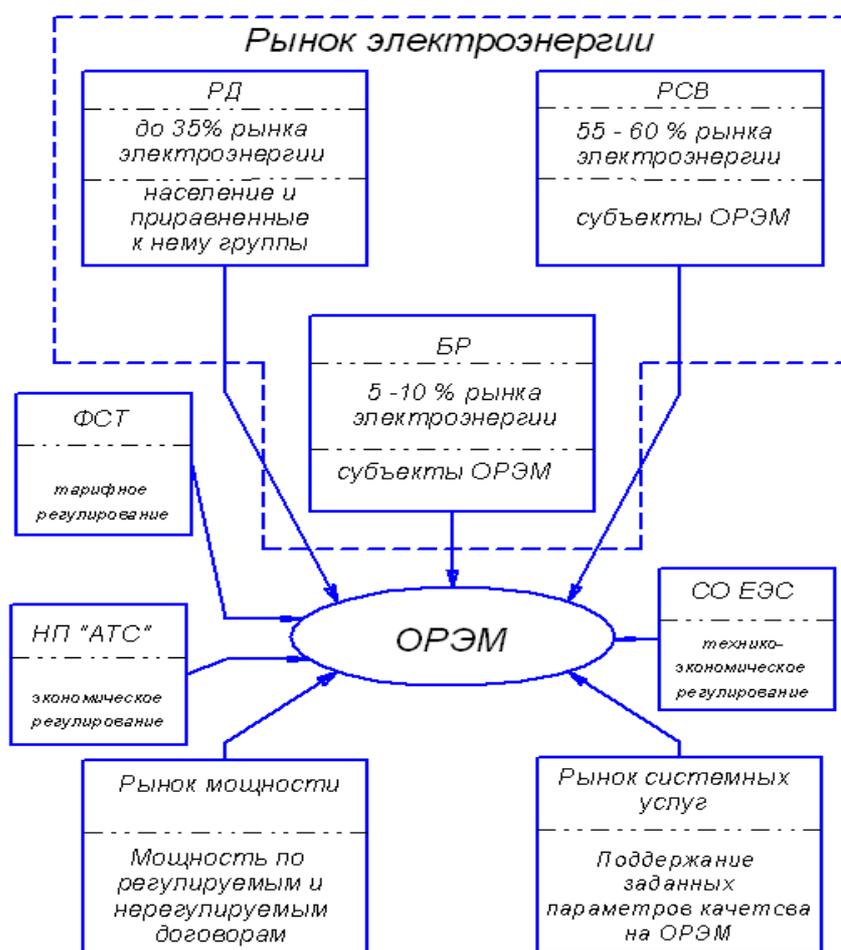


Рис. 1. Обобщённая структурная схема ценовой модели ОРЭМ

Региональные системы энергопотребления включены в единую структуру и подчинены описанным выше экономическим стимулам, являющимся основами для их функционирования.

Построение подобных ЭЭС является иерархическим и многоуровневым. Функцио-

нирование такого объединения возможно только посредством координирующих элементов в рамках диспетчерского управления. Основным понятием, в этом случае, будет являться понятие о координации. Под координированием понимается управляющее воздействие вышестоящих иерархических систем на нижестоящие,

имеющее своей целью достижение оптимальных законов регулирования на системном (подсистемном) уровне. При этом, задачи, решаемые на двух смежных уровнях ( $k-m$  и  $(k+1)-om$ ) являются задачей координатора на  $(k+1)-om$  уровне и задачи подсистем управления на  $k-m$  уровне.

В общем случае вопрос координации можно представить в следующем виде:

$$(\exists \gamma)(\exists x)[P(x, \bar{D}(\gamma)) \text{ и } P(\gamma, D)] \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  - координирующее воздействие;

$D$  - обобщённая задача координатора;  $\bar{D}(\gamma)$  - вектор задач, решаемых нижестоящими элементами управления;  $P(x, \bar{D}(\gamma))$  - предикат, утверждающий, что  $x$  - есть решение задачи  $\bar{D}(\gamma)$ ; аналогично  $P(\gamma, D) = \gamma$  есть решение задачи  $D$ .

Условие (1) отображает возможность получения оптимального решения -  $x$  задачи системной оптимизации -  $D$  при координирующем воздействии -  $\gamma$ . При этом, стоит отметить необходимость выполнения требования совместности решения вышестоящих и нижестоящих иерархических элементов.

Решение задачи оптимального функционирования ЭЭС на практике зачастую реализуется с помощью метода координации подсистем на основе прогнозирования подсистем. Это можно выразить следующим образом:

$$(\forall \gamma)(\forall x)\{P(x, \bar{D}(\gamma)) \text{ и } k(x) = \alpha^\gamma\} \rightarrow P(x, D) \quad (2)$$

Здесь  $k(x)$  - вектор-функция, отображающая вектор решений -  $x$  в вектор взаимодействия между подсистемами -  $u$ . Выражение (2) утверждает, что глобальная задача оптимизации существует всегда, когда прогнозируемые взаимодействия -  $\alpha^\gamma$  максимально близки к фактическим решениям при  $x$ .

Применительно к рассматриваемому классу задач (ЭЭС) наиболее приемлемыми для достижения наилучших оптимизационных показателей являются градиентные методы [5]. Именно в контексте данных подходов должна учитываться степень координируемости процессов в изучаемых структурах.

Это позволяет учитывать ограничения, наложенные на зависимые переменные. Сущность применяемых для оптимизации ЭЭС ме-

тодов заключается в том, что задаются некоторые начальные приближения, т.е. начальное значение -  $X^0$  вектора независимых переменных. При этом необходимо произвести минимизацию функции -  $F(X)$ , которая при  $X^0$ , как правило, не является оптимальной -  $\nabla F(X) \neq 0$ .

На следующем шаге даётся некоторый шаг -  $\Delta X^0$  для приближения решения к требуемому условию. Таким образом получают начальное приближение для следующего шага:

$$X^1 = X^0 + \Delta X^0 \quad (3)$$

Далее даётся новое приращение шага -  $\Delta X^1$  и так далее до достижения требуемого оптимума.

Так как направление вектора антиградиента указывает направление быстрого уменьшения целевой функции, то целесообразно делать шаг в этом направлении, т.е.:

$$\Delta X^k = -h^k \left( \frac{\partial F}{\partial X} \right)^k \quad (4)$$

где  $h^k$  - множитель, определяющий шаг -  $\Delta X^k$ .

В большинстве случаев в ЭЭС приходится иметь дело с переменными, имеющими различные пределы изменения и оказывающих различное влияние на целевую функцию. Также следует учитывать различную природу и физический смысл этих переменных (напряжения, активной и реактивной мощности, объёма потреблённой электроэнергии, коэффициентов трансформации). Это, в свою очередь, обуславливает значительную разницу между значениями и определениями различных компонентов вектор - градиента. В результате, целевая функция «стягивается» вдоль линии оптимума, что в значительной мере ухудшает сходимость итерационных процессов. Для решения этой проблемы применяются масштабные множители -  $\mu_i$ . Приращение каждой независимой переменной  $x_i$  вычисляется как:

$$\Delta x_i^k = -h^k \mu_i \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^k \quad (5)$$

Удачный выбор масштабных множителей позволяет улучшить форму линии уровня целевой функции, приблизив их форму к окружности, и тем самым, значительно ускорить процесс оптимизации. Общая методика выбора масштабных множителей до сей поры не стан-

дартизирована [5], однако, как показывает ряд исследований наиболее приемлемым для решения данного вопроса видится применение принципов нейро-нечёткой логики [4-6].

Рассмотрим возможности по изменению множителя -  $h^k$ . В большинстве приложений градиентного метода величину  $\Delta X^k$  определяют на каждом шаге оптимизации, посредством минимизации  $-F(X)$  по направлению антиградиента  $-\nabla F$ :

$$F(X^{k+1}) = \min_k F(X^k - h\nabla F^k). \quad (6)$$

Такой подход называется методом наискорейшего спуска. Для его пояснения рассмотрим графическую интерпретацию данного метода. Вектор  $\nabla F^k$  в точке  $A(x_1^k, x_2^k)$  соответствует начальному положению  $k$ -той итерации, указывая направление для осуществления шага  $\Delta X^k$  - рис. 2. При этом, вопрос универсализации определения величины  $h^k$  остаётся неразрешённым.

На рис.2 методу наискорейшего спуска будет соответствовать переход системы из точки А в точку В.

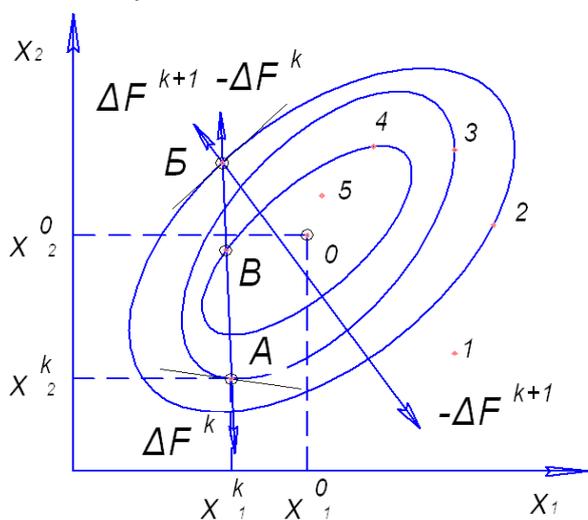


Рис. 2. Графическое пояснение процесса оптимизации ЭЭС

Подобный подход, применительно к ЭЭС может быть применён, к примеру, для оптимизации по критериям величины электроэнергии, проданной в регионе и величины потерь, приходящихся на этот объём (в такой постановке возможно решить вопрос оптимизации по минимизации величины потерь). Для отыскания минимума функции  $-F(X)$  по направлению  $\nabla F$  применяются методы одномерного поиска, требующие на каждом шаге выполнять не-

сколько оптимизационных процессов для целевой функции при различных значениях коэффициента шага. К примеру, в вопросе с минимизацией потерь электроэнергии в ЭЭС можно отметить необходимость расчёта различных вариантов зависимостей потерь и объёма потребления региона.

В методе наискорейшего спуска положено то обстоятельство, что в точке минимума  $-F(X^{k+1})$  направление векторов  $\nabla F^k$  и  $\nabla F^{k+1}$  ортогонально (для функции двух переменных - перпендикулярны). Откуда следует, что если  $(A^k, A^{k+1}) < 0$ , то  $\Delta X$  большой, и необходимо уменьшить  $h^k$ , а при  $(A^k, A^{k+1}) > 0$  - наоборот увеличить. Даже при этом существует большая вероятность не достижения оптимума, а лишь некоторого приближения к нему.

По этой причине вводятся дополнительные постоянные множители, в зависимости от сравнения векторов  $\nabla F^k$  и  $\nabla F^{k+1}$ .

Частным случаем, применяемым при решении подзадач генерации и передачи электроэнергии, требуемых в ЭЭС, является разновидность градиентного метода, заключающаяся в проведении оптимизации путём уравнивания производных.

Недостатком этого способа является то, что мощности балансируемых объектов (блоков генерации или подстанций сетевого комплекса) часто выходят за граничные пределы. При этом вводятся производные разного знака от штрафных функций с целью уменьшения значения множителя  $h^k$ . Это может привести к замедлению процесса оптимизации.

Рассмотрим основные алгоритмы оптимизации, лежащие в основе наиболее часто применяемых в настоящее время структурно-алгоритмических организаций региональных ЭЭС.

1) *Критерий минимума математического ожидания (критерий Байеса)*

В данном случае этот подход является распространением изложенного выше принципа для оценивания текущего состояния ЭЭС на подсистему принятия решений. Основной задачей метода, применительно к указанной структуре, является выбор оптимального решения на основе использования критерия Байеса

Пусть существует  $F$  альтернативных схем оптимизации системного параметра. Для каждой из них определяется математическое ожидание приведённых затрат, формирующихся в

результате принятия конкретного решения:  $\bar{Z}_i$ . Оптимальным считается решение, соответствующее наименьшему значению математического ожидания:

$$Q^{opt} = \min \bar{Z}_i(F_i). \quad (7)$$

2) *Критерий минимума среднеарифметических затрат (критерий Лапласа)*

В ряде случаев, когда не располагают вероятностями появления тех или иных состояний системы, допускают, что эти состояния равновероятны. Тогда оптимальным считается то решение, для которого среднеарифметическая оценка затрат минимальна:

$$Q^{opt} = \min Z_{icp}(F_i), \quad (8)$$

где

$$Z_{icp} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Z_{ij}(F_i). \quad (9)$$

3) *Критерии минимальных/максимальных затрат (критерий Вальда)* Критерий Вальда предполагает принятие решения на основе использования лишь максимальной оценки затрат:

$$Z = \max_j Z_{ij}(F_i). \quad (10)$$

Тогда наилучшим является решение:

$$Q^{opt} = \min \max_j Z_{ij}(F_i). \quad (11)$$

Такой принцип выбора наилучшей схемы решения называется методом наименьшего гарантированного результата, т.е. такого распределения параметров, при котором результат не будет хуже определённого уровня качества.

4) *Критерий "пессимизма - оптимизма" (критерий Гурвица)*

В этом случае определяется решение  $Q^{opt}$ , для которого имеем минимальную линейную комбинацию максимальных и минимальных затрат:

$$F = \min_i Z_i^*, \quad (12)$$

где

$$Z_i^* = \lambda Z_i^+ + (1 - \lambda) Z_i^- \quad (13)$$

где  $\lambda$  - некоторый множитель,  $0 \leq \lambda \leq 1$ . При  $\lambda = 1$  критерий Гурвица преобразуется к методу Вальда, а при  $\lambda = 0$  получаем наиболее оптимальное решение:

$$Q^{opt} = \min_i \min_j Z_{ij}(F_i). \quad (14)$$

При значениях  $\lambda \rightarrow 1$ , реализуются пессимистические оценки оптимизации ЭЭС, а при  $\lambda \rightarrow 0$  - оптимистические. В реальных системах значение  $\lambda$  должно учитывать конкретные условия для различных классов рассматриваемых переменных.

Анализ представленных алгоритмов оптимизации региональной ЭЭС позволяет сделать вывод о ключевой роли СО ЭЭС (совместно с НП «АТС») в функционировании ОРЭМ, т.к. в рамках его работы затрагиваются технические сферы деятельности генерации, сетей и потребителей с регулируемой нагрузкой.

В алгоритмах, которые заложены в правила рынка, предусмотрено стимулирование субъектов, наиболее точно исполняющих указания СО и придерживающихся плановых значений выработки / потребления электроэнергии и штрафные санкции к субъектам, невыполняющим этих требований. На ОРЭМ действуют финансовые инструменты для выполнения генерацией обязательных требований по обеспечению устойчивости ЭЭС. СО ведёт почасовой контроль выполнения объектами генерации нормативов по поддержанию частоты электрической сети, величины уровня реактивной мощности. На основании результатов этого контроля НП «АТС» использует финансовые потоки для стимулирования степени выполнения тем или иным объектом генерации предъявляемых требований.

Как следует из анализа данных по БР [7], приведённых выше, объёмы и структура потребления на нём зависит от точности, с которой фактическое почасовое потребление электроэнергии совпадает с аналогичной величиной выработки данного ресурса генерирующим оборудованием в течение торговых суток. В частности, в данном сегменте ОРЭМ торгуются отклонения фактических объёмов выработки и потребления электрической энергии, учтённые на РСВ. Эти отклонения возникают ввиду существующих ошибок прогнозирования.

С экономической точки зрения генерация (в подавляющем большинстве случаев), при работе на БР, несёт затраты, имеющие более высокую величину, в сравнении с вырабатываемыми мощностями, вошедшими в РСВ. Это отклонение, естественно, покрывается за счёт потребителей. Наблюдается ситуация, при которой сверхнормативные издержки покрываются за счёт тарифа конечного потребителя (групп потребления, не отнесённых к категории населения и приравненных к нему лиц). Проще го-

вора, в этом случае, расходуется большая величина ресурсов для производства электроэнергии, как следствие, снижается величина энергоэффективности. Компенсация данного процесса в конечном счёте, неминуемо «ложится на плечи» конечных потребителей. Для исправления данной ситуации очевидна необходимость максимального повышения степени точности взаимосвязанных процессов производства/потребления электрической энергии.

В настоящий момент времени трудно ожидать повсеместного внедрения точных систем прогнозирования на многих объектах конечных потребителей [7,8]. Аналогичная ситуация наблюдается и в блоке генерации. В обоих случаях причина кроется в необходимости выделения существенных капиталовложений на обозначенные нужды, в то время, как в текущих реалиях, наблюдается дефицит финансирования на основные технические нужды (ввод новых мощностей, энергосберегающего оборудования). В то же самое время, ясна необходимость повышения точности прогнозирования в ЭЭС.

Одним из вариантов решения поставленного вопроса является повышение точности централизованного прогнозирования, осуществляемого СО ЭЭС. В пользу такого подхода свидетельствуют следующие факты:

- максимально полный перечень потребительской структуры, которым обладает СО ЭЭС;
- первоочерёдность процесса прогнозирования для СО ЭЭС, как следствие, наличие соответствующе административно-технической базы для его реализации;
- возможность анализа эффективности принимаемых локальных оптимизаций в общей структуре расчётной модели.

Как следует из описанных фактов, затраты СО ЭЭС на проведение процесса прогнозирования будут иметь заведомо минимальные зна-

чения в существующей слаборазвитой структуре данного процесса у субъектов ОРЭМ. Стимулом для повышения точности существующего уровня прогнозирования для СО может являться включение соответствующего тарифа в стоимость оплаты на рынке системных услуг. При этом, возможно ожидать, что эта величина будет значительно ниже разницы стоимости объёмов, проданных на БР и в рамках РСВ. Данное обстоятельство позволяет рассчитывать на повышение энергоэффективности функционирования как локальных узлов ЭЭС России, так и ЭЭС в целом.

#### Литература

1. Паули В.К., Пономарёв Д.В. Первые шаги на пути реформирования электроэнергетики России // Электронный журнал «Новое в российской энергетике». 2002, №6. С. 18-25.
2. Бурковский В.Л. Модели оптимального энергораспределения в системах регионального энергопотребления / В.Л. Бурковский, Р.А. Харченко. – Воронеж: В Г ТУ, 2006 – 137с.
3. Борохов В.А. Основные изменения функционирования оптового рынка электроэнергии (мощности) // Энергорынок, – 2006. – № 11. – С.113-118.
4. Крысанов, В.Н. Особенности реализации технологии Smart Grid в региональных системах электроснабжения [Текст] / В.Н. Крысанов, А.Л. Рудков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т.10 – № 5-1. – С. 92-97.
5. Модель прогнозирования регионального потребления на базе нечёткой нейронной сети [Текст] / В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Рудков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т.11 – № 5. – С. 41-46.
6. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов/ В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю.Тюкин. – М.: Высш. шк. 2002. –183 с.: ил.
7. Раскрытие информации СО ЭЭС // [http://soups.ru/index.php?id=press\\_view&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=2435](http://soups.ru/index.php?id=press_view&tx_ttnews[tt_news]=2435)
8. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчётов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.: ил.

Воронежский государственный технический университет

## FUNCTIONAL AND ALGORITHMIC ORGANIZATION SYSTEMS OF REGIONAL ENERGY CONSUMPTION

V.N. Krysanov, A.L. Rutskov, Shukur Omar Shucur Mahmoud

In article the functional and algorithmic organization of modern systems of regional energy consumption and optimization of their parameters is considered

Key words: electrical power system, wholesale market of the electric power and power, algorithms of optimization

## АНАЛИЗ СИСТЕМ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСПАРИТЕЛЕЙ КРИОКОНЦЕНТРАТОРОВ

**В.Ю. Овсянников, С.М. Яценко, О.А. Семенихин, А.Н. Денежная**

В статье проведен анализ циклов работы испарителей криоконцентраторов при регенерации путем оттаивания вымороженного льда. Отмечено, что энергетическая эффективность холодильного оборудования может быть повышена при использовании тепловой эффективности льда, полученного из концентрируемого продукта и талой воды. Проанализированы различные виды систем оттайки криоконцентраторов с позиции энергетической и технико-экономической эффективности. Установлено, что наиболее рациональной является трехпоточная система, в которой для подвода горячих паров хладагента к испарителю применяется один дополнительный теплоизолированный трубопровод. Отмечено, что энергетическая эффективность оттайки снижается с увеличением массы конструкции криоконцентратора

Ключевые слова: технико-экономический анализ, криоконцентратор, регенерация испарителя, оттайка

В наиболее общем виде в работе криоконцентраторов циклического действия выделяют два режима: вымораживание льда при концентрировании исходного жидкого продукта и регенерацию теплообменных элементов-оттайку. Процесс вымораживания влаги в подобных установках осуществляется, как правило, периодически, т.е. состоит из так называемых рабочих циклов холодильной машины или установки [1, 2]. В вымораживающих установках малой производительности по концентрируемому продукту длительность цикла зависит от характера пуска и остановки компрессора. В установках средней и большой производительности, таких как, например зарубежных компаний «Sulzer Chemtech AG», «Frigo Daubron», «Union Carbide», «Struthers Scientific and International Corp», общая холодопроизводительность также регулируется пуском-остановкой компрессора, а процесс концентрирования жидких сред в отдельных параллельных попеременно работающих вымораживателях-эпизодическим отключением соответствующего испарителя путем перекрытия электромагнитного клапана на магистральной подачи хладагента в испаритель [3].

Действительное время активной работы установки криоконцентрирования, т.е. периода, когда хладагент поступает в испаритель, составляет 0,75...0,80 от общего времени вымораживания влаги и изменяется в течение суток в зависимости от условий концентрирования.

В процессе работы криоконцентрирующей установки на её теплообменной поверхности образуется слой вымороженного льда, с ростом

толщины которого уменьшается тепловой поток через его поверхность и возникает необходимость оттайки. Цикл работы криоконцентратора до этого момента называется циклом льдообразования. Он состоит из множества рабочих циклов, суммарную продолжительность которых обозначим как  $\tau_1$ , а продолжительность последующего цикла оттайки как  $\tau_2$ .

Процесс регенерации криоконцентратора, естественно, связан с некоторыми неудобствами: уменьшением холодопроизводительности, так как в это время испаритель не отбирает теплоту от концентрируемого продукта; необходимостью подвода энергии для реализации процесса оттайки; увеличением теплопритоков в установку вследствие тепловых потерь в процессе оттайки; эпизодическим ростом диапазона колебаний температуры в рабочем объеме установки, который может превысить допустимые границы.

В тоже время эти недостатки в определенной степени компенсируются возможностью повышения энергетической эффективности холодильной установки благодаря использованию вымороженного льда и талой воды для первоначального охлаждения концентрируемого продукта и переохлаждения жидкого хладагента, а также использованием «бросовой» теплоты холодильной установки для реализации оттайки [4, 5].

В цикле регенерации испарителя криоконцентратора можно выделить следующие периоды (рис. 1):

I- инициация процесса оттайки и подготовка испарителя, включающая осушку теплообменного пространства испарителя (удаление оставшегося там хладагента), выравнивание температуры испарителя, отключение подачи вымораживаемого продукта  $\tau_{21}$ .

II- процесс нагрева, т.е. подвода теплоты извне, и таяние вымороженного льда-  $\tau_{22}$ , в том

Овсянников Виталий Юрьевич - ВГУИТ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 255-38-96

Яценко Сергей Михайлович - ВГУИТ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(920) 400-60-84

Семенихин Олег Александрович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-76-70

Денежная Анастасия Николаевна - ВГУИТ, студент, тел. 8(473) 255-38-96

числе:

- пуск нагревателей, обогрев стоков испарителя, нагрев до температуры таяния льда-  $\tau_{22a}$ ;
- таяние льда на поверхности испарителя, сопровождающееся стабилизацией его температуры  $\tau_{22b}$ ;
- рост температуры поверхности испарителя выше температуры плавления вымороженного льда-  $\tau_{22c}$  (в случае оттайки горячими парами на этой стадии происходит удаление из полости испарителя сконденсированного там хладагента);
- выключение нагревателей и выравнивание температуры теплообменной поверхности испарителя перед последующим концентрированием-  $\tau_{22d}$ .

III- окончание периода оттайки, переключение криоконцентратора в режим вымораживания влаги, понижение температуры испарителя, подачу исходного продукта в установку и достижения первоначально установленной температуры кипения хладагента-  $\tau_{23}$ .

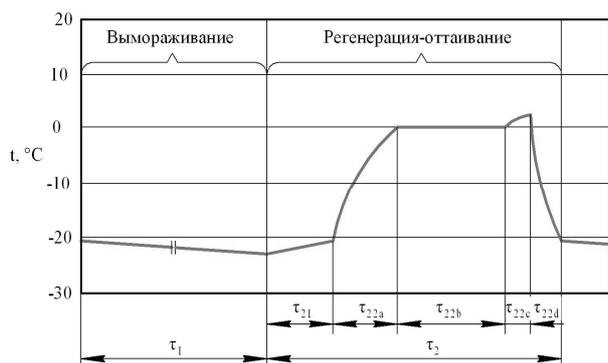


Рис. 1. Характер изменения температур в испарителе криоконцентратора во время вымораживания влаги и оттаивания льда

На рис. 2 представлены примерные интервалы продолжительности регенерации в зависимости от температуры испарителя.

Здесь можно выделить три диапазона рабочих температур: I- ниже минус 30°C; II- от минус 30 до минус 1 (область эвтектических температур) и III – около 0°C (область криоскопических температур). Отличают эти три диапазона интенсивность льдообразования, плотность, теплопроводность и структура льда, а также продолжительность процесса регенерации.

На выбор системы оттайки влияет много факторов, но самым существенным являются затраты энергии на циклическую оттайку.

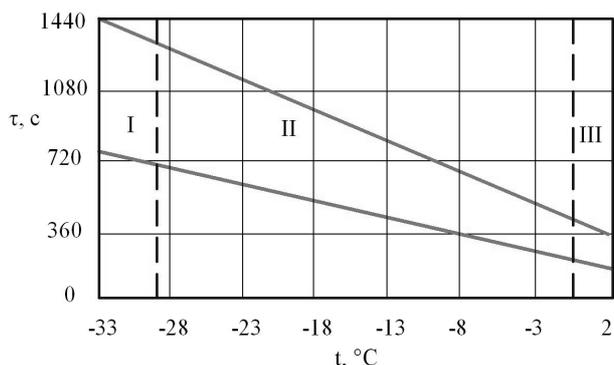


Рис. 2. Продолжительность регенерации в зависимости от температуры испарителя

Отмечено, что частота оттайки зависит от условий эксплуатации криоконцентратора в режиме вымораживания (разности температур концентрируемого продукта и поверхности испарителя, начальной температуры и содержания растворимых веществ в продукте, гидродинамической обстановки в аппарате) и площади теплообменной поверхности испарителя. Поэтому так важны предварительный технико-экономический анализ стоимости каждого технического решения, связанного с регенерацией, и оценка его вклада в общие эксплуатационные расходы криоконцентратора.

Так, например, применение электрических, более дорогостоящих систем оттайки может быть оправдано малой частотой оттайки или значительной удаленностью рабочей зоны криоконцентратора от машинного отделения.

Более дешевые многопоточные системы оттайки горячими парами хладагента также отличаются друг от друга капитальными и эксплуатационными расходами. Двухпоточную систему целесообразно применять в установках с реверсируемым циклом или в очень компактном оборудовании и при малой частоте оттайки. Применение подобной системы в работающих на несколько криоконцентраторов многоиспарительных установках приведет к существенному увеличению количества требуемых элементов автоматического управления и использованию специальных байпасных магистралей. Поскольку во время оттайки для подвода горячих паров хладагента используется всасывающие манистралы, они должны быть подогреты на несколько десятков градусов. Количество теплоты, необходимое для этого, зависит от массы трубопроводов, их теплоемкости и качества тепловой изоляции. Таким образом, двухпоточная система кроме сложности регулирования характеризуется также меньшей энергетической эффективностью и более длительной продолжительностью оттайки.

Четырехпоточная система характеризуется наиболее простым регулированием, однако монтаж двух необходимых дополнительных магистралей повышает капитальные затраты. Наиболее рациональной является трехпоточная система, в которой для подвода горячих паров хладагента к испарителю применяется один дополнительный теплоизолированный трубопровод. Учитывая достаточно простое регулирование и небольшие потери при перемещении теплоты от компрессора до испарителя трехпоточная система наиболее часто используется в условиях оттайки горячими парами хладагента.

Рассмотрим влияние оттайки на работу пароконденсаторной холодильной установки. Потери производительности испарителя криоконцентрактора, вызванные перерывом в его работе на цикл оттайки, уменьшают холодопроизводительность установки на величину равную

$$Q_0 = \tau_2 N_0, \quad (1)$$

где  $\tau_2$  – продолжительность оттайки, с;  $N_0$  – холодопроизводительность холодильной установки, Вт.

Количество теплоты, подводимой для подплавления льда с теплообменной поверхности испарителя

$$Q_l = \tau_2 N_l, \quad (2)$$

где  $N_l$  – холодопроизводительность холодильной установки, Вт.

Эта теплота расходуется не только на подплавление вымороженного льда, но и на подогрев массы испарителя, на тепловые потери тепловое излучение. Отмечено, что энергетическая эффективность оттайки снижается с увеличением массы конструкции криоконцентрактора. Поэтому при высокой интенсивности льдообразования и частой регенерации необходимо стремиться к минимизации их теплоемкости. С другой стороны, существует реальная опасность того, что при небольшой установленной мощности электрических нагревателей и низких температурах (-30...-20 °С) вымороженный на поверхности испарителя криоконцентрактора лёд будет подтаивать очень долго.

С учетом вышеописанных потерь можно записать

$$Q_l = Q_{nl} Q_{nom}, \quad (3)$$

где  $Q_{nl}$  – теоретически необходимое количество теплоты для удаления массы льда из криоконцентрактора,  $Q_{nom}$  – потери теплоты во время оттайки.

Теоретически необходимое количество

теплоты для удаления массы льда из криоконцентрактора определяется из уравнения

$$Q_{nl} = m_l F (c_l (0 - t_l) + r), \quad (4)$$

где  $m_l$  – удельная масса льда на теплообменной поверхности, кг/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь теплообменной поверхности, м<sup>2</sup>;  $c_l$  – теплоемкость льда, кДж/(кг·К);  $t_l$  – температура льда, °С;  $r$  – удельная теплота плавления льда, кДж/кг.

Введя показатель эффективности оттайки криоконцентрактора (КПД оттайки)

$$\eta_{om} = \frac{Q_{nl}}{Q_l}, \quad (5)$$

и, определяя количество теплоты, подведенное системой оттайки к криоконцентрактору, после преобразований зависимостей (3) и (5) получим

$$Q_{nom} = Q_l (1 - \eta_{om}) = \tau_2 N_l (1 - \eta_{om}) \quad (6)$$

В таком виде, удобном для оценки энергетической эффективности криоконцентрактора, не учтены потери  $Q_{пр}$  на линии подачи греющей среды. При анализе систем оттайки эти потери, как правило не учитываются, ввиду их малости и недостаточно полного изучения процессов, происходящих на различных участках системы в процессе оттайки. В тоже время учет этих потерь позволяет существенно скорректировать результаты сравнения различных систем оттайки. Это, прежде всего, касается систем оттайки горячими парами хладагента или при помощи промежуточного теплоносителя. Указанные потери не учитываются только в системах с электронагревателями, прикрепленными непосредственно к поверхности испарителя.

Величина, характеризующая потери тепловой энергии на магистрали подачи греющей среды, представляется в виде отношения

$$\eta_{nom} = \frac{Q_l}{Q_n} = \frac{1}{1 + Q_{nz} / Q_l}, \quad (7)$$

где  $Q_n$  – полная тепловая энергия, подведенная к системе оттайки от источника.

Некоторое повышение общей эффективности оттайки испарителя криоконцентрактора можно достичь при использовании внешней регенерации теплоты в холодильном цикле. Внешняя регенерация – это полезное использование низкопотенциальной теплоты (холода), содержащегося в вымороженном льде, талой воде и массе самого испарителя для переохлаждения жидкого хладагента перед дросселированием в терморегулирующем вентиле холодильного агрегата. Вытекающий отсюда энергетической эффективности может быть пред-

ставлен в виде следующей зависимости прирост

$$\eta_{пз} = 1 + \eta_{pm} c_e (t_k - t_e) \left( 1 - \frac{1}{\xi} \right) / r, \quad (8)$$

где  $\eta_{pm}$  - КПД регенеративного теплообменника;  $c_e$  - теплоемкость воды из вымороженного льда, кДж/(Кг·К);  $t_k$ ,  $t_e$  - температура конденсации хладагента и воды из вымороженного льда соответственно, °С;  $\xi$  - коэффициент представляющий собой отношение общего количества подведенной теплоты вместе с теплотой конденсации, к количеству теплоты, подведенной путем конвекции;  $r$  - удельная теплота конденсации, кДж/кг.

Рассмотрим теперь эксплуатационные затраты на систему электрической оттайки испарителя криоконцентратора.

Цена 1 кВт электрической энергии в России неуклонно растет, что заставляет задумываться над энергосбережением при эксплуатации холодильного оборудования, и процесс регенерации криоконцентратора играет здесь важнейшую роль.

На отдельно взятом предприятии в зависимости от переменных составляющих расходов на эксплуатацию цена потребленной энергии будет различаться даже при постоянной стоимости 1 кВт.

Стоимость электрической оттайки испарителя криоконцентратора в течение года составит

$$C_{om} = m (F q_{om} k_i \tau_2 n), \quad (9)$$

где  $m$  - количество рабочих дней в году;  $F$  - поверхность испарителя криоконцентратора, м<sup>2</sup>;  $q_{om}$  - удельная мощность электрической оттайки, Вт/м<sup>2</sup>;  $k_i$  - цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб;  $\tau_2$  - продолжительность цикла оттайки, ч;  $n$  - число циклов регенерации, 1/сут.

Еще одной составляющей затрат является стоимость отвода выделившейся при оттайке теплоты, которая попала в рабочую камеру криоконцентратора. Принимая, что только часть общей подведенной к системе оттайки теплоты попадает в рабочую камеру криоконцентратора (остальная теплота уходит вместе с талой водой и вымороженным льдом) и учитывая уравнения (6) и (9), можно записать, что стоимость затраченной на это электрической энергии составляет

$$C_{кк} = m (F q_{om} \tau_2 n) (1 - \eta_{om}) / \varepsilon_o \quad (10)$$

где  $\eta_{om}$  - КПД оттайки, согласно уравнению (5);

$\varepsilon_o$  - действительный холодильный коэффициент установки.

Формула для определения общих затрат на оттайку принимая во внимание уравнения (9) и (10) и при условии одинаковой стоимости 1 кВт для обоих процессов выразится уравнением

$$C_{сум} = C_{om} + C_{кк} = m F q_{om} k_i \tau_2 n \left( 1 + \frac{1 - \eta_{om}}{\varepsilon_o} \right). \quad (11)$$

При этом следует учитывать, что в стоимость охлаждения после оттайки вымороженного льда входят еще и такие затраты, как амортизация оборудования, оплата обслуживающего персонала с накладными расходами, стоимости ремонтов, воды и канализационного отвода и т.д.

Установлено, что общая стоимость получения 1 кВт холода примерно в 5...7 раз выше стоимости, затраченной на производство электрической энергии, что можно учесть в формуле (11) коэффициентом  $b_2$ . Кроме того, стоимость 1 кВт электрической энергии, затрачиваемой в процесса оттайки и охлаждения ( $k_1$  и  $k_2$ ), может различаться. С учетом указанного формула (11) может быть переисана следующим образом

$$C_{\Sigma} = m F q_{om} \tau_2 n \left( b_1 k_1 + \frac{1 - \eta_{om}}{\varepsilon_o} b_2 k_2 \right), \quad (12)$$

где  $b_2 = 5...7$ .

При этом, составная часть указанных выше эксплуатационных затрат, а именно затраты связанные с ремонтами системы оттайки, если их составляющие не входят в коэффициент  $b_2$ , должны быть учтены в формуле (12) посредством коэффициента  $b_1$ , величина которого может быть оценена в интервале 2...3.

Анализ формулы (12) показывает, что с ростом частоты регенерации оттайкой стоимости ее пропорционально повышаются. Следовательно, необходим рациональный подход к настройкам регуляторов оттайки, поскольку несбалансированные циклы оттайки приводят к завышенному расходу электрической энергии и весьма затратные для производителя концентрированных жидких пищевых и биологических сред. Годовые расходы  $C_{om}$  на электрическую энергию для системы электрической оттайки криоконцентратора пропорциональны как частоте оттайки, так и цене 1 кВт электрической энергии.

На основании вышеизложенного анализа

можно сформулировать следующие выводы:

- экономически оптимальная частота оттайки зависит от интенсивности вымораживания льда и конструктивного исполнения системы оттайки;
- применение систем оттайки горячими парами холодильного агента обеспечивает быструю окупаемость капитальных вложений вследствие низких эксплуатационных расходов;
- затраты энергии на реализацию электрической оттайки зависят от мощности системы оттайки, продолжительности, частоты цикла и вносят существенный вклад в эксплуатационные расходы холодильной установки;
- затраты на отвод теплоты, выделившейся в процессе оттайки испарителя криоконцентраатора, соизмеримы с затратами на оттайку и не могут не учитываться в проектных расчетах и при анализе эффективности существующих систем регенерации криоконцентрирующих

установок циклического действия.

#### Литература

1. Термодинамические особенности процесса концентрирования жидких сред вымораживанием [Текст]/С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, Я.И. Кондратьева, Н.И. Бостынец // Современные наукоемкие технологии. 2014.- № 5-1.- С.159.
2. Разработка модели анализа и прогноза основных характеристик процесса криоконцентрирования [Текст] / С.Т. Антипов, В.Ю. Овсянников, А.Н. Рязанов, С.М. Ященко // Хранение и переработка сельхозсырья.- 2001.- № 4.- С. 36-38.
3. Овсянников, В. Ю. Исследование процесса вымораживания влаги из экстрактов эндокринного и специального сырья [Текст] / В.Ю. Овсянников. Дисс. канд. техн. наук: 05.18.12: защищена 29.04.2003: утв. 03.10.2003. Воронеж. гос. технол. акад., 2003.- 184 с.
4. Овсянников, В. Ю. Оптимальные режимы концентрирования плазмы крови вымораживанием [Текст] / В.Ю.Овсянников // Мясная индустрия.- 2012.- № 1.- С. 65-68.
5. Овсянников, В. Ю. Определение режимов концентрирования яблочного сока вымораживанием [Текст] / В.Ю. Овсянников // Хранение и переработка сельхозсырья.- 2012. - № 7.- С. 16-18.

Воронежский государственный университет инженерных технологий  
Воронежский государственный технический университет

## ANALYSIS OF RECOVERY SYSTEMS VAPORIZERS OF FREEZING PLANTS

**V.Yu. Ovsyannikov, S.M. Yaschenko, O.A. Semenikhin, A.N. Denezhnaja**

The article analyzes the cycles of evaporators cryoconcentrations during regeneration by thawing frozen ice. Noted that the energy efficiency of refrigeration equipment can be increased by using a heat capacity of the frozen ice of the concentrated product and melt water. Analyzed different types of defrost systems the chiller position with energy and technical- economic efficiency. Noted that the energy efficiency of refrigeration equipment can be improved by using the thermal efficiency, the resulting ice from the concentrated product and melt water. Noted that energy efficiency is reduced defrost with increase structural mass chiller plant

Key words: techno - economic analysis, the chiller, plant regeneration, evaporator defrost

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО ПУАНСОНА

М.В. Молод

В статье рассмотрены конструктивные особенности универсального пуансона с оценкой величин удельного давления, возникающих при формообразовании обшивок

Ключевые слова: формообразование, пуансон, деформация, точность, трение

Обшивки, выходящие на аэродинамические поверхности самолета, должны обладать высокой точностью.

Точность обшивок достигается технологией изготовления. В настоящее время для изготовления обшивок применяется оборудование с ЧПУ [1]. Схема получения управляющей программы приведена на рис. 1.

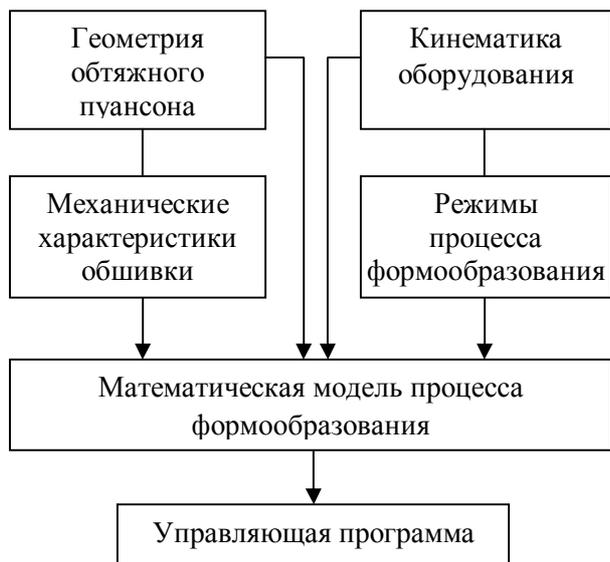


Рис. 1. Схема получения управляющей программы

Из приведенной схемы видно, что главным фактором, определяющим заданную точность обшивок, является геометрия пуансона.

В настоящее время на предприятиях существуют пуансоны монолитной конструкции. Для их изготовления применяются следующие материалы: вторичный алюминий, сталь, дерево, болениг.

Наиболее часто для изготовления пуансонов применяется дерево.

Конструкция пуансона из дерева имеет следующие преимущества и недостатки.

Преимущества:

- материал для изготовления пуансона присутствует на рынке в достаточном количестве.

Недостатки:

- высокая трудоемкость изготовления;
- большой вес пуансона, что вызывает неудобство в хранении и эксплуатации;
- в процессе эксплуатации происходит коробление бруса и потеря точности пуансона, что требует периодического контроля и ремонта.

Для повышения точностных и эксплуатационных характеристик оснастки разработана конструкция универсального пуансона [2], которая состоит из двух частей: опоры 1 и накладки 2 (рис. 2). Опора может использоваться для группы пуансонов. Так при изготовлении крыла самолета, с учетом схемы членения используется опора и пять накладок.

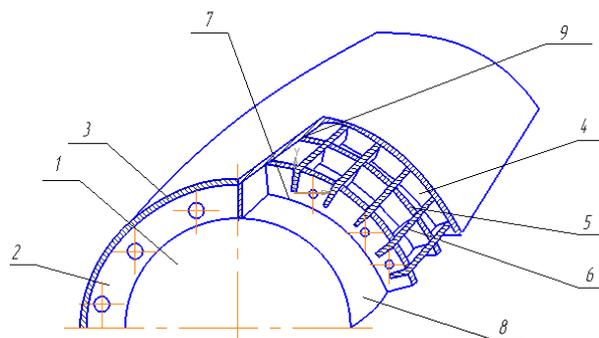


Рис. 2. Конструкция универсального пуансона

Универсальный пуансон состоит из опоры 1 с наружной поверхностью 8, накладки 2 с внутренней поверхностью 7, наружной поверхности накладки 9.

Накладка содержит ячейки 4, состоящие из поперечного 5 и продольного набора пластин 6.

Поперечный и продольный набор пластин получают из листового материала – стали 20 толщиной 1,0-2,0 мм.

Молод Марина Владиславовна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: MolodMV@yandex.ru

Схема технологического процесса изготовления универсального пуансона для обтяжки обшивок приведена на рис. 3.

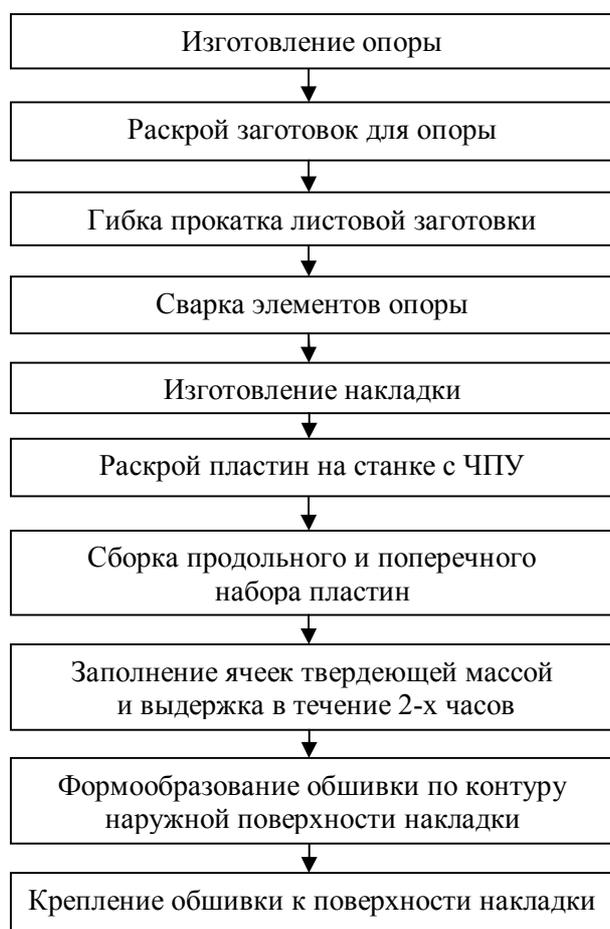


Рис. 3. Схема технологического процесса изготовления универсального пуансона

Обработку по контуру пластин, образующих ячейку 4, осуществляют на оборудовании с ЧПУ (фрезерный станок, лазерный раскройный комплекс) с учетом толщины обшивки в виде листовой заготовки. После обработки осуществляют сборку поперечных 5 и продольных 6 пластин и получают накладку 2 с заданными размерами, которую укладывают на опору 1, а затем заполняют ячейки твердеющей массой.

Формование внутренней поверхности (контура) 7 накладки 2 осуществляют по рабочей поверхности 8 опоры 1 после заполнения ее ячеек 4 твердеющей массой.

Рабочую поверхность накладки 2 получают выравниванием твердеющей массы упругой пластиной. После застывания твердеющей массы осуществляют обтяжку обшивки 3 в виде листовой заготовки, например, из Д16АМ толщиной 2,0 мм по наружной поверхности 9 накладки 2 с последующей обрезкой обшивки 3 и прикреплением ее к продольному набору пластин 6.

После обтяжки листовой заготовки по изготовленному пуансону отклонение обшивки по толщине 2,0 мм составляет не более 0,12 мм, что вполне допустимо для изготовления пуансонов.

САПР технологического процесса изготовления криволинейной накладки универсального пуансона представлен на рис. 4.



Рис. 4. САПР технологического процесса изготовления криволинейной накладки универсального пуансона

Одно из основных требований, предъявляемых к качеству пуансона – обеспечение точности наружной поверхности, выполняется за счет реализации предлагаемой технологии изготовления универсального пуансона.

Второе требование – это обеспечение требуемой прочности.

Значение величины удельного давления определяется по минимальному сечению пуансона по формуле Лапласа:

$$g = \frac{\sigma h}{R}$$

где  $\sigma$  – значение предела прочности материала заготовки в МПа;  $h$  – толщина обшивки в мм;  $R$  – радиус сечения пуансона, мм.

Максимальная величина удельного давления находится в пределах 5 МПа.

Из этого расчета выбиралась толщина пластин и размер ячеек накладки 50×50 мм.

Экспериментальный процесс обтяжки обшивок был осуществлен на пуансоне с радиусом кривизны

в минимальном сечении  $R_1=500$  мм, в максимальном  $R_2=600$  мм, углом охвата  $\alpha=180^\circ$ . Толщина формируемых обшивок составила 2,4 мм. Материал обшивок – Д16АТ.

Продольные и поперечные пластины накладки изготавливались из материала сталь 20.

Геометрические размеры накладки представлены на рис. 5.

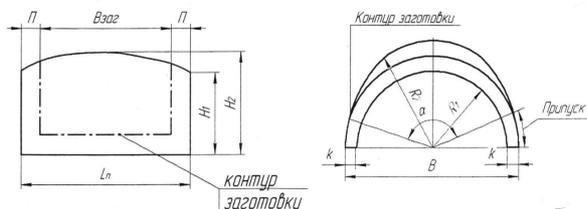


Рис. 5. Геометрические размеры накладки:  
*Взаг* – ширина заготовки; *Ln* – длина пуансона;  
*B* – ширина; *k* – толщина; *H<sub>1</sub>* – высота крайнего сечения пуансона; *H<sub>2</sub>* – высота среднего сечения пуансона

Обтяжка обшивок осуществлялась на прессе с ЧПУ. Перед обтяжкой на заготовку наносилась делительная сетка с базой 100×100 мм. Характер распределения деформаций по сечениям пуансона после формообразования представлен на рис. 6.

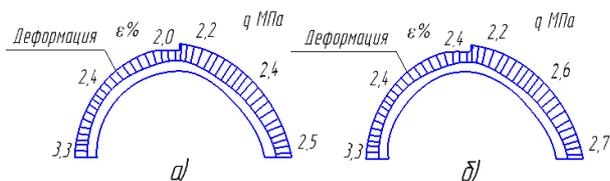


Рис. 6. Характер деформаций и величин удельных давлений по сечениям пуансона после формообразования:

а – крайнее сечение; б – среднее сечение

Значения удельных давлений были рассчитаны по формуле Лапласа. При данных нагрузках обтяжной пуансон удовлетворял требованиям прочности и жесткости. Полученные обтяжкой обшивки удовлетворяли требованиям точности [2].

Воронежский государственный технический университет

## DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL PUNCH

M.V. Molod

The article describes the design features of the universal values of the punch with the assessment of the specific pressure arising during formation of skins

Key words: forming, punch, deformation, precision, friction

Конструкции универсального пуансона имеет следующие преимущества:

- снижение материалоемкости оснастки более чем в 2 раза;
- опора является универсальной и используется для нескольких пуансонов;
- наличие в конструкции пуансона элементов опоры и накладки обеспечивает удобство хранения и эксплуатации;
- низкая трудоемкость изготовления (по сравнению с базовым вариантом достигнуто снижение трудоемкости изготовления на 40-50%);
- отсутствие необходимости проведения планового ремонта.

Заключение.

1. Разработана конструкция универсального пуансона, обеспечивающая получение обшивок требуемой точности.

2. Проведенные исследования реализации конструкции в производственных условиях выявили удобство в эксплуатации и в хранении оснастки.

3. Анализ технико-экономических показателей по сравнению с базовыми вариантами выявил преимущества в технологическом исполнении и экономическую эффективность разработки.

### Литература

1. Одинг, С.С. Оптимизация формообразования оболочек двойной кривизны на обтяжном оборудовании с ЧПУ / С.С. Одинг // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - №11. - С. 31-33.
2. Молод, М.В. Особенности формообразования двояковыпуклых обшивок на оборудовании с ЧПУ [Текст] / М.В. Молод, В.Н. Долматова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. - № 12.2. - С.100-103.
3. Пат. 2197351 Российской Федерации, МПК<sup>7</sup> В 21 D 11/20. Способ изготовления пуансона для формообразования деталей двойной кривизны / Максименков В.И., Коротков А.А., Шереметов В.Е., Максименкова М.В.; заявитель и патентообладатель ФГУП НИИАСПК, г. Воронеж. - №2000118302/02; завл. 10.07.00; опуб. 27.01.03, Бюл. №3. – 4с.

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ САМОЛЁТА

В.И. Максименков, М.В. Молод, Ю.А. Сидельникова

В статье рассмотрен процесс формообразования деталей кабины самолёта с предварительным нагревом заготовки. Выявлены браковочные признаки, возникающие при формообразовании деталей с нагревом. Разработан способ повышения стойкости штамповой оснастки методом борирования, обеспечивающий повышение твёрдости до 2000HV и стойкости штамповой оснастки в 4 – 10 раз

Ключевые слова: борирование, штамп, стойкость

В конструкции кабины самолёта используются листовые материалы из титановых сплавов и нержавеющей сталей. Учитывая, что толщина заготовок равна 4 мм, деформировать такие заготовки в холодном состоянии не представляется возможным.

Разработана установка УНКЛ-18, обеспечивающая предварительный нагрев заготовок перед формообразованием [1].

Установка использовалась в составе с молотом МЛ-3. Схема процесса формообразования представлена на рис. 1.

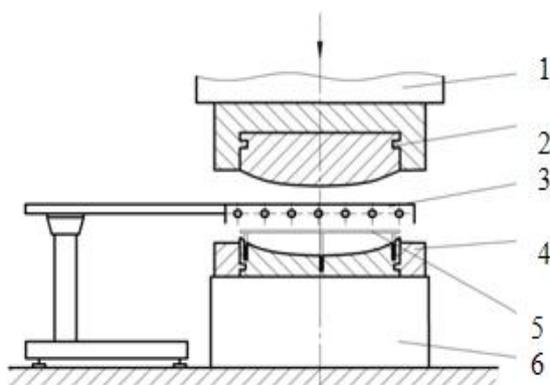


Рис. 1. Схема процесса формообразования заготовки:  
1 – стелсель; 2 – пуансон; 3 – установка для нагрева заготовок;  
4 – матрица; 5 – заготовка; 6 – шабот

Формообразование детали из сплава ОТ4-1 осуществляется с базированием заготовки на матрице. При этом на заготовке выполняются отверстия, в которые входят направляющие элементы, установленные на матрице.

Максименков Владимир Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: [maksimenkov.v.i@mail.ru](mailto:maksimenkov.v.i@mail.ru)  
Молод Марина Владиславовна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: [MolodMV@yandex.ru](mailto:MolodMV@yandex.ru)  
Сидельникова Юлия Александровна – ВГТУ, студент, e-mail: [Juliya2214@rambler.ru](mailto:Juliya2214@rambler.ru)

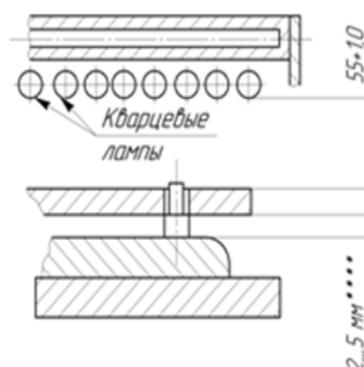
Перед процессом формообразования осуществляется тарировка установки. При этом определяются высота расположения нагревательных ламп относительно заготовки, время и температура нагрева заготовки.

После процесса формообразования осуществлялся контроль наличия окалины на поверхности испытываемых материалов. Результаты испытаний различных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Время нагрева заготовок с использованием УНКЛ – 18

Марка материала	Температура нагрева, °С	Толщина материала, мм					
		1,5	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0
ОТ4	650	28	-	39	-	60	80
ОТ4-1	650	35	-	46	51	59	-
ВТ1-0	550	31	35	37	44	50	-
ВТ6	800	42	-	51	61	-	-
ПТ7	700	-	-	-	-	-	-
12Х18Н10Т	700*	-	-	55	-	-	-
12Х18Н10Т	720**	-	-	56	-	-	-
12Х18Н10Т	750***	-	-	65	-	-	-
ОТ4-0 ****	650	-	-	-	-	-	79

СХЕМА  
УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ  
ОТНОСИТЕЛЬНО ЛАМП



В процессе формообразования заготовки определяли температуру нагрева матрицы.

Максимальная температура нагрева соответствовала 300°C. Эта величина может изменяться с учётом геометрии штампа.

Учитывая характер ударной нагрузки в процессе формообразования, выбран материал штампа 5ХНМ – инструментальная сталь. Режимы термообработки: закалка 850°C с охлаждением в масле и последующий отпуск при 460 – 520°C. На выбор материала штампа оказывает влияние его стоимость, а так же условия эксплуатации.

Относительная стойкость данного материала приведена в табл. 2.

Таблица 2

Относительная стойкость молотовых штампов

Материал штампа	5ХНМ
Относительная стойкость в %	90

Стойкость штампов зависит от следующих факторов (рис. 2).

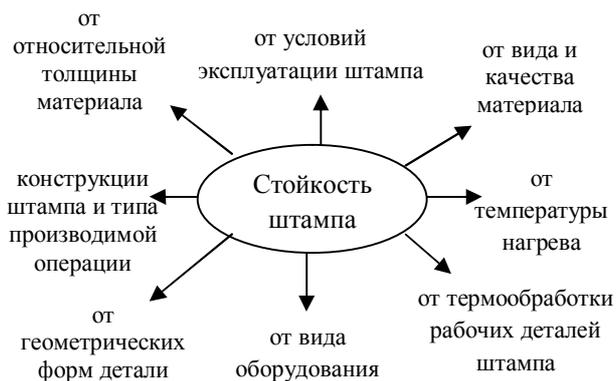


Рис. 2. Стойкость штампа

Проведён конструктивно – технологический анализ процесса штамповки, который позволил выявить дефекты оказывающие влияние на качество штампуемых деталей. Главные из них трещины, недоформовка поверхности, наводораживание и др., что во многом определяется состоянием штамповой оснастки. Возникающие браковочные признаки:

- Низкая стойкость;
- Появление сколов поверхности матрицы и пуансона;
- Появление сетки трещин;
- Образование окалины;
- Высокий износ;
- Возникновение дефектов в микроструктуре слоя.

С целью устранения браковочных признаков рассмотрены методы повышения

качества штампов методами химико-термической обработки (ХТО). Следует выделить наиболее распространенные – это цементация, нитроцементация, азотирование и борирование.

Представлены характеристики изменения твёрдости при различных видах химико – термической обработки (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные показатели твёрдости

Процесс	Твёрдость (HV)
Борирование	1800 – 2000
Цементация	500 – 700
Азотирование	300 – 350
Нитроцементация	570 – 690

Учитывая техническую оснащенность предприятия и условий экологии, а так же оценку эффективности процесса, был выбран процесс борирования, т.е. насыщение поверхности матрицы и пуансона бором (табл. 4).

Таблица 4

Метод борирования

Метод борирования	Режим борирования		Глубина слоя, мм
	Температура, °C	Продолжительность	
В порошкообразной смеси	900	4 часа	0,15 – 0,20
	1000		

Этот процесс поможет уменьшить браковочные признаки и улучшить стойкость штампа [2]. Процесс борирования осуществляется по схеме (рис. 3).

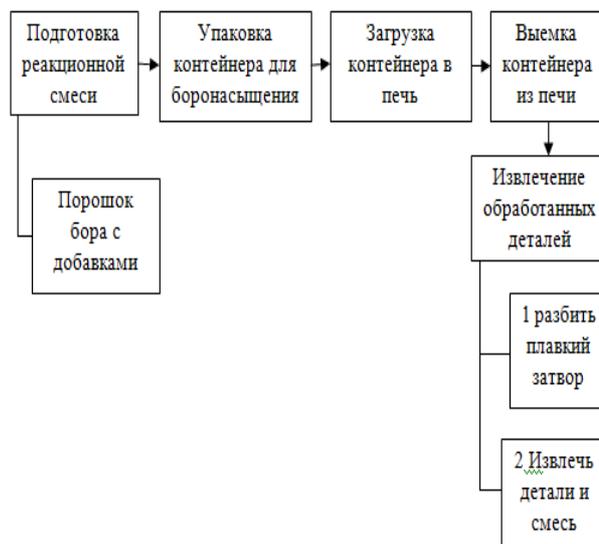


Рис. 3. Схема технологического процесса борирования

Весь этот процесс осуществляется в устройстве для борирования, которое состоит из карбида бора, матрицы, пуансона, асбеста, песка и все это покрывается ангидридом бора (плавкий затвор) (рис. 4). Это устройство после установки детали помещают в печь.

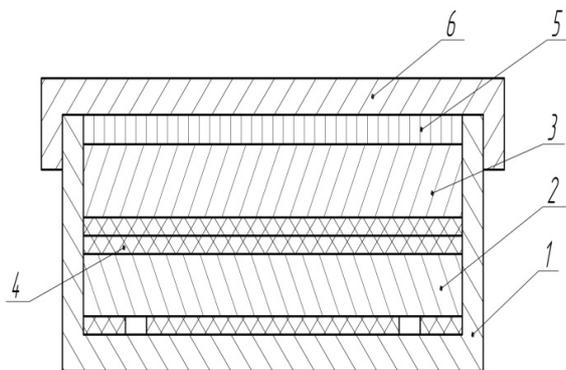


Рис. 4. Устройство для борирования: 1 – контейнер, 2 – матрица, 3 – пуансон, 4 – асбест, 5 – карбид бора, 6 – крышка

После процесса борирования проводилась оценка твёрдости матрицы и пуансона. Сравнительные характеристики приведены на рис. 5.

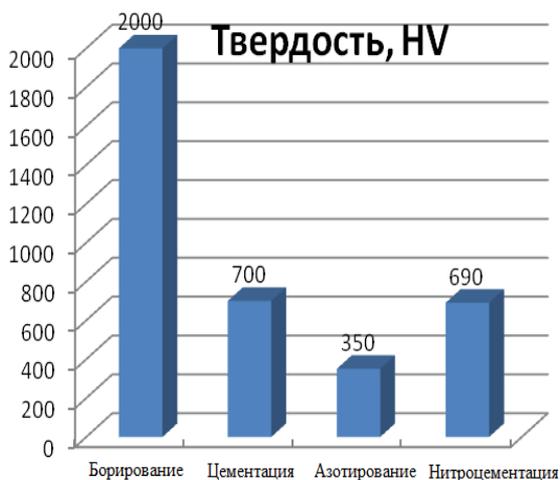


Рис. 5. Сравнительные характеристики твёрдости оснастки

Выявлено, что максимальная твёрдость получается при борировании. Проведённые испытания оснастки показали, что повышение твёрдости штамповой оснастки улучшили качество поверхности деталей. Определялась стойкость образцов, которые обрабатывались по технологии изготовления штампа.

Оценка стойкости осуществлялась с помощью идентора - конуса, которым наносились удары по образцу, и выявлялась глубина следа идентора. При борировании - 0,08 мм, а при азотировании – 0,15мм. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Оценка стойкости

Метод обработки	Глубина упрочнения	Глубина следа идентора при ударе
Борирование	0,15	0,08
Азотирование	0,2	0,15

Внедрение процесса позволяет снизить трудоёмкость изготовления штамповой оснастки в 4 раза, обеспечив повышение стойкости в 4 – 10 раз, при этом улучшается качество поверхности деталей.

Литература

1. Технология изготовления окантовок фонаря кабины среднемагистрального самолёта АН-148 [Текст] / В.И. Максименков, М.В. Молод, А.А. Коротков, В.И. Федосеев, А.С. Джибилов, // Вестник Воронежского государственного университета. - 2012. - Т. 8. - №12.2. – С. 97-99.
2. Ворошин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: (Справочное пособие), // 1981.- С. 205. Воронежский государственный технический университет

Воронежский государственный технический университет

**IMPROVING THE QUALITY OF DIE TOOLING IN THE MANUFACTURE OF AIRCRAFT PARTS**

**V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, Ju.A. Sidelnikova**

The article describes the process of shaping parts of the cockpit with preliminary heating of the work piece. Revealed signs of rejection that occurs when shaping parts with heating. Developed method of increasing the resistance die of snap method of boriding providing the increase of hardness up to 2000HV and durability die 4 – 10 fold

Key words: boronacase, stamp, vitality

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ БЕСКОНДЕНСАТОРНЫХ КМОП-КНИ-АЦП КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.С. Кононов

Отмечены основные механизмы деградации КМОП-КНИ-АЦП при воздействии ионизирующих излучений космического пространства. Рассмотрен метод повышения точности и устойчивости преобразования бесконденсаторного 12-разрядного КМОП-КНИ-АЦП для космического применения

Ключевые слова: ионизирующие излучения, АЦП, КМОП-КНИ

Ионизирующие излучения космического пространства (ИИКП) являются источником многих проблем при создании бортовой аппаратуры (БА) с высокой сбое- и отказоустойчивостью [1]. Как отмечено в [1], для повышения стойкости БА к ИИКП используют различные методы, в том числе применяют защитные экраны, аппаратное и программное резервирование, а также специальные технологические, конструкторские и схемотехнические решения при создании сбое- и отказоустойчивой элементной базы. В случае аналого-цифровых преобразователей (АЦП) эти проблемы приобретают особую значимость, так как в отличие от цифровых микросхем чувствительность АЦП к ИИКП существенно выше [2].

Определенные успехи в снижении чувствительности АЦП к ИИКП были достигнуты применением полупроводниковой структуры “кремний на изоляторе” (КНИ). Такая структура предотвращает образование тиристорного эффекта и расширяет возможности по противодействию влиянию ИИКП, которые вызывают деградацию характеристик АЦП (рис. 1).

При использовании КМОП-КНИ-структуры так называемого 1-го типа, в которой основания сток/истоковых областей прилегают к “скрытому” диэлектрику, отделяющему верхний приборный слой (слой, в котором реализуются схемные элементы: транзисторы, резисторы, конденсаторы и т.д.) от р-подложки, токи утечки сток/истоковых рп-переходов оказываются существенно ниже по сравнению с обычной КМОП-структурой на объемном кремнии. Благодаря этому заряды на переключаемых конденсаторах (рис. 1, а) в режиме хранения сохраняются дольше и, соответственно, долговременная стабильность точностных характеристик АЦП улучшается. Для

достижения дополнительного эффекта размеры ключевых МОП-транзисторов (сток/истоковых областей) стараются выбирать как можно меньше, а емкости конденсаторов, наоборот, как можно больше. Однако такой подход приводит к снижению частоты преобразования АЦП, что отрицательно сказывается на производительности БА.

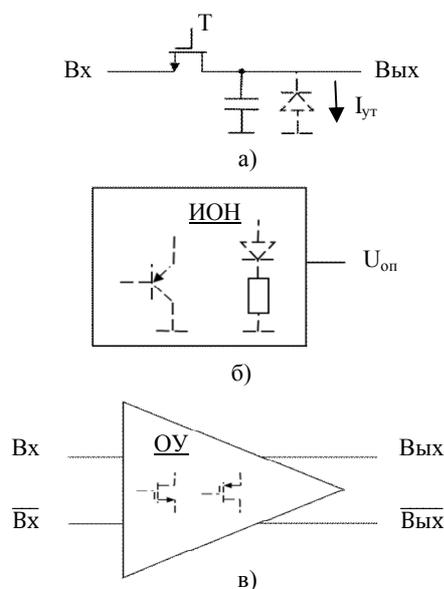


Рис. 1. Иллюстрация механизмов деградации характеристик АЦП:

- а) – образование утечек в сток/истоковых рп-переходах;
- б) – деградация характеристик рпр-транзисторов и диодов в источниках опорного напряжения (ИОН); в) – деградация характеристик НМОП и РМОП-транзисторов в операционных усилителях (ОУ)

Изложенное выше объясняет тот факт, что в космической аппаратуре до сих пор широко используют низкочастотные АЦП с архитектурами “двойного наклона” и “рекурсивного” типа [3]. В то же время, следует отметить, что такие архитектуры позволяют существенно снизить потребляемую мощность многоразрядных АЦП и в этом смысле их применение является оправданным. Тем не менее, задача повышения частоты преобразования АЦП (особенно

Кононов Владимир Сергеевич – ОАО «СКТБ ЭС», канд. техн. наук, науч. сотрудник, тел. 8(473) 223-46-79

многозарядных) для БА космического применения является чрезвычайно актуальной.

Целью данной статьи является разработка метода повышения точности и стойкости к воздействию ИИКП КМОП-КНИ-АЦП с высокой частотой преобразования.

По мнению ряда разработчиков космической БА в такой аппаратуре целесообразно использовать АЦП с частотами преобразования 200-1000 МГц и разрядностью не менее 12-16 бит. Однако наиболее распространенные АЦП с такими характеристиками имеют конденсаторную архитектуру и потребляют около 1,5-2,5 Вт, что по соображениям, изложенным выше, делает их малоприменимыми для космической БА, тем более, если учесть необходимость резервирования.

В качестве альтернативы предлагается использовать бесконденсаторную архитектуру, которая обеспечивает увеличение разрядности до 12-14 бит и частоты преобразования до ~ 1 ГГц [4-6]. Термин “бесконденсаторная” в данном случае означает отсутствие переключаемых конденсаторов, которые в так называемых конденсаторных АЦП используются для хранения промежуточной информации в виде заряда на конденсаторах.

Основная идея бесконденсаторной архитектуры заключается в устранении влияния утечек тока на точность преобразования АЦП и в использовании двух важных обстоятельств, которые рассматриваются ниже.

Первое обстоятельство основано на том, что в бесконденсаторной архитектуре количество внутренних аналоговых блоков, в первую очередь высокоточных ОУ, существенно меньше по сравнению с конденсаторной архитектурой. Если сравнить архитектуры типичного конвейерного АЦП [3] и бесконденсаторного АЦП [4-6], то можно увидеть, что в каждой секции конвейерного АЦП для вычисления ошибки преобразования используется высокоточный ОУ. Например, в 12-разрядном конвейерном АЦП количество таких ОУ может достигать 12-ти, в то время как в бесконденсаторном АЦП аналогичной разрядности [6] их всего 3 (рис. 2).

При этом в 8-разрядной секции АЦП высокоточные ОУ не применяются по принципиальным соображениям. Вместо них используются так называемые складывающие усилители [7] (в английской терминологии – folding), требования к точности которых существенно ниже по сравнению с ОУ.

В результате при разработке бесконденсаторных АЦП у разработчиков оказывается

больше возможностей для повышения точности ОУ, достижение которой обычно сопровождается увеличением потребляемой мощности. Однако при малом количестве ОУ это обстоятельство не приводит к заметному увеличению потребляемой мощности АЦП в целом.

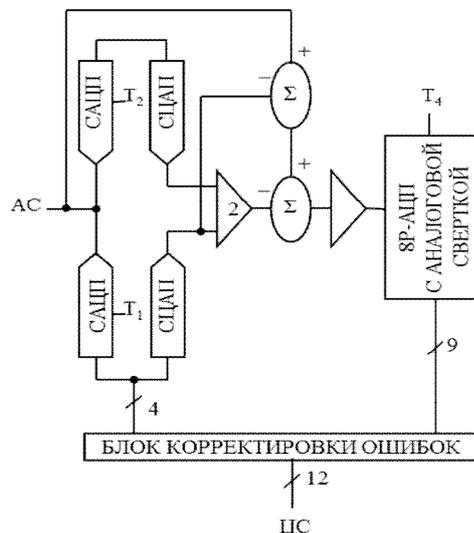


Рис. 2. Блок-схема 12-разрядного бесконденсаторного КМОП-АЦП:

АС – аналоговый сигнал; ЦС – цифровой сигнал

Второе обстоятельство, упомянутое выше, основано на использовании метода повышения точности преобразования, который заключается в многократном дублировании процедуры свертывания преобразуемой информации в процессе преобразования [5, 6]. Такой подход, как будет показано ниже, напоминает так называемое структурное резервирование, часто используемое для повышения сбое- и отказоустойчивости БА [1]. Однако в отличие от традиционного резервирования БА на постоянной основе или путем замещения избыточными блоками, находящимися в “спящем” режиме до отказа основных блоков, в бесконденсаторной архитектуре АЦП все блоки, реализующие упомянутую процедуру свертывания, не являются избыточными. При этом отказ одного или нескольких таких блоков при попадании в них одиночных частиц космического происхождения с высокой долей вероятности не приведет к сбою. Сбой произойдет только при отказе всех блоков, что маловероятно. В данном случае можно ожидать только некоторого ухудшения точности преобразования. Однако, если учесть, что бесконденсаторная архитектура на практике предполагает использование более высокой частоты дискретизации и 4-6-кратного дублирования процедуры свертывания, ожидаемые потери точности будут незначительными.

Для иллюстрации предлагаемого подхода

воспользуемся блок-схемой и временной диаграммой синхросигналов 5-разрядной секции 8-разрядного бесконденсаторного АЦП с одним каналом свертывания преобразуемой информации [5] (рис. 3).

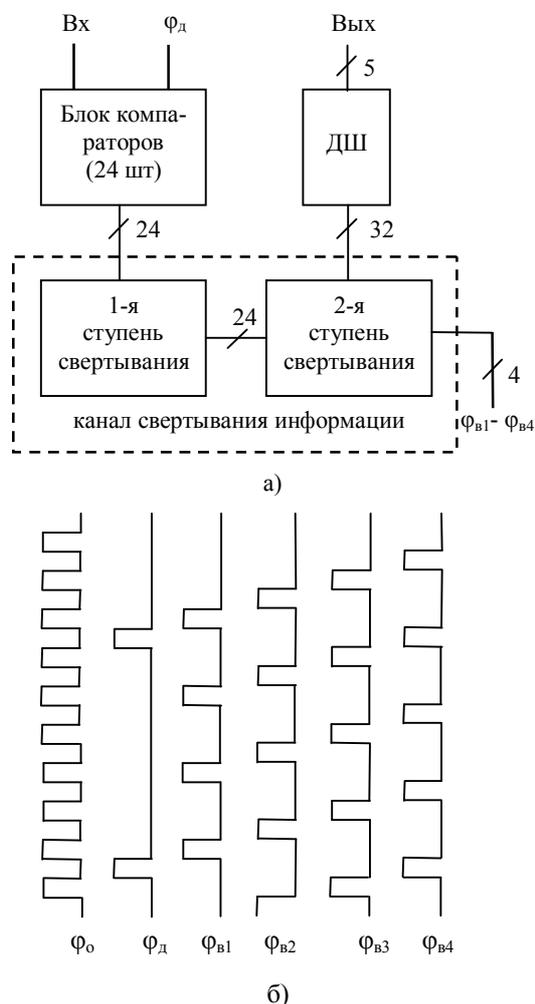


Рис. 3. Блок-схема 5-разрядной секции 8-разрядного бесконденсаторного АЦП (а) и временная диаграмма синхросигналов (б):

ДШ – дешифратор;  $\phi_0$  – основной (внешний) синхросигнал;  $\phi_d$  – сигнал дискретизации;  $\phi_{v1}$ - $\phi_{v4}$  – сигналы выборки информации из последней ступени свертывания

Как видно из диаграммы (рис. 3, б), частота дискретизации в 12 раз ниже частоты выборки, которая в свою очередь в 2 раза выше частоты основного синхросигнала. При работе с монотонными входными сигналами в обычных условиях эксплуатации такая диаграмма обеспечивает приемлемую точность и устойчивость преобразования. Однако при работе с быстроизменяющимися входными сигналами используемое соотношение частот дискретизации и основного синхросигнала является неоправданным с точки зрения обеспечения высокой точности преобразования. В контексте проведенного обсуждения архитектура (рис. 3, а) и вре-

менная диаграмма (рис. 3, б) не в полной мере отвечают требованиям космического применения.

Для устранения отмеченного недостатка в исходную 5-разрядную секцию (рис. 3, а) необходимо добавить 5 дополнительных каналов свертывания информации (рис. 4), работа которых синхронизируется сигналами дискретизации  $\phi_{d1}$ - $\phi_{d6}$ , а выборка преобразованной информации производится как и в первом случае по сигналам  $\phi_{v1}$ - $\phi_{v4}$ .

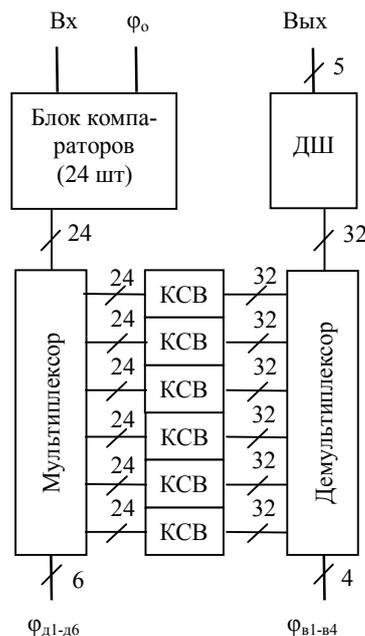


Рис. 4. Блок-схема модифицированной 5-разрядной секции АЦП:  
КСВ – канал свертывания информации;

В принципе достаточно добавить 3 дополнительных канала. Однако в этом случае фазовый сдвиг сигналов дискретизации станет равным 1,5 периодам основного синхросигнала, что усложнит разработку блока синхронизации. При 5 дополнительных каналах такая необходимость не возникает. Более того, выборка информации по сигналам  $\phi_{v1}$ - $\phi_{v4}$  будет точнее и достовернее. Подробное объяснение этого эффекта выходит за рамки данной статьи.

Рассмотренная модификация не нарушает принцип построения бесконденсаторной архитектуры, согласно которому в течение одного периода дискретизации обеспечивается выполнение процедур свертывания информации и формирования текущих термокодов на входе и выходе каждого канала. При этом потребляемая мощность 5-разрядной секции АЦП увеличивается незначительно, так как эта мощность в основном потребляется блоком компараторов.

Использование модификации (рис. 4) в со-

ставе 12-разрядного АЦП привело к дополнительному повышению его точности. Этот эффект объясняется тем, что в исходном 12-разрядном АЦП (рис. 2) обмен информацией между блоком прогноза и 5-разрядной секцией с одним каналом свертывания (рис. 3, а) происходит на частоте дискретизации, которая в 6 раз ниже частоты основного синхросигнала. При быстром изменении входного сигнала трудно ожидать высокой точности вычисления прогноза на такой частоте.

В модифицированном 12-разрядном АЦП обмен информацией между блоком прогноза и 5-разрядной секцией (рис. 4) происходит на частоте основного синхросигнала. Поэтому точность прогнозирования и, следовательно, точность АЦП в целом будет выше.

**Выводы.** Предложенный метод повышения точности и стойкости к воздействию космической радиации, основанный на использовании бесконденсаторной архитектуры КМОП-КНИ-АЦП с малым количеством операционных усилителей и многократным дублированием процедур дискретизации входного сигнала и свертывания преобразуемой информации, является более эффективным по сравнению с известными методами.

Литература

1. Анашин В.С. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на

бортовую аппаратуру космических аппаратов [Текст] / В.С. Анашин, В.В. Бодин, В.Ф. Герасимов [и др.]; под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.

2. Raymond J.P. Comparison of neutron, proton and gamma ray effects in semiconductor devices [Text] / J.P. Raymond, E.L. Petersen // IEEE Trans. on Nucl. Sci. – 1987. – V. 34. – P. 1622-1628.

3. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование [Текст] : монография / У. Кестер; пер. с англ. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.

4. Рембеза С.И. Высокоскоростной безконденсаторный КМОП-АЦП с интерполирующими защелками и реверсируемым тактированием [Текст] / С.И. Рембеза, В.С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №2. – С. 23-26.

5. Рембеза С.И. Цифровое прогнозирование входного аналогового сигнала в 16-разрядном КМОП-АЦП с КНИ-подложкой [Текст] / С.И. Рембеза, В.С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – №2. – С. 27-32.

6. Рембеза С.И. 12-разрядный безконденсаторный КМОП-АЦП с КНИ-структурой [Текст] / С.И. Рембеза, В.С. Кононов // Моделирование систем и процессов. – Воронеж. – 2013. – №4. – С. 53-55.

7. Taft R.C. A 1,8-V 1,6-GS/s 8-b Self-calibrating Folding ADC with 7,26 ENOB at Nyquist frequency [Text] / R.C. Taft, C.A. Menkus, M.R. Tursi [et al.] // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2004. – Vol. 39. – №12. – P. 2107-2115.

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

## TECHNIQUE FOR INCREASE OF ACCURACY AND RADIATION HARDNESS OF CMOS-SOI-ADC WITHOUT SWITCHED CAPACITORS FOR SPACE APPLICATIONS

V.S. Kononov

Basic mechanisms of CMOS-SOI-ADC degradation under impact of cosmic ionizing radiation are considered. A technique for increase of accuracy and radiation hardness of conversion in 12-bit CMOS-SOI-ADC without switched capacitors for space applications is described

Key words: ionizing radiation, ADC, CMOS-SOI

## МОДЕЛЬ МАСШТАБИРУЕМОГО LDPC-ДЕКОДЕРА НИЗКОЙ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ВЫСОКОГО УРОВНЯ

А.В. Башкиров, Л.Н. Коротков, М.В. Хорошайлова

В данной статье представлено описание и моделирование масштабируемого LDPC-декодера следующего поколения беспроводной сети системы на кристалле (SoC). Методика основана на синтезе высокого уровня: PICO (program-in chip-out) был использован для получения эффективного RTL непосредственно из последовательного алгоритма C. Предложено две параллельных архитектуры LDPC-декодера: 1) декодирование архитектуры послойно с масштабируемым параллелизмом, и 2) многослойная конвейерная архитектура декодирования для достижения более высокой пропускной способности

Ключевые слова: кодирование, RTL-код, LDPC-декодер, алгоритм декодирования, матрица проверки на четность

**Введение.** Для обеспечения повсеместной мобильной связи, беспроводная связь переживает быстрый рост. Непрерывно меняющиеся и развивающиеся беспроводные спецификации представляют собой серьезную проблему для разработчиков, чтобы как можно быстрее реализовать эти весьма сложных алгоритмы на аппаратной платформе, сохраняя при этом площадь кристалла и эффективность питания. В качестве конкурентоспособной схемы кодирования для беспроводных систем следующего поколения, рассматриваются коды с низкой плотностью проверок на четность (LDPC) для многих систем 4G, потому что обладают отличной производительностью коррекции ошибок и высоко параллельной схемой декодирования. Удовлетворение скорости передачи данных и ограничения потребляемой мощности в беспроводных телефонах – является сложной задачей разработать LDPC декодер высокой производительности при низкой стоимости площади кристалла с уменьшенным временем реализации.

Поскольку разные стандарты используют различные коды LDPC, очень важно, чтобы модель LDPC декодера была гибкой, которая могла бы быть адаптирована к различным условиям использования. Для решения этой проблемы, некоторые эффективные архитектуры ASIC были предложены в различной литературе для достижения гибкости декодирования нескольких LDPC кодов. Тем не менее, одно ограничение этих частично-параллельных архитектур, что уровень параллелизма должен быть на суб-циркулянтном уровне. В этой статье рассмотрим модель параллельных реализаций LDPC декодеров с использованием методологии синтеза высокого уровня (HLS). Здесь предлагается два параллельных LDPC алгоритма декодирования, которые могут быть использованы

в HLS для получения площади и энергоэффективного оборудования.

**Платформа PICO.** Разработчики PICO ("Program In, Chip Out") назвали такой подход архитектурным синтезом, чтобы отделить его от поведенческого и логического синтеза.

Для приложения, написанного на C, автоматически строится множество проектов и выбирается оптимальный в смысле Парето, а также строится структурное описание VHDL-компонент и скомпилированный код для программного обеспечения.

Пользователь предоставляет описание на языке C их алгоритма наряду с требованиями к производительности и функциональных входных испытаний. Система PICO автоматически генерирует синтезируемый RTL, модели SystemC на разных уровнях точности, а также сценарии в синтезе и моделировании. PICO основан на передовом распараллеливающем компиляторе, который находит и использует параллелизм на всех уровнях в коде C.

PICO обеспечивает иерархическую возможность проектирования многоуровневых сложных конструкций, таких как LDPC декодеров и блочно-клокового стробирования, чтобы минимизировать мощность на уровне архитектуры. Качество генерируемого RTL является конкурентоспособным с ручным дизайном, и RTL гарантированно будет функционально эквивалентно алгоритмическому входному описанию C. Сформированный RTL потом может быть принят через стандартные моделирования, синтеза, размещения и инструменты трассировки и интегрирован в SoC через автоматически конфигурируемые скрипты.

**Алгоритм декодирования** Двоичный LDPC код-это линейный блочный код с разреженной матрицей проверки на четность  $M \times N$ :  $H \cdot x^T = 0$ , где  $x$  – это кодовое слово, а  $H$  можно рассматривать как двудольный граф, где каждый столбец и строка в  $H$  представляют собой переменный узел и узел проверки, соответственно. В этой статье мы остановимся на специальном классе кодов, так называемых блок-структурированные коды LDPC, которые принимаются многими новыми беспроводными стандартами. Как показано на рис. 1, блок-структурированную матрицу проверки на четность

Башкиров Алексей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-952-543-99-88, e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru)

Коротков Леонид Николаевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. 8(473) 243-77-06, e-mail: [kipr@vorstu.ru](mailto:kipr@vorstu.ru)

Хорошайлова Марина Владимировна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-920-415-15-65, e-mail: [pmv2205@mail.ru](mailto:pmv2205@mail.ru)

можно рассматривать как двумерный массив квадратных подматрицы. Каждая субматрица либо нулевая матрица, либо циркулянт  $z$  по  $z$  веса 1. Размер матрицы  $N$  различается для разных стандартов: например максимальная длина блока 2304 для IEEE 802.16e и 1944 для IEEE 802.11n. Для описания алгоритма декодирования, определим  $N_m$  как набор переменных узлов, соединенных с проверочным узлом  $m$ , и  $N_m \setminus n$  как набор  $N_m$  с исключенным уз-

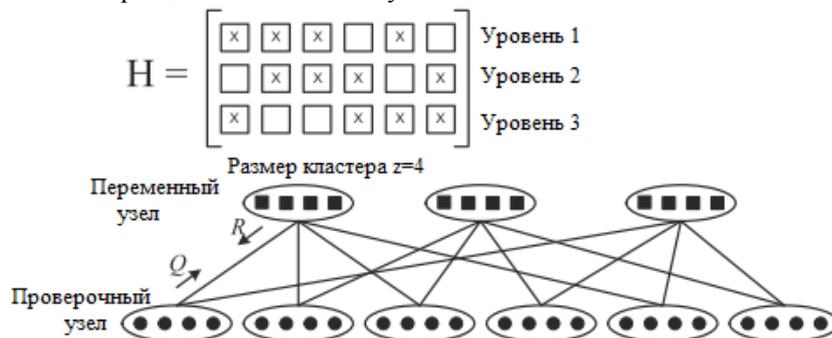


Рис. 1. Пример  $3 \times 6$  блоков структурированной матрицы проверки на четность.

<p>Алгоритм 1. Многослойный масштабируемый алгоритм min-sum</p> <p><b>Инициализация:</b> <math>\forall(m,n)</math> с <math>H(m,n)=1</math>, заданы</p> $R_{mn}=0, \quad P_n = \frac{2y_n}{\sigma^2}$ <p><b>Итерация:</b></p> <p><b>for</b> iteration <math>i = 1</math> to <math>I</math> <b>do</b></p> <p>  <b>for</b> layer <math>l = 1</math> to <math>L</math> <b>do</b></p> <p>    Этап 1) Чтение и предварительная обработка: <math>\forall(m,n)</math> с <math>H^l(m,n)=1</math>:</p> <p>      Чтение <math>P_n</math> и <math>R_{mn}</math> из памяти</p> <p>      Расчет <math>Q_{mn} = P_n - R_{mn}</math></p> <p>    Этап 2) Декодирование и запись обратно: <math>\forall(m,n)</math> с <math>H^l(m,n)=1</math>:</p> $R'_{mn} = 0.75 \times \prod_{j \in N_m \setminus n} \text{sign}(Q_{mj}) \times \left( \min_{j \in N_m \setminus n}  Q_{mj}  \right)$ <p>    <math>P'_n = Q_{mn} + R'_{mn}</math></p> <p>    Запись <math>P'_n</math> и <math>R'_{mn}</math> обратно в память</p> <p>  <b>end for</b></p> <p><b>end for</b></p> <p><b>Принятие решения:</b> <math>\hat{x}_n = \text{sign}(P'_n)</math></p>
---

## Разработка архитектуры.

### А. Первый слой архитектуры декодирования

В алгоритме 1, одна полная итерация делится на  $L$  суб-итераций, где каждая суб-итерация соответствует обработке данных одного слоя. В традиционной частично параллельной архитектуре деко-

лом  $n$ .  $R_{mn}$  и  $Q_{mn}$  проверочное и переменное сообщения, соответственно.  $P_n$  – апостериорная вероятность логарифмического отношения правдоподобия переменного узла  $n$ .  $H^l$  –  $l$ -й уровень  $H$ .  $y_n$  – полученные данные канала.  $\sigma^2$  – это дисперсия шума. Слоистый масштабируемый алгоритм декодирования min-sum является обобщенным в алгоритме 1.

каждая  $z \times z$  подматрица рассматривается как блок, в пределах которого все вовлеченные проверки на четность обрабатываются параллельно с помощью  $z$  числа декодирования ядра. Каждое ядро не зависит от всех остальных, так как нет зависимости данных между соседними рядами проверки. Параллелизм только на суб-циркулянтном уровне, потому что легче рассматривать каждую циркулянтную суб-матрицу в виде целого блока обработки. Тем не менее, различные системы требуют различных уровней параллелизма. Модель СБИС LDPC декодеров с масштабируемым параллелизмом в основном отсутствует в литературе. Поскольку проверочные матрицы, определенные в различных беспроводных стандартах, могут быть очень разными, это создает проблемы для ручного кодирования RTL дизайнеров.

В качестве примера рассмотрим WiMax LDPC декодер, где  $z$  находится между 24 и 96. Структура на рис. 2а) соответствует традиционной архитектуре WiMax LDPC декодера, где  $z = 96$  генерируемых ядер для обеспечения максимальной параллельности. Директива "#pragma unroll" используется в программе C, чтобы сообщить компилятору PICO развернуть этот цикл. Рис. 2б) показывает способ частично развернутого цикла: внутренний цикл разворачивается на 48, во внешнем контуре 2 итерации, что соответствует конвейерным данным более 48 ядер, последовательно, по 2 раза. Таким образом, несколько уровней параллелизма может быть реализовано, чтобы приспособить производительность согласно требованию приложений.

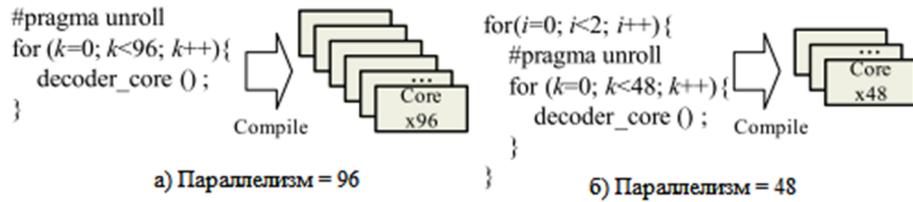


Рис. 2. Масштабируемый канал передачи данных по PICO

Для реализации алгоритма 1 в аппаратуре, предложим двухэтапный послойный алгоритм планирования, который показан на рис. 3. Это последовательный блок алгоритма планирования: данные в каждом слое обрабатываются блок-столбец за блок-колонка. Ядро 1 первым считывает вектор (размер от 1 до  $z$ )  $P_n$  и  $R_{mn}$  сообщений из памяти, вычисляет  $Q_{mn}$ , а затем находит минимальное и второе минимальное значения среди массива  $Q_{mn}$  для каждой строки  $m$  в течении всей колонки  $n$ . Ядро 2 рассчитывает новые значения  $P_n'$  и  $R_{mn}'$  на основе двух минимальных значений, полученных ядром 1, и записывает новые  $P_n'$  и  $R_{mn}'$  значения обратно в память. Значения  $Q_{mn}$ , рассчитанные в ядре 1, хранятся в массиве, чтобы они могли быть повторно использованы ядром 2.

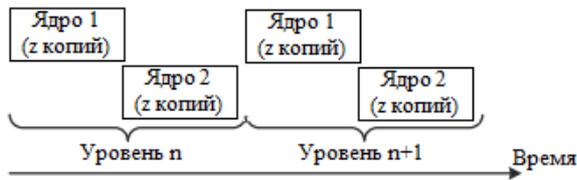


Рис. 3. Послойный алгоритм декодирования

На рис. 4 показана соответствующая блок-схема генерируемой аппаратной архитектуры PICO. Верхний уровень LDPC decoder() переберет по  $I$  итераций. В каждой итерации, перебирает по  $L$  слою проверочной матрицы, и называется decoder core1() и decoder core2(). Функция верхнего уровня может вернуться раньше, если все проверки четности удовлетворены или достигнуто максимальное число итераций. Оба сообщения  $P$  и  $R$  представлены в формате 8-ми разрядного числа с фиксированной точкой. Все массивы, представленные в блок-схеме, объявлены как глобальные массивы  $C$ , синтезируемые в регистровых файлах, реализованных в триггере.

### Б. Многослойная конвейерная архитектура декодера

В архитектуре каждого слоя, использование ядра не велико (около 50%, как показано на рис. 3). Тем не менее, можно делать конвейерную обработку между слоями, так что в то время как ядро 2 работает на текущем слое, ядро 1 может начать работать на следующем слое матрицы, как показано на рис. 5.

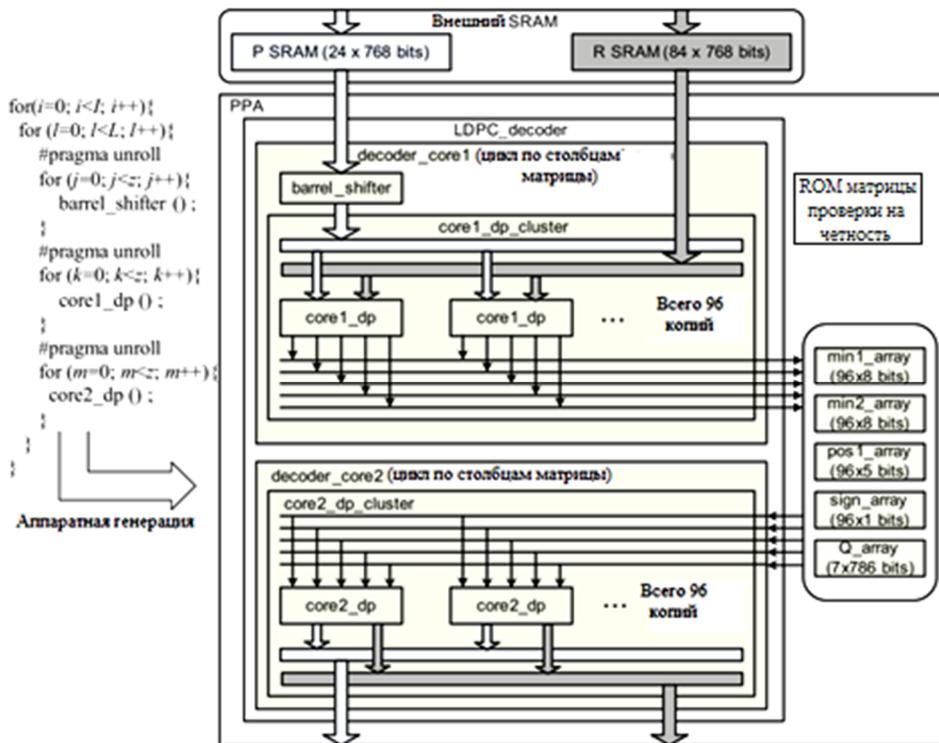


Рис. 4. Блок-схема аппаратной архитектуры PICO для каждого слоя декодирования (2304, 1/2) WiMax LDPC кода

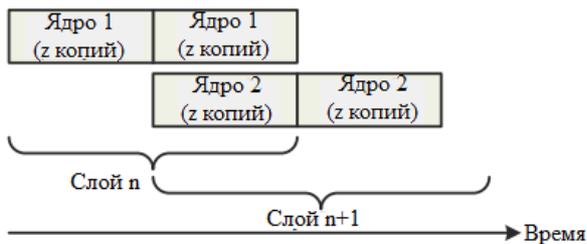


Рис. 5. Многослойный алгоритм конвейерного декодирования

Для того, чтобы конвейер ядра 1 и ядра 2, дополнить логикой обнаружения конфликта необходимо вставить блок циклов, чтобы избежать помех в конвейере, где ядро 1 считывает  $P_n$  сообщений с места, прежде чем ядро 2 запишет в это место. Чтобы добиться этого, добавим переменную, которая

устанавливается на содержание 1 в бите  $n$ , если и только если записи в  $P_n$  в ожидании ядром 2 для ряда  $m$ . Как ядро 2 записывает каждому  $P_n$ , будет очищать бит  $n$  по табло. Как ядро 1 обрабатывает колонку  $N$ , будет проверять, имеет ли табло 1 в бите  $n$ . Если это так, то ядро 1 ничего не будет делать для этой итерации, таким образом, ожидая пока ядро 2 запишет  $P_n$  перед чтением из  $P_n$ . На рис. 6 показана блок-схема двухслойной конвейерной PICO аппаратной архитектуры. Эта архитектура похожа на архитектуру каждого слоя за исключением того, что каждое ядро теперь имеет собственные копии массивов, и  $Q$  массив был заменен  $Q$  FIFO.

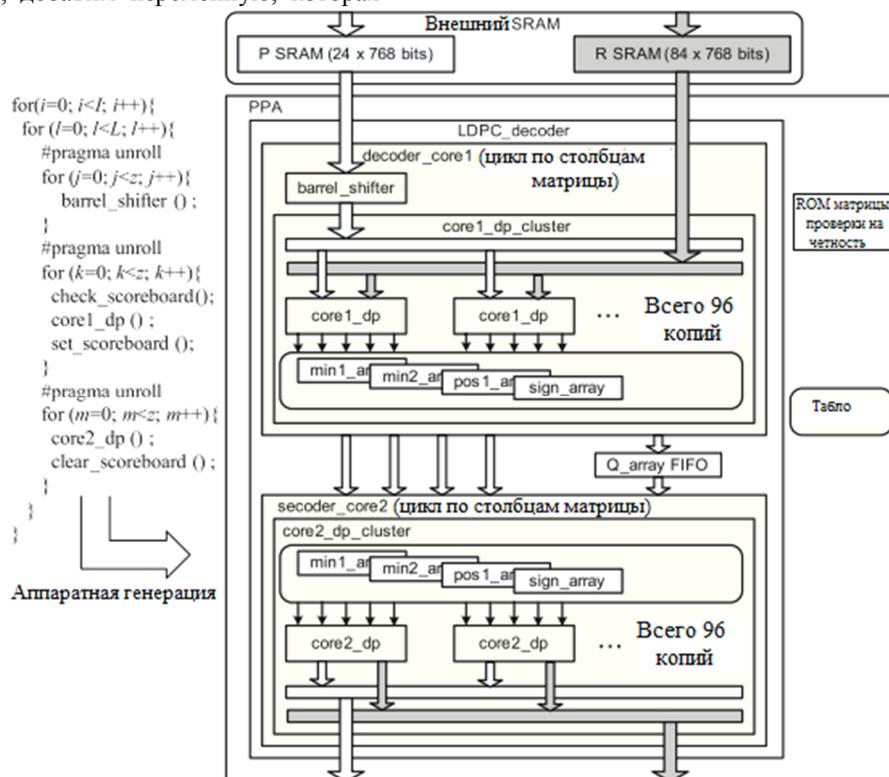


Рис. 6. Блок-схема аппаратной архитектуры PICO для двухслойного конвейерного декодирования (2304, 1/2) WiMax LDPC кода

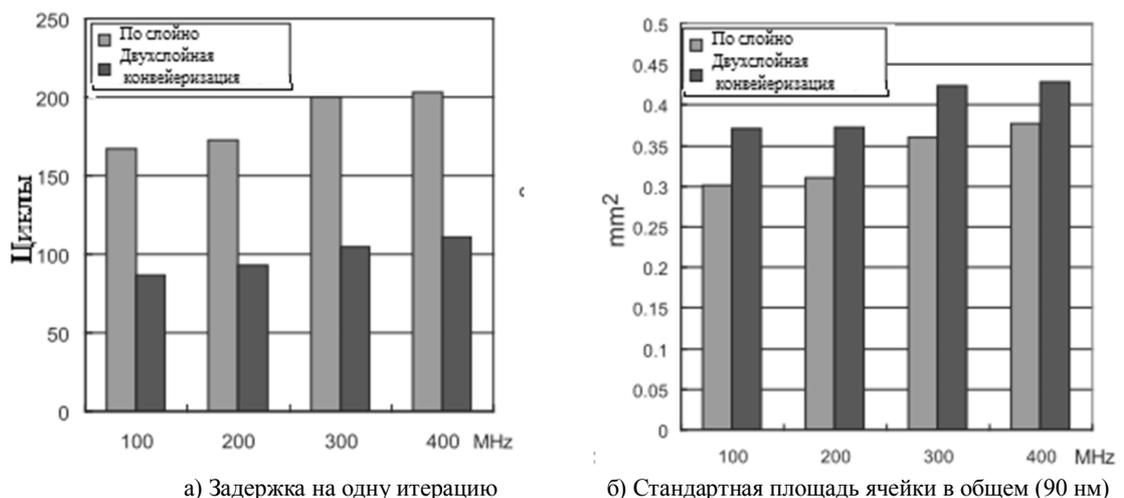


Рис. 7. Сравнение задержки и площади (90 нм) двух аппаратных PICO архитектур, синтезированных для различных целей

Рис. 7 сравнивает латентность и площадь этих двух архитектур. При анализе RTLs генерируются PICO и синтезируются с использованием Synopsys Design Compiler по технологии 90nm. Значение площадей, показанных на рис. 7 для полных стандартных ячеек. Это дает верное сравнение, так как две архитектуры требуют такое же количество внешних SRAMs. На рис. 7 видно, что латентность и площадь увеличиваются при увеличении тактовой частоты. Ожидается, что это потому, что PICO будет регулировать конструкции и, обретает лучшее решение для данной частоты.

**Результаты реализации и сравнение.** Гибкий LDPC декодер, который полностью поддерживает стандарт IEEE 802.16e WiMax, был описан в PICO. Затем инструмент PICO использовали для получения Verilog RTL для предлагаемой двухслойной конвейерной LDPC архитектуры декодера. Генерируемый RTL синтезировали с использованием Synopsys Design Compiler, при помощи Cadence SoC Encounter передали на 90-нм 0.9V 8-металлический слой КМОП технологии.

**Заключение.** Был описан и реализован LDPC декодер высокой производительности и низким питанием на основе PICO синтеза высокого уровня потока. Два параллельных архитектур декодер вводятся и сравниваются. Декодер, который был реа-

лизован на технологии 90 нм CMOS, обеспечивает сравнимые результаты к ручному кодированию конструкции и значительно снижает время разработки.

#### Литература

1. Григорьев В.А. Системы и сети радиодоступа// В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев. М.:ЭкоТрендз, 2005 г.
2. Lamme T., Potter D., Chellis J. CCNA: Cisco certified network associate//Network press, 1998, p. 538.
3. Башкиров, А.В. Основы помехоустойчивого кодирования, основные преимущества и недостатки алгоритмов декодирования [Текст] / А.В. Башкиров, И.В. Остроумов, И.В. Свиридова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. -№ 2. – С. 20-22.
4. Камайкин А.Г. Корпоративные сети Wi-Fi// А.Г. Камайкин, И.Е. Осипов, О.Е. Шумарин, Технологии и средства связи. 2006. № 1.

Воронежский государственный технический университет

## MODEL LDPC LOW POWER SCALABLE DECODER USING THE HIGH-LEVEL ALGORITHMIC SYNTHESIS

**A.V. Bashkirov, L.N. Korotkov, M.V. Horoshaylova**

This article provides a description and simulation of LDPC decoder scalable next-generation wireless network system-on-chip (SoC). The technique is based on the high-level synthesis: PICO (program-in chip-out) was used to obtain an effective RTL directly from the serial algorithm C. Proposed two parallel architecture LDPC-decoder: 1) decoding architecture with scalable parallel layers, and 2) a multi-layer conveyor decoding architecture to achieve higher throughput

Key words: encoding, RTL-code, LDPC -decoder decoding algorithm, the parity check matrix

## АРХИТЕКТУРЫ БЕСКОНДЕНСАТОРНЫХ КМОП-КНИ-АЦП ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В.С. Кононов

Приведены основные механизмы деградации точностных характеристик КМОП-АЦП. Рассмотрена конструкция источника опорного напряжения с повышенной стойкостью к воздействию одиночных частиц космического происхождения. Предложены архитектуры 8-18-разрядных бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП с напряжением питания 1,8 В и частотой преобразования до 1 ГГц

Ключевые слова: АЦП, КМОП-КНИ, секция, разрядность, деградация

Интерес к разработке бесконденсаторных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) возник из опыта эксплуатации КМОП-АЦП с переключаемыми конденсаторами в составе космической аппаратуры. Было обнаружено, что точностные характеристики таких АЦП существенно деградируют с течением времени, а простое использование структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ) не приводит к принципиальному улучшению наблюдаемой ситуации.

Как было установлено [1], в КМОП-АЦП наблюдаются 3 доминирующих механизма деградации характеристик (рис. 1).

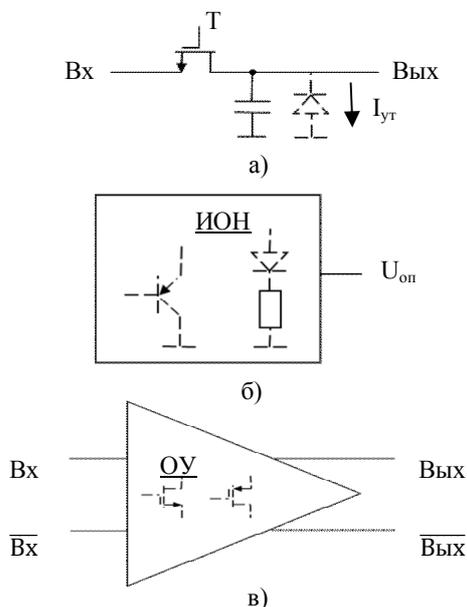


Рис. 1. Иллюстрация механизмов деградации характеристик АЦП:

а) – образование утечек в сток/истоковых рр-переходах;  
 б) – деградация характеристик ррр-транзисторов и диодов в источниках опорного напряжения (ИОН);  
 в) – деградация характеристик КМОП и РМОП-транзисторов в операционных усилителях (ОУ)

Из этих механизмов наибольшую опас-

ность представляет утечка тока в стоковом рр-переходе ключевого МОП-транзистора (рис. 1, а), которая непосредственно влияет на зарядовое состояние переключаемого конденсатора, использующегося для хранения промежуточной информации в процессе аналого-цифрового преобразования. Если механизмы (рис. 1, б, в) можно достаточно успешно компенсировать путем автокалибровки, то предотвратить деградацию стокового рр-перехода в результате старения и воздействия космических излучений не представляется возможным. Поэтому отказ от использования переключаемых конденсаторов в КМОП-КНИ-АЦП является наиболее рациональным, что в итоге привело к появлению термина «бесконденсаторные КМОП-АЦП».

Вернемся, однако, к рассмотрению механизмов (рис. 1, б, в). В бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП эти механизмы являются также доминирующими. Для минимизации их влияния на точностные характеристики КМОП-КНИ-АЦП кроме упомянутой выше автокалибровки необходимы специальные решения как, например, решение (рис. 2) для ИОН [1].

Основная идея этого решения основана на использовании опорных диодов (диоды  $D_1$ ,  $D_2$  на рис. 2, а), созданных непосредственно в р-подложке под скрытым окислом (слой 9 на рис. 2, б, в). Такой подход позволяет существенно уменьшить распределенные сопротивления n-областей диодов (область 13 на рис. 2, в), которые создаются до формирования транзисторов и других компонентов в тонком слое кремния (слой 6 на рис. 2, б), и, благодаря этому, стабилизировать характеристики диодов при более высоких прямых токах, что снижает чувствительность диодов к воздействию одиночных частиц космического происхождения.

Так как в ИОН используется ОУ (рис. 2, а), то с учетом (рис. 1, в) становится очевидным, что без создания высокоточных ОУ невозможно обеспечить на приемлемом уровне точност-

ные характеристики не только ИОН, но и АЦП в целом.

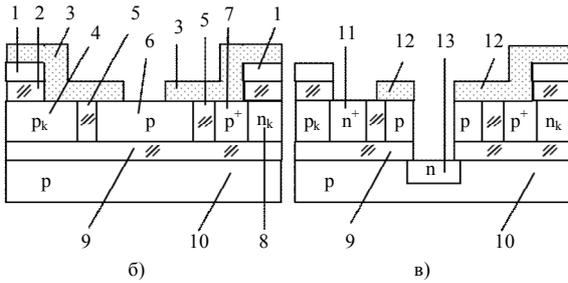
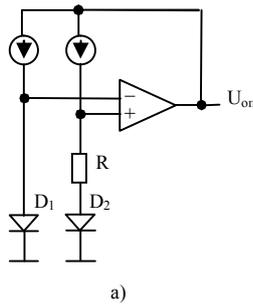


Рис. 2. Блок-схема ИОН (а) и полупроводниковая структура ИОН до (б) и после (в) формирования p-кармана:

1 – поликремниевый затвор; 2 – подзатворный окисел; 3 – первый слой фоторезиста; 4 – карман NМОП-транзистора; 5 – глубокий окисел; 6 – тонкий слой кремния; 7 – сток РМОП-транзистора; 8 – карман РМОП-транзистора; 9 – скрытый окисел; 10 – несущая подложка; 11 – сток NМОП-транзистора; 12 – второй слой фоторезиста; 13 – диодная p-область (p-карман)

Техника достижения высокой точности ОУ и ее связь с точностными характеристиками АЦП хорошо известны [2].

Целью данной статьи является оценка предельно достижимой разрядности бесконденсаторного АЦП исходя из требуемого коэффициента усиления ОУ на нижней ( $A_0$ ) и верхней ( $A_\gamma$ ) частотах в полосе до  $\sim 1$  ГГц.

Так как  $A_0$  во многом определяет точность всего АЦП, а  $A_\gamma$  – разрядность его секций [3]:

$$A_0 \geq 2^{N-B+1} \cdot A_\gamma, \quad (1)$$

$$A_\gamma \cong \frac{1}{\gamma}, \quad (2)$$

где  $N$  – разрядность АЦП,  $B$  – разрядность секции АЦП, к выходу которой подключен ОУ, а  $\gamma$  – коэффициент обратной связи в ОУ, то с учетом (1), (2) развитие бесконденсаторных архитектур выглядит следующим образом (рис. 3).

Например, 12-разрядный АЦП можно создать на основе двухсекционной архитектуры, в которой в качестве первой секции будем использовать 8-разрядный АЦП [4], а в качестве второй секции – 5-разрядный АЦП из того же 8-разрядного АЦП (рис. 3, а).

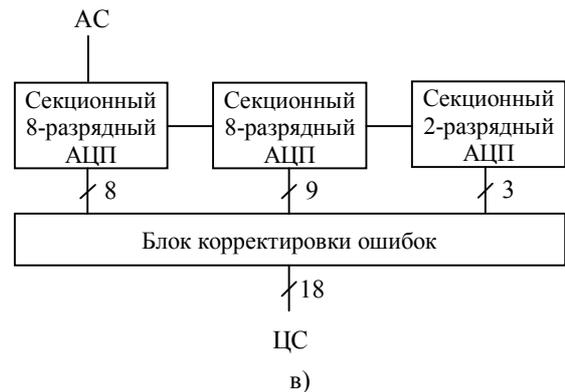
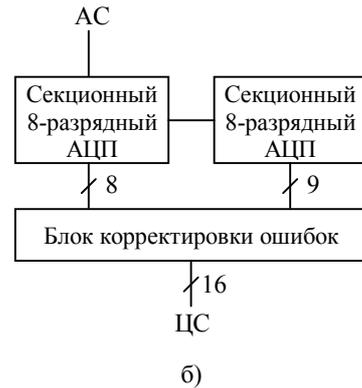
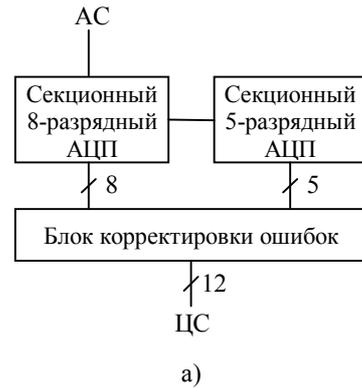


Рис. 3. Блок-схемы многоразрядных бесконденсаторных КМОП-КНИ-АЦП: АС – аналоговый сигнал; ЦС – цифровой сигнал

Оценим «жизнеспособность» архитектуры (рис. 3, а). Пусть входная шкала 8-разрядной секции составляет 0-1,6 В, а 5-разрядной секции – 0-250 мВ. При этих условиях коэффициенты усиления  $A_0$  и  $A_\gamma$  ОУ в 8-разрядной секции (на рис. 3, а не показан) с учетом (1), (2) должны составлять

$$A_\gamma \cong \frac{250}{67} \cong 3,7; \quad (3)$$

$$A_0 \geq 2^{10-5+1} \cdot 3,7 \cong 237, \quad (4)$$

что для 0,18 мкм-КМОП-КНИ-технологии и 2-ступенчатого ОУ на основе, например, сложного каскода [2] не представляет больших трудностей.

В выражении (4) при вычислении  $A_0$  при-

нято  $N = 10$  и  $B = 5$ , так как требования по точности ОУ определяются на самом деле двумя 5-разрядными секциями, находящимися в непосредственной конвейерной связи. При этом одна из них входит в состав 8-разрядной секции.

Из проведенных рассуждений естественным образом напрашивается архитектура (рис. 3, б).

Если учесть, что шаг изменения опорных напряжений во второй секции составляет  $\sim 10$  мВ, то при  $A_{\gamma} \cong 3,7$  появляется возможность использования 2-разрядной третьей секции (рис. 3, в).

С учетом этой секции требование к  $A_0$  для

ОУ на выходах первых двух секций 18-разрядного АЦП возрастает до

$$A_0 \geq 2^{12-5+1} \cdot 3,7 \cong 947, \quad (5)$$

что вполне приемлемо.

В (5) учтено, что общая разрядность секций, находящихся в непосредственной конвейерной связи, повысилась до 12 бит.

В заключение более подробно остановимся на технике вычисления ошибок преобразования в секциях АЦП на рис. 3.

Для упрощения рассуждений воспользуемся блок-схемой гипотетического 10-разрядного АЦП, приведенного на рис. 4.

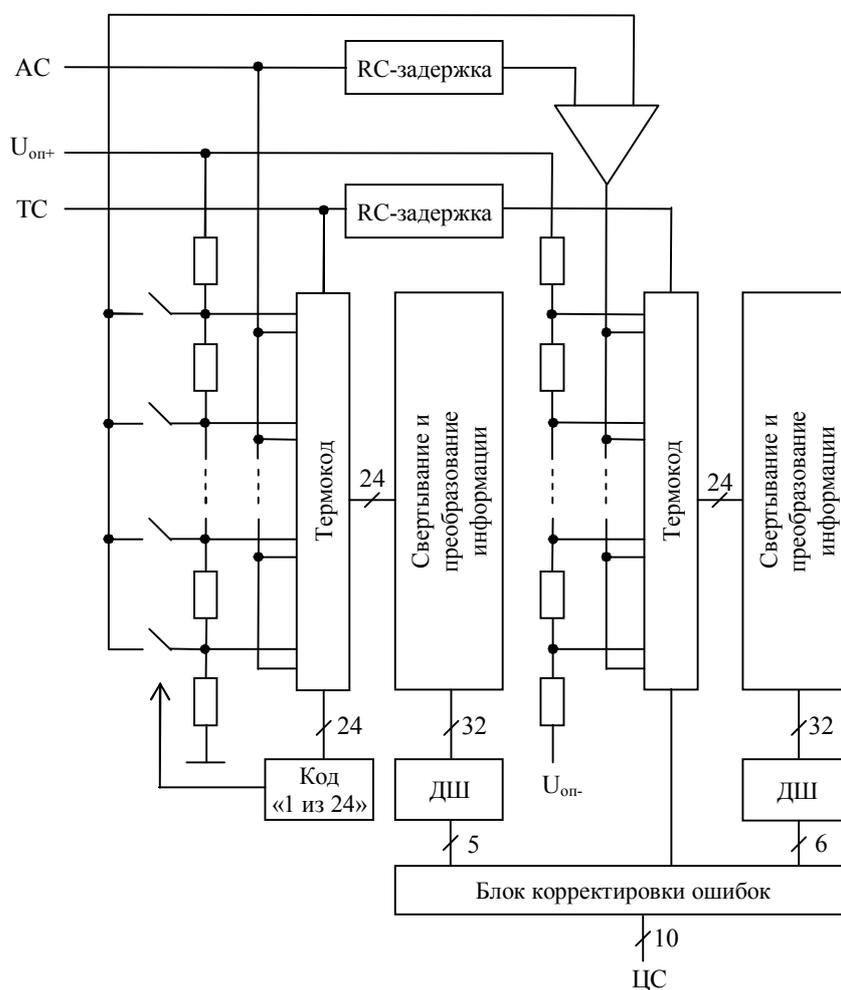


Рис. 4. Иллюстрация техники вычисления ошибок преобразования:

ДШ – дешифратор; ТС – тактовый сигнал;  $U_{оп+}$  и  $U_{оп-}$  – опорные напряжения верхнего и нижнего уровней

На этом рис. 5-разрядные секции почти такие же, как на рис. 3. Отличие состоит только в том, что на рис. 4 по отмеченным выше соображениям обе секции имеют униполярные входы, хотя на практике такие входы чаще бывают биполярными. Однако в контексте намеченного обсуждения техники вычисления ошибок пре-

образования это упрощение не имеет принципиального значения.

В результате процесс вычисления ошибки преобразования выглядит следующим образом. При появлении тактового импульса на входе ТС происходит оцифровка аналогового сигнала с помощью 24 компараторов (на рис. 4 не пока-

заны) и появляется термокод, который сразу же передается в блок свертывания и дальнейшего преобразования информации, а также в блок формирования «бегущей» единицы (код «1 из 24»).

В свою очередь сигнал «бегущей» единицы открывает один из ключей цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) на основе опорной цепочки резисторов на входе первой 5-разрядной секции, обеспечивая таким образом передачу соответствующего опорного уровня на один из входов ОУ. При этом на другой вход ОУ подается задержанный аналоговый сигнал, что приводит к появлению на выходе ОУ усиленного сигнала ошибки и началу процесса преобразования информации во второй секции практически одновременно с первой секцией.

Необходимость упомянутой задержки хорошо известна из теории конвейерных АЦП [2]. Здесь следует отметить два важных обстоятельства.

Во-первых, в нашем случае необходимо использовать RC-цепочку на основе поликремниевых резисторов, которые из-за особенностей своей структуры не содержат паразитных рп-переходов и поэтому не могут привести к появлению утечек тока как в случае ключевых МОП-транзисторов.

Во-вторых, RC-цепочка имеет смысл, если внутренняя задержка по цепи «термокод – код «1 из 24» – ЦАП» будет составлять

$$\tau_{\text{вн}} = \tau_{RC} \leq (0,5 - 0,7) \cdot \tau_{\text{и}}, \quad (6)$$

где  $\tau_{\text{вн}}$  – внутренняя задержка,  $\tau_{RC}$  – задержка RC-цепочки, а  $\tau_{\text{и}}$  – длительность тактового импульса. В противном случае амплитуда задерживаемого сигнала будет уменьшаться из-за эффекта интегрирования, что в итоге приведет к ухудшению точности преобразования.

Условие (6) является достаточно жестким

в полосе частот до 1 ГГц. В этом случае минимальная длительность тактового импульса составляет всего 0,5 нс, что дает

$$\tau_{\text{вн}} = \tau_{RC} \cong 0,25 - 0,35 \text{ нс.}$$

Реализация данного требования находится на пределе возможностей имеющейся технологии 0,18 мкм-КМОП-КНИ.

Выход из создавшегося положения можно найти, если воспользоваться техникой чередования [2], которая обеспечивает дополнительное повышение точности преобразования и стойкости к воздействию одиночных частиц космического происхождения и хорошо интегрируется в архитектуру 5-разрядной секции. Однако подробное описание этой техники выходит за рамки данной статьи.

**Выводы.** Возможности стандартной технологии 0,18 мкм-КМОП-КНИ достаточны для создания низковольтных бесконденсаторных АЦП с разрядностью 12-18 бит и частотой преобразования до ~ 1 ГГц.

#### Литература

1. Кононов В.С. Радиационно-стойкие КМОП-КНИ-АЦП разрядностью 12-16 бит и частотой преобразования 100-1000 МГц с автоматической калибровкой [Текст] / В.С. Кононов // Международная конференция «Микроэлектроника 2015» (г. Алушта, Крым, 28 сентября – 3 октября 2015 г.). – М.: Техносфера, 2015. – С. 88-90.
2. Rudy van de Plassche. CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters [Text] / Rudy van de Plassche. – Kluwer academic publishers, 2003. – 588 с.
3. Chunlei Shi. Data converters for wireless standards [Text] / Shi Chunlei, Ismail Mohammed // Kluwer academic publishers, 2002. – 126 p.
4. Рембеза С.И. Высокоскоростной бесконденсаторный КМОП-АЦП с интерполирующими защелками и реверсируемым тактированием [Текст] / С.И. Рембеза, В.С. Кононов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – №2, С. 23-26.

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

## ARCHITECTURES OF CMOS-SOI-ADC WITHOUT SWITCHED-CAPACITORS FOR SPACE APPLICATIONS

V.S. Kononov

Basic mechanisms of CMOS-ADC accuracy degradation are shown. Design of voltage reference hardened to cosmic rays impact is considered. Architectures of 1-GHz 1,8-V 8-18 bits CMOS-SOI-ADC without switched-capacitors are offered

Key words: ADC, CMOS-SOI, section, resolution, degradation

## МИКРОПОЛОСКОВАЯ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩАЯ СХЕМА ДЛЯ СЕТЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ НА ОСНОВЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

А.В. Останков, Н.Н. Щетинин, В.А. Мельник

В статье предложена и на основе электродинамического моделирования исследована микрополосковая реализация четырёхлучевой матрицы Батлера. Матричная схема выполнена с использованием двухшлейфных направленных ответвителей оригинальной топологии и не содержит кроссоверов. Отсутствие кроссоверов и применение отрезков искусственных длинных линий для реализации направленных ответвителей позволило обеспечить сравнительно малые потери в матричной схеме, а также относительно малые габариты и площадь, занимаемую схемой на диэлектрической подложке. Предложенная матричная схема обладает более чем удовлетворительными электрическими характеристиками и предназначена для питания фазированных антенных решеток в системах связи ультравысоких частот

Ключевые слова: антенная решётка, диаграммообразующая схема, матрица Батлера, направленный ответвитель, амплитудно-частотная характеристика

Для управления положением в пространстве диаграммой направленности (ДН) фазированной антенной решётки применяются диаграммообразующие схемы (ДОС). Зачастую ДОС рассматривается как более простая и относительно дешёвая альтернатива системе цифрового диаграммообразования. При этом электрические характеристики ДОС в значительной степени определяют характеристики радиотехнической системы в целом [1].

Наиболее распространёнными являются параллельная (матрица Батлера) и последовательная (матрица Бласса) ДОС [1]. Одним из немаловажных преимуществ матричных вариантов ДОС является возможность их составления из идентичных восьмиполосных устройств, реализованных в виде направленных ответвителей, и набора фиксированных фазовращателей (см., например [2]). На практике по большей части используется ДОС в виде матрицы Батлера [3-5].

Матрица Батлера имеет  $N = 2^m$  входов ( $m$  — целое число) и аналогичное число выходов и запитывает  $N$  излучателей антенной решётки, обеспечивая формирование  $N$  ортогональных лучей. Схема матрицы содержит трёхдецибелльные направленные ответвители и фазовращатели, вносящие рассогласование, а также амплитудные и фазовые погрешности. С увеличением числа ортогональных лучей ДН антенной решётки растёт количество последовательно соединённых элементов матричной схемы, а вносимые ими погрешности суммируются. Для обеспечения удовлетворительных параметров схемы с увеличением  $N$  существенно возрастают требования к её элементам. Это настолько усложняет проектирование тиражируемых матричных схем, что на практике обычно используют четырёх- и восьмилучевые матрицы Батлера и редко схемы с 16-ю лучами [5]. Матричная схема должна иметь минималь-

ные габариты и диссипативные потери, а также наименьшую разницу амплитуд сигналов и отклонений от заданной разности фаз сигналов на выходах.

Классическая четырёхлучевая матрица Батлера состоит из четырёх трёхдецибелльных девяностоградусных направленных ответвителей, двух кроссоверов, двух фазовращателей на  $45^\circ$ . Такая матричная схема позволяет формировать четыре ортогональных луча ДН антенной решётки при запитке соответствующих входов. Сдвиги фаз между сигналами, регистрируемыми на соседних выходах (выходных портах) матричной схемы (порты 5 - 8), при возбуждении входов (порты 1 - 4) должны составлять "минус"  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ , "минус"  $135^\circ$  и  $45^\circ$  соответственно.

Распределение фаз на выходах схемы Батлера

Выходы	Входы			
	Порт 1	Порт 2	Порт 3	Порт 4
Порт 5	$-45^\circ$	$-135^\circ$	$-90^\circ$	$-180^\circ$
Порт 6	$-90^\circ$	$0^\circ$	$-225^\circ$	$-135^\circ$
Порт 7	$-135^\circ$	$-225^\circ$	$0^\circ$	$-90^\circ$
Порт 8	$-180^\circ$	$-90^\circ$	$-135^\circ$	$-45^\circ$
Разность фаз, $\Delta\theta$	$-45^\circ$	$+135^\circ$	$-135^\circ$	$+45^\circ$
Направление основного лепестка ДН	1R ( $15^\circ$ )	2L ( $-45^\circ$ )	2R ( $45^\circ$ )	1L ( $-15^\circ$ )

Структурная схема четырёхлучевой матрицы Батлера показана на рис. 1, из которого следует, что матричная схема представляет собой шестнадцати-полосник с четырьмя входами (портами 1 - 4) и четырьмя выходами (портами 5 - 8), к которым подключаются излучатели (A1 - A4).

Электрические и эксплуатационные характеристики матричных ДОС во многом определяются параметрами входящих в их состав направленных ответвителей. Выявление новых качественных свойств направленных ответвителей [6,7], оптимизация их электрических характеристик и совершенствование конструкций [8,9], миниатюризация [10], расширение полосы рабочих частот [11], улучшение технологической реализуемости при серийном тиражиро-

Останков Александр Витальевич - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: avostankov@mail.ru

Щетинин Никита Николаевич - Воронежский институт ФСИН РФ, преподаватель, e-mail: nikita.shetinin@mail.ru

Мельник Вячеслав Александрович - Воронежский институт ФСИН РФ, канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель, e-mail: gloriy\_@mail.ru

вании [12] продолжают оставаться актуальными задачами УВЧ, СВЧ и антенной техники.

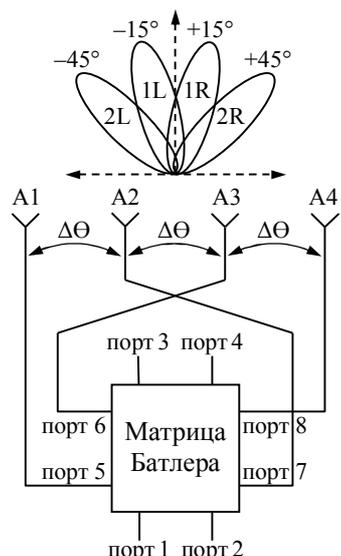


Рис. 1. Структурная схема четырёхлучевой матрицы Батлера

Цель работы — применительно к коротковолновой части диапазона УВЧ предложить и исследовать микрополосковую четырёхлучевую матричную схему Батлера на основе малогабаритных направленных ответвителей оригинальной топологии.

Для уменьшения габаритных размеров направленного ответвителя традиционной топологии в виде совокупности четвертьволновых отрезков линий передачи в работе [13] авторами данной статьи предложено выполнить отрезки линий в виде искусственных длинных линий с сосредоточенными параметрами.

На рис. 2 показана микрополосковая топология двухшлейфного направленного ответвителя на основе искусственных длинных линий, предназначенного для работы на частотах 0.91 - 0.95 ГГц и равным делением мощности в выходных плечах. Диэлектрическая подложка микрополосковой схемы выполнена из материала RO4003С с относительной диэлектрической проницаемостью 3.55 толщиной 0.508 мм и тангенсом угла диэлектрических потерь 0.0027.

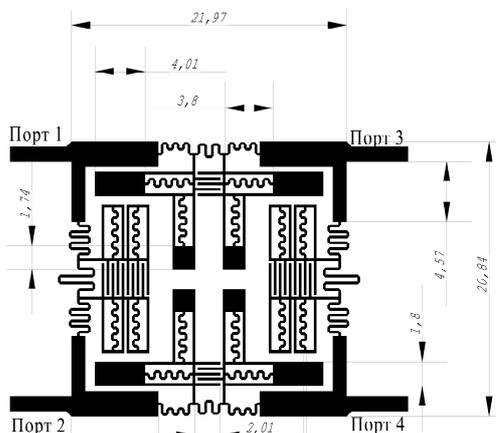


Рис. 2. Используемая топология направленного ответвителя на основе искусственных длинных линий

Электродинамическое моделирование показанной на рис. 2 топологии, результаты которого представлены в [13], наглядно продемонстрировало, что характеристики направленного ответвителя оригинальной топологии практически не отличаются от характеристик традиционного ответвителя. Вместе с тем предложенная схема ответвителя использует на подложке площадь, в пять раз меньшую площади традиционной схемы.

Фазовращатель, входящий в состав матрицы Батлера, реализован в виде меандровой линии с тремя низкоомными шлейфами, разомкнутыми на концах и предназначенных для расширения полосы рабочих частот. Фазовращатель оптимизировался для частотного диапазона 0.91 - 0.95 ГГц (рис. 3, а). На рис. 3, б показаны результаты электродинамического моделирования микрополоскового фазовращателя в виде его фазочастотной характеристики. Параметры диэлектрической подложки фазовращателя соответствовали указанным выше. Из рис. 3, б следует, что на рабочих частотах 0.91 - 0.95 ГГц фазовый сдвиг составляет от "минус" 44° до "минус" 46°.

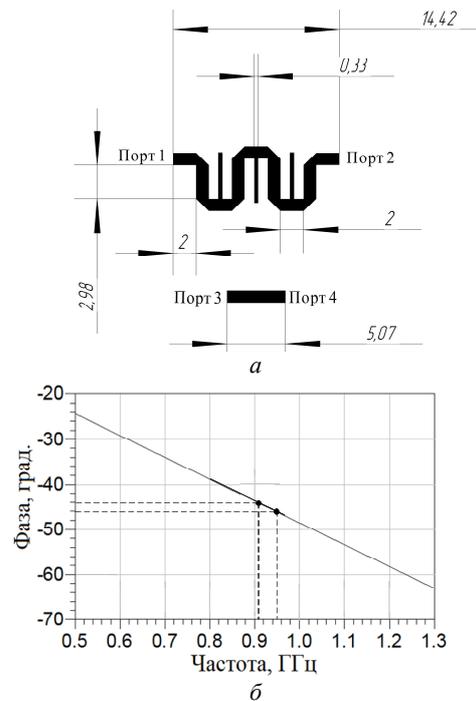


Рис. 3. Фазовращатель: топология и геометрические размеры (а), фазочастотная характеристика (б)

На рис. 4 показана предлагаемая микрополосковая топология четырёхлучевой матрицы Батлера. Матричная схема состоит из четырёх направленных ответвителей и двух фазовращателей. Представленная конфигурация исключает использование кроссоверов, что, в свою очередь, позволило снизить диссипативные потери и уменьшить габаритные размеры матрицы. Следует заметить, что классическая топология матрицы Батлера содержит один или несколько кроссоверов, обычно реализуемых последовательным соединением двух направленных ответвителей. Однако в тех случаях, когда питание антенной решетки осуществляется коаксиальным кабе-

лем, а не микрополосковой линией, можно обойтись и без использования микрополосковых кроссоверов (см., например, [14]).

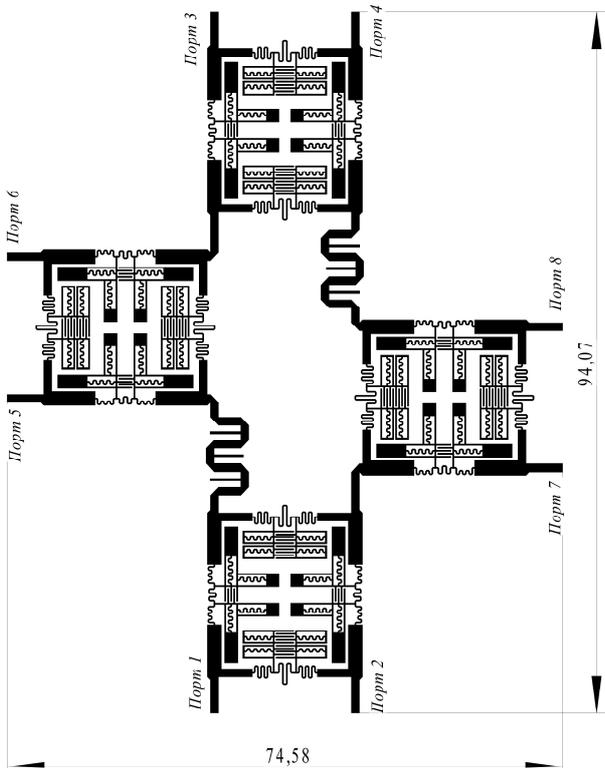


Рис. 4. Разработанная четырёхлучевая матрица Батлера

Разработанная матричная схема обладает симметрией, поэтому при электродинамическом моделировании процессов в ней достаточно исследовать только варианты возбуждения со стороны двух входов — портов 1 и 2. На рис. 5 представлены амплитудно-частотные характеристики матричной схемы, полученные с помощью ознакомительной версии программного продукта Advanced Design System [15] при возбуждении со стороны порта 1.

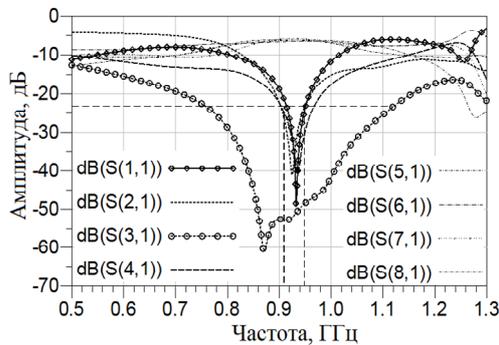


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики матричной схемы при возбуждении со стороны порта 1

Из рис. 5, в частности, следует, что коэффициент отражения по входу  $s_{11}$  составляет на центральной частоте "минус" 33.5 дБ. В пределах частотного диапазона 0.91 - 0.95 ГГц коэффициент отражения по входу  $s_{11}$ , а также развязка между входными портами  $s_{21}$ ,  $s_{31}$ ,  $s_{41}$  не превышают по величине уровень

"минус" 23 дБ. Сквозные коэффициенты передачи  $s_{51}$ ,  $s_{61}$ ,  $s_{71}$ ,  $s_{81}$  в рабочей полосе частот характеризуются разбалансом амплитуд, который составляет не более 1.2 дБ.

Амплитудно-частотные характеристики матричной схемы при возбуждении со стороны порта 2 показаны на рис. 6. Они во многом схожи с показанными на рис. 5. Коэффициент отражения по входу  $s_{22}$  обладает в полосе частот минимальным значением, равным "минус" 32.5 дБ. В рабочей полосе частот 0.91 - 0.95 ГГц коэффициент отражения  $s_{22}$ , развязка между входными портами  $s_{12}$ ,  $s_{32}$ ,  $s_{42}$  не превышают уровень "минус" 24 дБ, а коэффициенты передачи  $s_{52}$ ,  $s_{62}$ ,  $s_{72}$ ,  $s_{82}$  характеризуются разбалансом амплитуд не более 0.8 дБ.

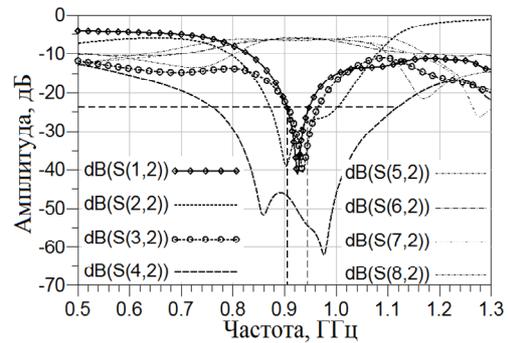


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики матричной схемы при возбуждении со стороны порта 2

При возбуждении матричной схемы со стороны порта 1 фазовая ошибка между соседними выходными портами в частотном диапазоне 0.91 - 0.95 ГГц составляет не более 2.5° (рис. 7, а), а при возбуждении со стороны порта 2 — не более 5° (рис. 7, б).

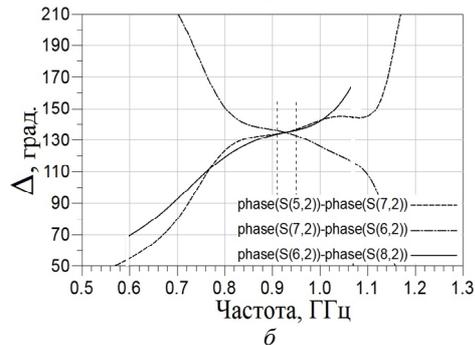
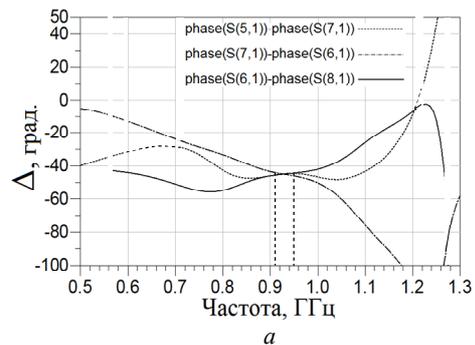


Рис. 7. Частотные зависимости сдвига фаз между ближайшими выходными портами матрицы Батлера при её возбуждении со стороны портов 1 (а) и 2 (б)

Следует признать, что, к сожалению, разность фаз между соседними выходными портами несколько отличается от идеализированных значений. Фазовый разбаланс, очевидно, обусловлен реалистичными характеристиками фазовращателей и направленных ответвителей.

Таким образом, предложена и исследована топология микрополосковой четырёхлучевой матрицы Батлера, выполненной на основе малогабаритных двухшлейфных направленных ответвителей оригинальной топологии и не содержащей кроссоверов. Отсутствие кроссоверов и использование отрезков искусственных длинных линий для реализации направленных ответвителей позволило обеспечить сравнительно малые потери в схеме, а также относительно малые габариты и площадь, занимаемую матричной схемой на диэлектрической подложке. Габаритные размеры ДОС составляют  $94.1 \times 74.6$  мм<sup>2</sup>. Предложенная матричная схема обладает более чем удовлетворительными электрическими характеристиками и может быть использована для управления ДН фазированных антенных решёток в системах связи УВЧ.

#### Литература

1. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки [Текст] / Р. С. Хансен; пер. с англ. под ред. А. И. Синани. — М.: Техносфера, 2012. — 558 с.
2. Development of an adaptive and a switched beam smart antenna system for wireless communications [Text] / F. E. Fakoukakis, S. G. Diamantis, A. P. Orfanides, G. A. Kyriacou // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. — 2006. — vol. 20, iss. 3. — pp. 399-408.
3. Neron, J.-S. Microstrip EHF Butler Matrix Design and Realization [Text] / J.-S. Neron, Gilles-Y. Delisle // ETRI Journal. — 2005. — vol. 27, iss. 6. — pp. 788-797.
4. A new ultra-wideband beamforming for wireless communications in underground mines [Text] / M. Nedil, T. A. Denidni, A. Djaiz, M. A. Habib // Progress In Electromagnetics Research M. — 2008. — vol. 4. — pp. 1-21.
5. Следков, В. А. Широкополосные матрицы Батлера диапазона 4 - 8 ГГц [Текст] / В. А. Следков, Л. А. Обрезанова, М. Б. Мануилов // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2009. — № 6. — С. 73-78.
6. Munina, I. Design of 0-dB reconfigurable directional coupler using metamaterial structure [Text] / I. Munina, I. Vendik, V. Crnojevic-Bengin // Proc. 7th International Congress on electromagnetic materials in microwaves and optics. — Bordeaux: IEEE, 2013. — pp. 139-141.
7. Щетинин, Н. Н. Двухдиапазонный микрополосковый направленный ответвитель с двумя типами направленности [Текст] / Н. Н. Щетинин, А. В. Останков, Е. И. Воробьева // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2014. — Т. 10, № 4. — С. 86-87.
8. Wincza, K. Two-section asymmetric coupled-line impedance transforming directional couplers [Text] / K. Wincza, I. Piekarz, S. Gruszczynski // IET Microwaves, Antennas & Propagation. — 2015. — vol. 9, iss. 4. — pp. 343-350.
9. Щетинин, Н. Н. Математическая модель для проектирования микрополоскового направленного ответвителя на квазисосредоточенных элементах [Текст] / Н. Н. Щетинин, А. В. Останков, Е. И. Воробьева // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2014. — Т. 10, № 3-1. — С. 66-70.
10. Miniaturized planar branch-line coupler with asymmetrical  $\pi$ -shaped structure [Text] / D. Dasgupta, B. Sarkar, M. Pal, R. Ghatak // Proc. National Conference on communications. — New Delhi, India: IEEE, 2013. — pp. 1-4.
11. Design, fabrication and test of a broadband high directivity directional coupler [Text] / S. M. Mousavi, S. A. Mirtaheri, M. A. Khosravani-Moghaddam and etc. // Proc. 23rd Iranian Conference on electrical engineering. — Tehran: IEEE, 2015. — pp. 168-170.
12. Ha, J. Miniaturized quasi-asymmetric forward-wave coupled-line coupler with arbitrary coupling level [Text] / J. Ha, Y. Lee // Proc. International Microwave Symposium. — Seattle, WA: IEEE, 2013. — pp. 1-3.
13. Останков, А. В. Микрополосковый направленный ответвитель, выполненный на основе отрезков искусственных длинных линий [Текст] / А. В. Останков, Н. Н. Щетинин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер.: Естественные и технические науки. — 2016. — № 1. — С. 23-25.
14. Hayashi, H. Four-element planar butler matrix using half-wavelength open stubs [Text] / H. Hayashi, D. A. Hitko, C. G. Sodini // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. — 2002. — vol. 12, iss.3. — pp. 73-75.
15. ADS 2015.01 Product Release // Keysight Technologies. URL: <http://www.keysight.com/en/pd-2486326/ads-201501?cc=US&lc=eng> (дата обращения: 18.01.2016).

Воронежский государственный технический университет  
Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний РФ

## MICROSTRIP BEAMFORMING SCHEME FOR TELECOMMUNICATIONS NETWORKS BASED MULTIBEAM ANTENNA ARRAYS

A.V. Ostankov, N.N. Shchetinin, V.A. Melnik

The paper proposes and investigates microstrip implementation of a four-beam Butler matrix on the basis of electrodynamic simulation. The matrix circuit is formed using directional couplers of original topology and it does not contain crossovers. The absence of crossovers and the use of segments of artificial long lines for implementation of directional couplers made it possible to ensure relatively small losses in a matrix pattern, and relatively small size and footprint of a diagram on the dielectric substrate. The proposed matrix circuit has more than satisfactory electrical characteristics and it is intended for supply of phased array antennas in the ultrahigh frequency communication systems

Key words: antenna array, beamforming scheme, Butler matrix, directional couplers, amplitude-frequency characteristic

**ИЗУЧЕНИЕ КИСЛОТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ АЛЮМОГЕЛЯ  
С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**В.П. Горшунова, В.А. Небольсин**

Исследовано влияние кислотного модифицирования алюмогеля на поглощение аммиака. Разработаны оптимальные условия процесса. Экспериментальные результаты подтверждены электрохимическими методами исследования

Ключевые слова: адсорбция, алюмогель, кислотное модифицирование, аммиак, электрохимические методы исследования

**Введение**

Из литературных источников известно [1], что на поверхности алюмогеля имеются активные центры. К ним относятся гидроксильные группы, кислородные центры, кислотные центры типа кислот Льюиса, кислотные центры типа кислот Бренстеда, с участием которых может происходить удерживание аммиака на поверхности сорбента. Как указано в работе, наблюдаются следующие формы адсорбции молекул аммиака на поверхности оксида алюминия (таблица):

Формы адсорбции аммиака	Характеристика молекулярной адсорбции или поверхностной реакции
---NH <sub>3</sub>	Молекулярная адсорбция с образованием водородной связи
← NH <sub>3</sub>	Координационная связь с центром Льюиса
- NH <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Поверхностная реакция с кислородными центрами: NH <sub>3</sub> + O <sup>2-</sup> → NH <sub>2</sub> <sup>-</sup> + OH <sup>-</sup>
- NH <sup>2-</sup>	NH <sub>3</sub> + 2O <sup>2-</sup> → NH <sup>2-</sup> + 2 OH <sup>-</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Поверхностная реакция с центром Бренстеда : NH <sub>3</sub> + H <sup>+</sup> → NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>

В зависимости от предварительной обработки алюмогель может быть кислым, щелочным и нейтральным. Так как аммиак проявляет основной характер и может вступить во взаимодействие с поверхностными

центрами по тем схемам, которые приведены в таблице, а это преимущественно взаимодействие с кислотными центрами, то, чтобы увеличить поглотительную способность алюмогеля, его надо перевести в кислую форму.

Целью настоящей работы явилось выявить влияние кислотного модифицирования алюмогеля на поглотительную способность по отношению к аммиаку.

**Материалы и методы исследования**

Исследовали алюмогель – оксид алюминия активной марки ОС-1-01 Диаметр гранул в пределах 5,7 мм, насыпная плотность в пределах 0,75 г/см<sup>3</sup>, удельная поверхность не менее 265 м<sup>2</sup>/г, общий объем пор не менее 0,51 см<sup>3</sup>/г. Химическую обработку алюмогеля проводили в растворах соляной кислоты разной концентрации: 0,01 н, 0,1н., 0.5 н., 1 н., 2 н. Для этого 5 г сорбента заливали 50 мл раствора кислоты и выдерживали разное время: 1 час, 3 часа, 6 часов и 24 часа при комнатной температуре и периодическом встряхивании. Далее сорбент на фильтре промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции (рН=7), после чего высушивали при температуре 120 – 130 °С до постоянной массы в сушильном шкафу марки ШС-80 СПУ.

Адсорбцию паров аммиака изучали гравиметрическим методом в статических условиях [2]. Для этого помещали 1 г сорбента в бюкс и выдерживали в эксикаторе в атмосфере аммиака с объемной концентрацией 100 мг/м<sup>3</sup> (5 ПДК) в течение 24 часов при комнатной температуре. Среду аммиака с заданной объемной концентрацией готовили, используя данные справочника [3].

Горшунова Валентина Павловна – ВГТУ, канд. хим. наук, доцент, тел. 8 (473) 235-61-01  
Небольсин Валерий Александрович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 256-04-65

Для выяснения природы активного оксида алюминия, используемого нами в процессе исследования, мы проводили гетерогенное потенциометрическое титрование водной суспензии [4]. Измерение рН осуществляли с помощью прибора Мультитест ИПА – 301. Навеску  $Al_2O_3$  (0,5 г) суспендировали в 10 мл дистиллированной воды. Прибавляли 0,2 мл титранта (0,01 н раствора  $HCl$  или 0,01 н раствора  $KOH$ ), перемешивали до установления равновесия в течение 5 минут, измеряли рН, а затем добавляли следующую порцию титранта вплоть до установления постоянного значения рН.

### Результаты исследования и их обсуждение

Прежде всего методом гетерогенного потенциометрического титрования выяснили природу исходного алюмогеля. Результаты приведены на рис. 1, из которого следует, что

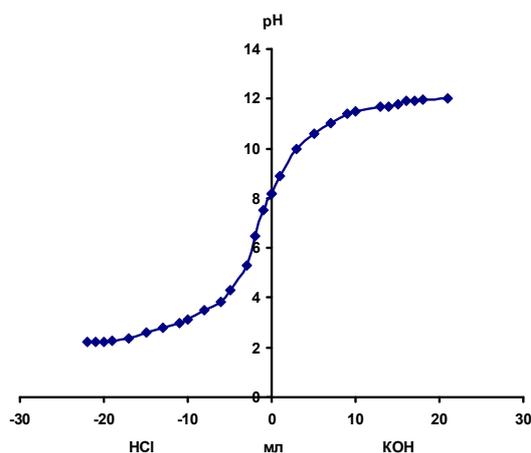


Рис. 1. Кривая потенциометрического титрования водной суспензии исходного алюмогеля

изоэлектрическая точка (ИЭТ) поверхности оксида равна 8,2. Это говорит о том, что на поверхности алюмогеля преобладают центры с основным характером. Чтобы возросла адсорбция аммиака, необходимо увеличить на поверхности сорбента количество кислотных групп. С этой целью проводили импрегнирование оксида алюминия растворами соляной кислоты разной концентрации. Далее исследовали адсорбцию аммиака модифицированным таким образом алюмогелем. Результаты опытов приведены на рис. 2. Из диаграммы видно, что с увеличением времени пропитки и концентрации растворов  $HCl$  адсорбция аммиака возрастает.

В работе [5] показано, что оптимальным активирующим раствором оказался 0,5 М раствор соляной кислоты.

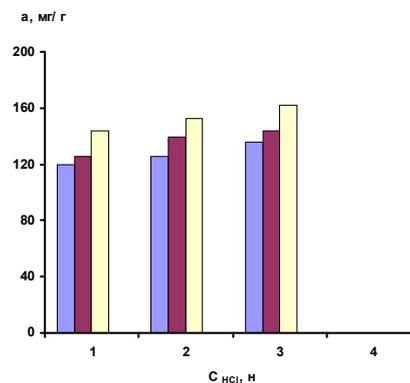


Рис. 2. Адсорбция аммиака в зависимости от способа обработки алюмогеля в растворах соляной кислоты: левый столбик – 0,01 н раствор; средний – 0,1 н раствор; правый – 1 н раствор. 1 - в течение 1 часа; 2 – в течение 3 часов; 3 – в течение 6 часов

Увеличение концентрации не приводило к возрастанию адсорбции аммиака. Значит, количество кислотных центров на поверхности активного оксида алюминия при такой обработке сорбента также является оптимальным.

Результаты потенциометрического титрования суспензий исходного алюмогеля, а также сорбента, прошедшего обработку растворами кислот 0,1 н., 0,5 н., 1 н., приведены на рис. 3.

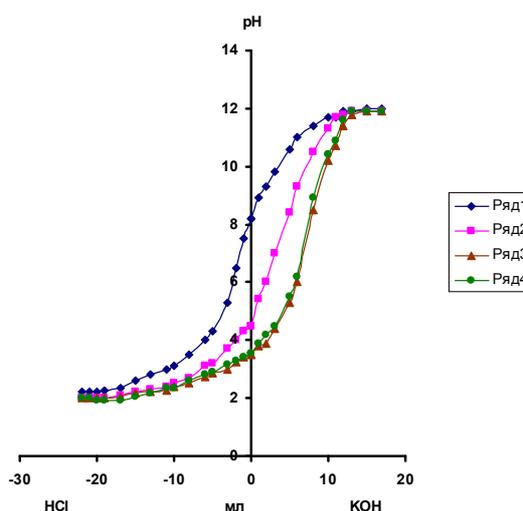


Рис. 3. Объединенный график потенциометрических кривых исследуемых суспензий алюмогеля: ряд 1 – исходный алюмогель; ряд 2 – обработка 0,1 н. раствором  $HCl$ ; ряд 3 – обработка 0,5 н. раствором  $HCl$ ; ряд 4 – обработка 1 н. раствором  $HCl$

Используя найденные из графика (рис.3) значения изоэлектрических точек, построили

зависимость, изображенную на рис. 4.

Оказалось, что количество активных кислотных центров на поверхности сорбента увеличивается лишь до концентрации раствора HCl, равной 0,5 н., что совпало с результатами, полученными ранее [5].

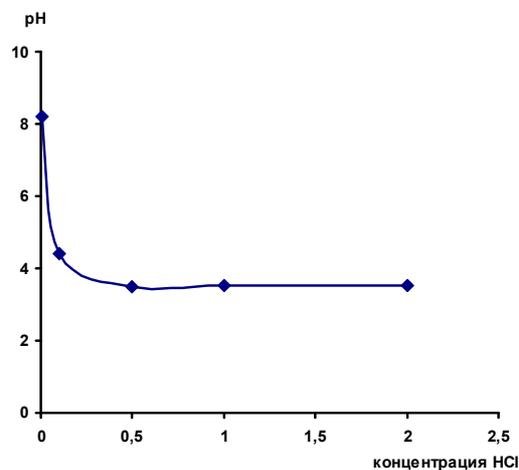


Рис. 4. Функциональная зависимость изоэлектрических (ИЭТ) точек суспензий алюмогеля от концентрации соляной кислоты

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что кислотное активирование алюмогеля увеличивает его поглотительную способность по отношению к аммиаку. Подобран наиболее благоприятный режим модифицирования алюмогеля раствором соляной кислоты. На основании электрохимических исследований установлено, что с повышением концентрации соляной кислоты происходит уменьшение

изоэлектрической точки, что свидетельствует об увеличении числа активных кислотных центров на поверхности сорбента. Опытные данные изучения поглотительных свойств активированного алюмогеля сорбционными методами полностью совпали с результатами электрохимических исследований поверхности сорбента.

### Литература

1. Киселев А.В. Инфракрасные спектры поверхностных соединений [Текст]: монография / А.В. Киселев, В.И. Лыгин. – М: Наука.- 1972, 459 с.
2. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники [Текст]: монография / Н.В. Кельцев.– М.: Химия. – 1981, 592 с.
3. Рабинович В.А. Краткий химический справочник [Текст]: / В.А. Рабинович, З.Я. Хавин. – С.- Пб.: Химия.- 1997, 392 с.
4. Чеботарев А.Н. Кислотно-основные свойства оксидов алюминия различных типов [Текст] / А.Н. Чеботарев, Т.М. Щербакова, Е.Н. Курта, Е.В. Трущ // Вестник Одесск. Нац. ун-та. – 2006. - Т. 11. - № 2.- С. 112-119.
5. Горшунова В.П. Влияние кислотной обработки активного оксида алюминия на его поглотительные свойства [Текст] / В.П. Горшунова, Д.Э. Иванова // «Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии»: Мат-лы Межд. н.-пр. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.- Курск, КЮЗ гос. ун-т, 2015. - С. 214-216.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «НЭНТП» в рамках госконтракта № 16.552.11.7048

Воронежский государственный технический университет

## THE ANALYSIS OF ACID MODIFICATION OF ALUMOGEL INVOLVING METHODS OF ELECTROCHEMICAL RESEARCH

V.P. Gorshunova, V.A. Nebolsin

The results of study of influence of acid modification of alumogel on the process of sorption of ammonia are presented. Developed optimal mode of impregnation of the sorbent with an activating solution. Experimental results were confirmed by electrochemical research

Key words: adsorption, alumogel, acid modification, ammonia, electrochemical research

## МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВОЙ СИСТЕМЫ ИЗ НУКЛЕОТИДНОЙ ЦЕПОЧКИ С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА В МАТРИЦЕ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ

**М.А. Хусенов, Х.Т. Холмуродов**

Изучение молекулярных систем типа НЦ (нуклеотидная цепочка) – НЧ (наночастицы) – УНТ (углеродная нанотрубка) представляет большой интерес для широкого спектра теоретических и прикладных проблем, например, в разработках электронных диагностических приборов, в биохимических и биотехнологических приложениях (дизайн нанороботов, механизмов для транспортировки лекарств в живой клетке, т.п.). В настоящей работе с использованием метода молекулярной динамики (МД) смоделировано взаимодействие небольшой НЦ с НЧ золота в матрице УНТ. Нами выполнена серия МД расчетов с разными моделями НЦ-НЧ-УНТ с целью изучения особенностей взаимодействия НЦ-НЧ, образования связей и структур в системе, а также динамического поведения в ограниченной среде, обусловленной матрицей УНТ

Ключевые слова: нуклеотидная цепочка (НЦ), наночастицы (НЧ) золота, углеродная нанотрубка (УНТ), Ван-дер-ваальсово (ВдВ) взаимодействие, молекулярная динамика (МД)

Понимание механизмов образования разнообразных связей ДНК с металлическими наночастицами (НЧ) и металлическими поверхностями, которые протекают при наличии взаимодействия с матрицей из углеродной нанотрубки (УНТ), является чрезвычайно важным во многих аспектах современной электроники, биотехнологии и генной инженерии [1-7]: в мобильных электронных устройствах – микрочипах, предназначенных для анализа крови, в приложениях по разработке средств доставки лекарств внутри живой клетки, в дизайне нанороботов и связанными с ними нанотехнологическими диагностическими инструментариями [3-10]. Следует особо отметить, что исследования в области изучения закономерности взаимодействия УНТ с нуклеотидами и металлическими наночастицами (золото, серебро, и т.д.) наиболее интенсивно ведутся современными методами молекулярной динамики (МД) [6-13].

Небольшая нуклеотидная цепочка (НЦ) является важным звеном в исследовании молекулярных структур и процессов взаимодействия целостной молекулы ДНК или РНК с металлическими НЧ и УНТ. Как известно, первичные структуры ДНК и РНК

состоят из линейной последовательности нуклеотидов, которые связаны друг с другом фосфодиэфирной связью [1-13].

Целью настоящей работы является изучение структурных конформационных изменений в молекулярной в системе НЦ-НЧ-УНТ, оценка динамических и энергетических характеристик системы при разных температурах среды. В данной работе с использованием метода молекулярно-динамического (МД) моделирования нами выполнены компьютерные расчеты над фрагментом НЦ, взаимодействующей с НЧ золота в матрице УНТ. Для системы НЦ-НЧ-УНТ построена серия моделей, где небольшая цепочка НЦ (один пиримидин – цитозин (Ц) и один пурин – гуанин (Г)) приводится в контакт с НЧ золота, и в дальнейшем прослеживаются процессы их релаксации и взаимодействия в УНТ окружении, а в системах НЦ-НЧ-УНТ учитывается существование Ван-дер-ваальсовых (ВдВ) сил и потенциалов.

### Построение моделей и описание метода

Смоделированная молекулярная структура представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из нуклеотидной цепочки (НЦ) – одного пиримидина (Ц, цитозина) и одного пурина (Г, гуанина), одной или нескольких наночастиц (НЧ) золота, а также углеродной нанотрубки (УНТ), рис. 1. При этом в системе НЦ-НЧ-УНТ в процессах парного межатомного взаимодействия частиц мы рассматриваем лишь присутствие Ван-дер-ваальсовых (ВдВ) сил и потенциалов.

---

Хусенов Мирзоазиз Ашурович – Физико-технический институт им. С. У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, соискатель, тел. +992935018854, e-mail: mirzo85@inbox.ru

Холмуродов Холмирзо Тагойкулович – Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ, д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, тел. 8(496)2163299, e-mail: mirzo@jinr.ru, kholmurzo@gmail.com

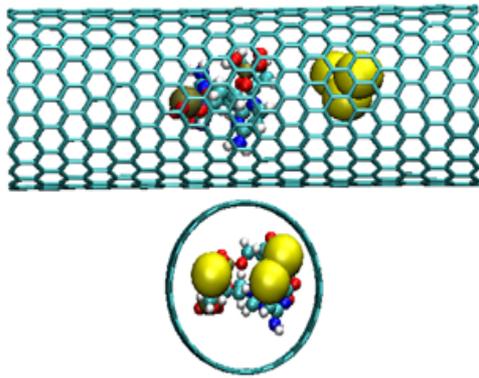


Рис. 1. Молекулярная модель НЦ-НЧ-УНТ (сверху - вид со стороны; внизу - вид сбоку)

Молекулярно-динамические (МД) расчеты были выполнены с использованием программного пакета DL POLY 2.20 [14–15]. Для контроля температуры системы использовался термостат Берендсена в ансамбле NVT (постоянные температура и объем). Для интегрирования уравнений движений применялась схема Верле с центральной разностной схемой «прыжок лягушки». Шаг интегрирования был принят равным 1 фемтосекунде.

Короткодействующие ВДВ взаимодействия между НЦ, НЧ и УНТ описываются с помощью потенциала Леннарда-Джонса (Л-Дж):

$$V(r) = 4\epsilon \left[ \left( \frac{\delta}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\delta}{r} \right)^6 \right]$$

где  $\epsilon$  – глубина потенциальной ямы (эВ),  $\sigma$  – «эффективный диаметр атома» – расстояние, на котором уравниваются силы отталкивания и притяжения между атомами (нм).

Значения параметров  $\epsilon$  и  $\sigma$  для модели НЦ-НЧ-УНТ нами были взяты из литературы [12-15], базы данных пакета DL\_POLY [14-15], а также из нашей предыдущей работы [13]. Для разных видов атомов применялись комбинированные правила Лоренца-Бершелота (*Lorentz-Berthelot combining rules*) [14-15]:

$$\epsilon_{ij} = (\epsilon_{ii} \epsilon_{jj})^{\frac{1}{2}} \text{ и } \sigma_{ij} = \frac{1}{2}(\sigma_{ii} + \sigma_{jj}).$$

Для описания УНТ используется потенциал Терсоффа (зависящий от плотности), который адекватно воспроизводит ковалентную связь в системах, содержащих углерод, кремний, германий, и сплавов из этих элементов [13-15]. Особенность потенциала Терсоффа для МД-моделирования состоит в том, что он позволяет учитывать разрушение и

формирование химических связей, ассоциируемых с процессом их гибридизации. Потенциальная энергия Терсоффа состоит из парных взаимодействий, коэффициент притягательного члена зависит от локального окружения, задающего, таким образом, многочастичный потенциал [13]:

$$U_{ij} = f_c(r_{ij})[f_R(r_{ij}) - \nu_{ij}f_A(r_{ij})].$$

На рис. 2, а показана структура НЦ, состоящая из одного пиримидина и одного пурина, наподобие той, что они образуют связи как в первичной структуре молекулы ДНК (рис. 2б).

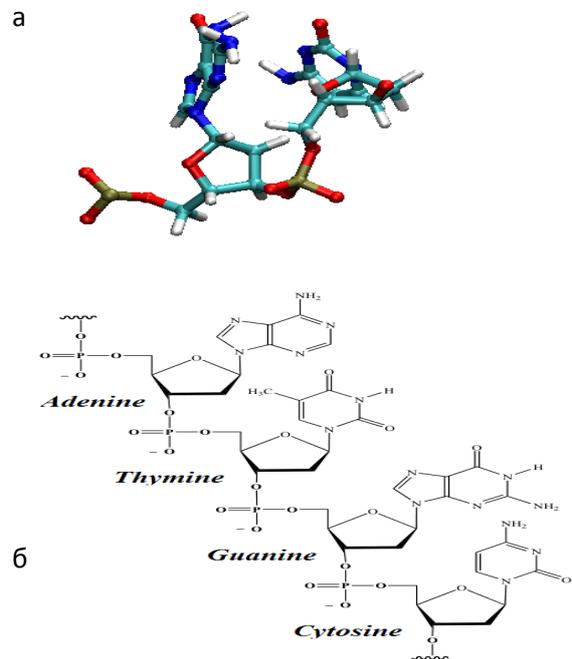


Рис. 2. Нуклеотидная цепочка (НЦ), состоящая из одного пиримидина (Ц, цитозина) и одного пурина (Г, гуанина) (а); линейная цепочка последовательности нуклеотидов, из которых состоят первичные структуры молекул ДНК или РНК (б). Первичная структура ДНК или РНК образуется из линейной нуклеотидной последовательности, связанной между собой фосфодиэфирными связями. Нуклеотидная единица состоит из следующих компонентов: (1) азотистые основания -- А (Аденина), Г (Гуанина), Ц (Цитозина), Т (Тимина, присутствует только в молекуле ДНК) и У (Урацила, присутствует только в молекуле РНК); (2) сахар с 5-углеродным кольцом, который называется дезоксирибозой (имеется только в ДНК) или рибозой (имеется только в РНК); (3) одна или несколько фосфатных групп

Модельная система, состоящая из нуклеотидной цепочки (НЦ) и наночастиц (НЧ) золота, приводится при различных температурах от  $T=100$  до  $300$  К в

равновесном термализованном состоянии в матрице углеродной нанотрубки (УНТ). В начальном состоянии НЦ и НЧ расположены внутри УНТ на расстоянии 5-10 Å друг от друга, т.е. в радиусе действия сил ВдВ (рис. 3).

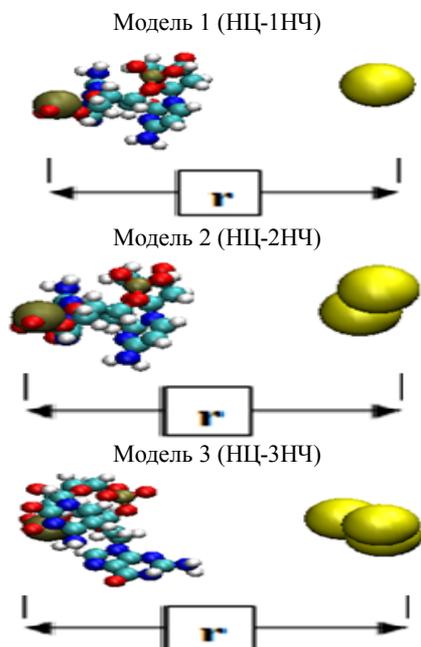


Рис. 3. Три модели нуклеотидной цепочки (НЦ), взаимодействующей с 1, 2 и 3 наночастицами золота. Большими сферами обозначен один из двух атомов фосфора в НЦ и наночастицы золота

## Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведены результаты МД вычислений зависимости полной потенциальной энергии системы НЦ-НЧ-УНТ для моделей 1, 2 и 3 от времени. При всех температурах потенциальная энергия системы плавно достигает своих равновесных (релаксированных) значений. Из рис. 4 также можно заметить, что кривые потенциальной энергии для модели 3 расположены чуть ниже, чем для модели 2, а для модели 2 – ниже чем для модели 1. Таким образом, добавление очередного атома золота в системе каждый раз приводит к небольшому изменению в кривых потенциальной энергии. Прослеживается зависимость полной потенциальной энергии от увеличения количества атомов золота в системе НЦ-НЧ-УНТ.

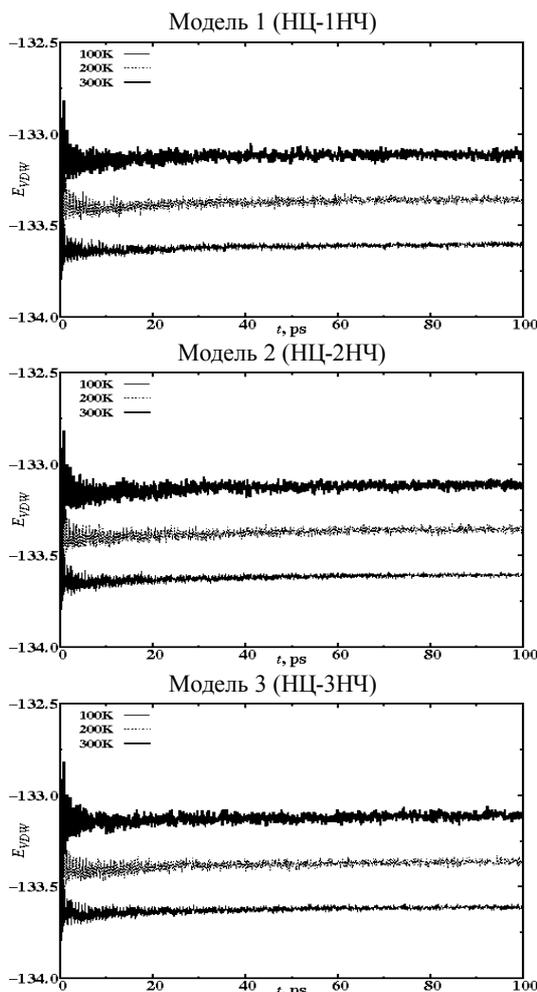


Рис. 4. Полная потенциальная энергия системы НЦ-НЧ-УНТ для моделей 1, 2 и 3 в зависимости от времени

На рис. 5 приведены динамические конфигурации НЦ и НЧ с течением времени, иллюстрирующие их взаимодействие внутри УНТ. Взаимное расположение НЦ и НЧ в матрице УНТ показано, соответственно, для начального ( $t = 0$ ) и конечного ( $t = 100$  пс) состояний. Как видно на рис. 5, образование сильной связи НЦ-НЧ выглядит предпочтительной для моделей 2 и 3, с ростом числа атомов золота (т.е. с образованием небольших кластеров и сильными ВдВ взаимодействиями). Тем не менее формирование устойчивой и долгоживущей связи НЦ-НЧ представляется возможным также при наличии одного атома золота (т.е. для модели 1). Генерация различных одноатомных (1НЧ) конфигураций и их анализ показывает, что определяющим фактором для образования сильной связи НЦ-1НЧ является конкурентный эффект внутримолекулярных осцилляций НЦ со слабыми ВдВ взаимодействиями НЦ-1НЧ. При этом в зависимости от исходного положения атома

золота по отношению к нуклеотидам в итоге могут формироваться слабые, сильные или промежуточные связи НЦ-1НЧ. Доказательство образования разнообразных (слабых и сильных) связей НЦ-НЧ представлено на рис. 6, где, соответственно, для трех моделей 1 (НЦ-1НЧ), 2 (НЦ-2НЧ) и 3 (НЦ-3НЧ) представлены результаты вычисления распределения расстояния  $d[\text{НЦ}(\text{P})-\text{НЧ}(\text{Au})]$  в зависимости от времени. (Отметим, что  $d[\text{НЦ}(\text{P})-\text{НЧ}(\text{Au})]$  – это расстояние между атомом фосфора (P) НЦ и атомом золота (Au), как показано на рис. 3; все межатомные расстояния НЦ-НЧ лежат внутри интервала от минимальной межатомной величины до  $d$ ; иными словами,  $d$  представляет собой наибольшее расстояние НЦ-НЧ). Рис. 6 представляет сравнение распределений  $d(t)$  при температурах  $T=100$  (а), 200 (б) и 300К (в) и показывает возможность образования преимущественно сильной связи НЦ-НЧ при низких температурах для всех моделей. С увеличением температуры до  $T=300$  К происходит разрушение связи НЦ-НЧ, при котором внутримолекулярные колебания НЦ начнут доминировать над слабыми ВдВ взаимодействиями НЦ-НЧ. По рис. 6 прослеживается сохранение прочной связи НЦ-2НЧ и НЦ-3НЧ, т.е. для моделей с двумя и тремя атомами золота. Образование небольших кластеров, таким образом, вносит эффект корреляции внутримолекулярных и ВдВ взаимодействий, который и определяет характер связи НЧ золота с пептидной цепью нуклеотидов.

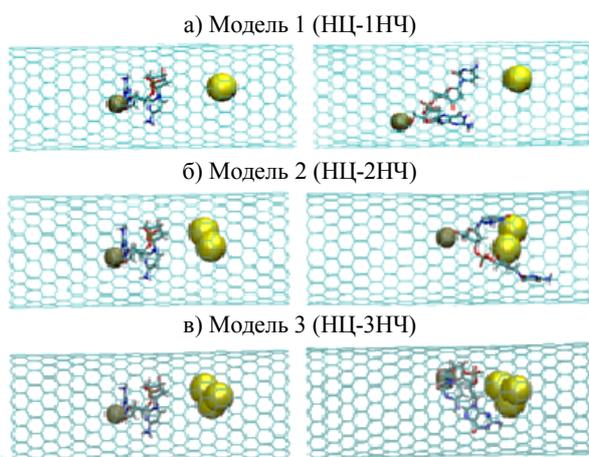


Рис. 5. Процесс взаимодействия и образования связей НЦ-НЧ внутри УНТ в начальном (картинки а), б), в) слева - 3 системы) и конечном (картинки а), б), в) справа - 3 системы) состояниях для моделей 1, 2 и 3.

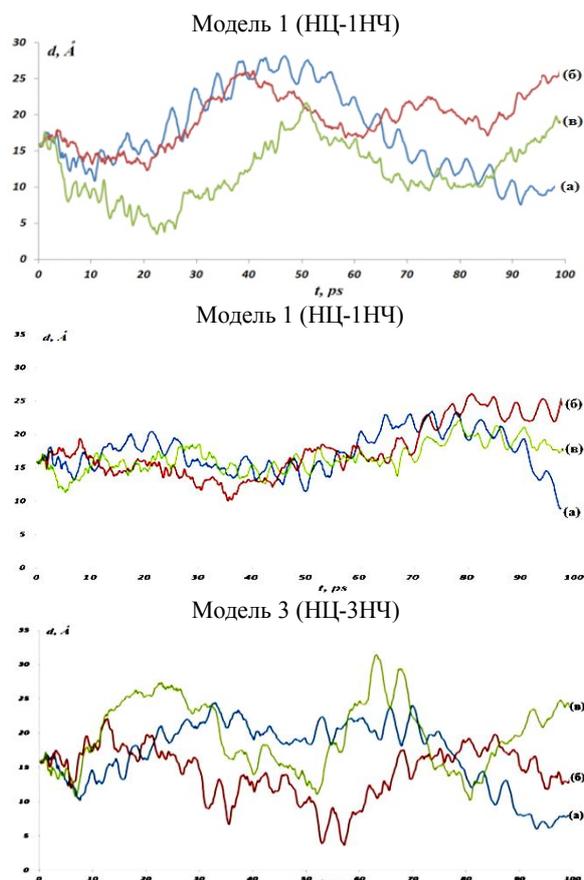


Рис. 6. Расстояния НЦ-НЧ при взаимодействии с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота внутри УНТ как функция времени при температурах  $T=100$  (а), 200 (б) и 300К (в)

Для оценки внутримолекулярных осцилляций НЦ по данным МД моделирования были построены графики энергии угловых и торсионных (дигедральных) связей НЦ. Вкратце приводим определения данных связей. В современной вычислительной химии и нанотехнологических исследованиях разработаны и внедрены эффективные потенциалы, позволяющие с высокой точностью воспроизвести свойства молекулярных систем, самых сложных химических и биологических структур. Многие потенциалы атом-атомного взаимодействия “пришиты” в простых компьютерных кодах или многоцелевых пакетах молекулярно-динамического (МД) моделирования, таких как DL\_POLY, AMBER, CHARMM, NAMD и т.д. Они сочетают в себе традиционные теории – от классических до квантовых, а также гибридные: классическая механика в сочетании с квантовой химией; некоторые из потенциалов находятся из эмпирических соображений и наблюдений. На рис. 7 на примере системы их четырех атомов

приведены виды связей некоторых из этих потенциалов [14-15].

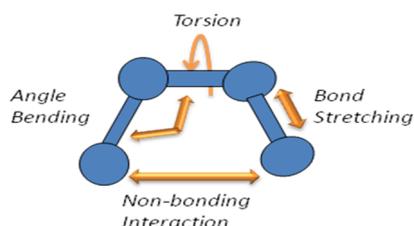


Рис. 7. Химическая связь двух атомов (*bond stretching*), угловая связь (*angle bending*) трех атомов, торсионная связь (*torsion*) четырех атомов, а также несвязанное взаимодействие (*non-bonding interaction*)

Валентные длины поддерживаются за счет потенциала

$$U_b = \frac{1}{2} \sum_b K_b (r - b_0)^2,$$

валентные углы задаются потенциалом

$$U_\theta = \frac{1}{2} \sum_\theta K_\theta (\theta - \theta_0)^2,$$

энергия торсионных взаимодействий и потенциалов, отвечающих плоским группам, имеют один и тот же вид:

$$U_\varphi = \frac{1}{2} \sum_\varphi K_\varphi [\cos(n\varphi - \delta) + 1],$$

а Ван-дер-ваальсовы взаимодействия атомов, разделенных тремя и более валентными связями, определяются потенциалом типа 12-6 или Леннарда-Джонса (*Lennard-Jones (lj)*):

$$U_{LJ} = \sum_{i,j} \left[ \frac{A}{r_{ij}^{12}} - \frac{B}{r_{ij}^6} \right].$$

На рис. 8 и 9 представлены временные зависимости энергий угловых и торсионных связей НЦ при взаимодействии с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота внутри УНТ. Сравнивая результаты, приведенные на рис. 8-9, можно прийти к заключению, что начальные осцилляции НЦ в итоге определяют характер образования связи с НЧ золота.

Например, для НЦ-1НЧ и НЦ-2НЧ моделей, по сравнению с НЦ-3НЧ, на начальной стадии динамики взаимодействия характерны более резкие скачки энергий связей. Также разброс энергий угловых и торсионных связей по температуре для моделей НЦ-1НЧ и НЦ-2НЧ выглядит более заметным, нежели для НЦ-3НЧ.

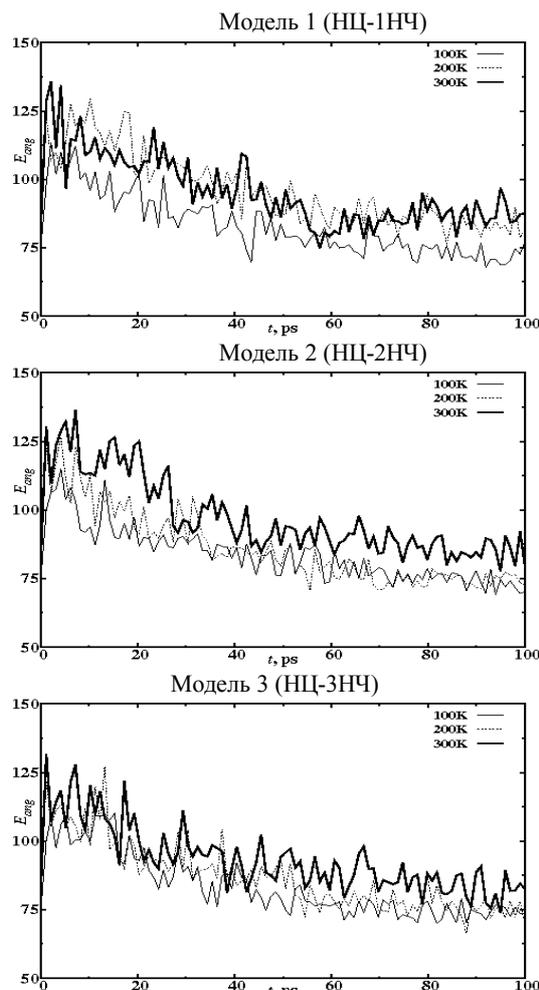


Рис. 8. Энергия угловых связей НЦ при взаимодействии с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота внутри УНТ как функция времени

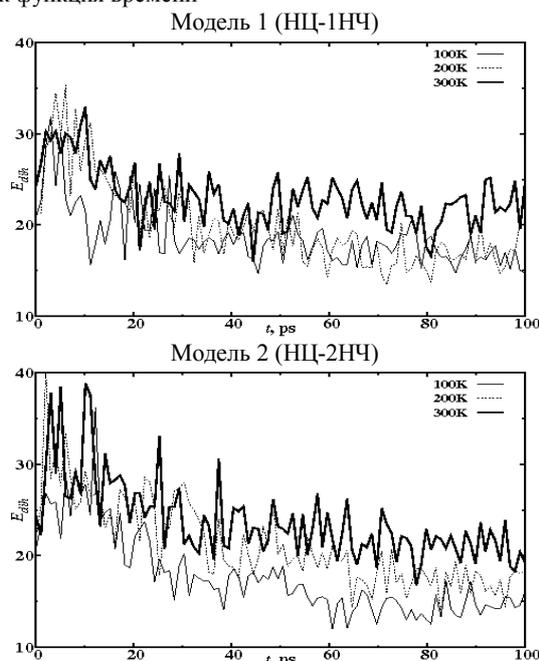


Рис. 9. Энергия торсионных (дигдральных) связей НЦ при взаимодействии с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота внутри УНТ как функция времени

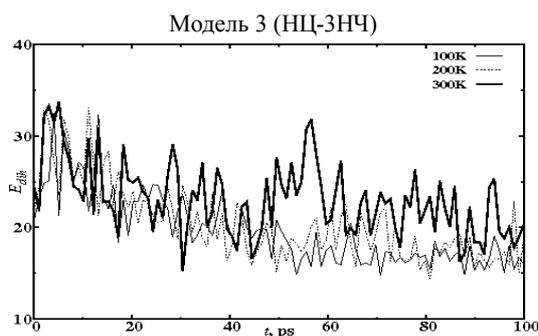


Рис. 9. Энергия торсионных (дигедральных) связей НЦ при взаимодействии с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота внутри УНТ как функция времени (продолжение)

### Заключение

В работе с использованием метода молекулярной динамики построена серия молекулярных моделей и изучены особенности взаимодействия нуклеотидной цепочки (НЦ) с наночастицами (НЧ) золота в матрице УНТ. При этом реализован т.н. гибридный МД метод, в котором кванто-химический потенциал взаимодействия сочетается с вычислениями классических ньютоновских траекторий атомов. Для системы НЦ-НЧ-УНТ в процессах парного межатомного взаимодействия частиц допускалось лишь существование Ван-дер-ваальсовых (ВдВ) сил; для описания ВдВ взаимодействий использован парный потенциал Леннарда-Джонса. При анализе данных МД моделирования построены конфигурационные картины (снимки) системы, иллюстрирующие особенности формирования связей НЦ с 1НЧ, 2НЧ и 3НЧ золота. Также построены зависимости полной потенциальной энергии системы НЦ-НЧ-УНТ, угловых и торсионных (дигедральных) внутримолекулярных связей НЦ при разных температурах.

Анализ структурных и энергетических характеристик системы НЦ-НЧ-УНТ указывает на нетривиальную картину формирования связей НЦ-НЧ, как результат конкуренции двух эффектов – внутримолекулярных (угловых и торсионных) колебаний НЦ со слабыми ВдВ взаимодействиями НЦ-НЧ. Даже для одноатомной модели НЦ-1НЧ возможно образование слабых и сильных связей. При этом характер взаимодействия НЦ-1НЧ определяет вид связей НЦ-2НЧ и НЦ-3НЧ моделей. Построенные функции распределения расстояний между НЦ и НЧ представляют собой прямое сравнение образования близких контактов НЦ-НЧ с

суммой ВдВ радиусов для различных времен эволюции системы. В приведенных начальных и конечных структурах относительная начальная скорость НЦ-НЧ определяется температурой системы, которая варьировалась в широком диапазоне от  $T=100$  до 300 К. Полученные новые МД структуры НЦ-НЧ-УНТ и их анализ указывают на то, что с увеличением времени эволюции они, скорее всего, сохраняются, т.е. представляют собой долгоживущие образования (для исследуемых нами систем с ограниченной по длине УНТ). Конечно, для более протяженных по линейным размерам УНТ возникнет вопрос о том, насколько конечные структуры будут долгоживущими, что потребует другой постановки задачи.

В заключение, изучение молекулярных систем типа нуклеотидная цепочка – металлические наночастицы – углеродная нанотрубка представляет большой интерес для современной нанобиотехнологии и микроэлектроники в разработке биоэлектронных устройств. Исследуемая система представляет интерес в дизайне биочипов для анализа крови, в устройствах нано- и микроэлектроники для транспортировки лекарств в живой клетке и т.д. [1-18].

### Литература

1. Dunford R., Salinaro A., Cai L., Serpone N., Horikoshi S., Hidaka H., Knowland J. Chemical oxidation and DNA damage catalysed by inorganic sunscreen ingredients, *FEBS Letters*, 1997, 418(1), 87-90.
2. SantaLucia J. (Jr.) A unified view of polymer, dumbbell, and oligonucleotide DNA nearest-neighbor thermodynamics, *Biochemistry*, 1998, 95, 1460-1465.
3. Григорьев С.Н., Лоскутов А.И., Ошурко В.Б., Урюпина О.Я., Шамурина М.В. Некоторые особенности измерений линейных размеров наночастиц золота в разных физических состояниях // *Нанотехника*. 2011. № 2. С. 38-45.
4. SantaLucia J. (Jr.) and Hicks D. The thermodynamics of DNA structural motifs, *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, 2004, 415-440.
5. Breslauer K.J., Franks R., Blockers H., and Markyt L.A. Predicting DNA duplex stability from the base sequence, *Biochemistry*, 1986, 83, 3746-3750.
6. Khusenov, M., Dushanov, E. and Kholmurodov, K. Molecular Dynamics Simulations of the DNA-CNT Interaction Process: Hybrid Quantum Chemistry Potential and Classical Trajectory Approach. *Journal of Modern Physics*, 2014, 5, 137-144.
7. Freyre-Fonseca V., et al. Titanium dioxide nanoparticles impair lung mitochondrial function, *Toxicology Letters*, 2011, 202, 111-119.
8. Sedghamiz E., et al. Molecular Dynamics Simulation of Boron Nitride Nanotube as a Drug Carrier, *Arab J. Sci. Eng.* 2014, 39, 6737-6742.

9. Hilder T.A., Hill J.M. Carbon nanotubes as drug delivery nanocapsules, *Current Applied Physics*, 2008, 8(3-4), 258-261.
10. Qing Pu, Yongsheng Leng, Xiongce Zhao and Peter T Cummings. Molecular simulations of stretching gold nanowires in solvents, *Nanotechnology*, 2007, 18, 424-507.
11. Song Hai Yang, Zha Xin Wei. Mechanical properties of nickel-coated single-walled carbon nanotubes and their embedded gold matrix composites; *Physics Letters A.*, 2010, 374, 1068–1072; Molecular dynamics study of effects of radius and defect on oscillatory behaviors of C60–nanotube oscillators, *Physics Letters A.*, 2009, 373, 1058–1061.
12. P. Ballone, R.O. Jones, A reactive force field simulation of liquid-liquid phase transitions in phosphorus, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 121, No. 16, pp. 8147-8157.
13. M. A. Khusenov, E. B. Dushanov and Kh. T. Kholmurodov. Correlation Effect of the Van-der-Waals and Intramolecular Forces for the Nucleotide Chain – Metallic Nanoparticles Binding in a Carbon Nanotube Matrix of Periodic Boundaries. *British Journal of Applied Science & Technology*, 2015, 8(3), 313-232.
14. Forester T.R. and Smith W. DL\_POLY\_2.0: A general-purpose parallel molecular dynamics simulation package. *Journal of Molecular Graphics*, 1996, 14(3), 136-141.
15. Yong C.W., DL\_FIELD - a force field and model development tool for DL\_POLY. In: Richard Blake, editor, CSE Frontiers. STFC Computational Science and Engineering Department (CSED). Science and Technology Facilities Council, STFC Daresbury Laboratory, 2010, 38-40.
16. J.H.Walther, R.Jaffe, T. Halicioglu and P.Koumoutsakos. Molecular dynamics simulations of carbon nanotubes in water. Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ., Proceedings of the Summer School, 2000, pp.5-20.
17. Piotr Kowalczyk. Molecular insight into the high selectivity of double-walled carbon nanotubes, *Electronic Supplementary Material (ESI) for Physical Chemistry and Chemical Physics*, 2012.
18. Kholmurodov Kh. (Ed.), *Computational Materials and Biological Sciences*, Nova Science Publishers Ltd., 2015, 188p.

Физико-технический институт им. С. У. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна

## **MOLECULAR-DYNAMICS SIMULATION OF VAN-DER-WAALS SYSTEM OF A NUCLEOTIDE CHAIN WITH GOLD NANOPARTICLES ON A CARBON NANOTUBE MATRIX**

**M.A. Khusenov, Kh.T. Kholmurodov**

Studying of molecular systems as nucleotide chain (NC) – nanoparticles (NP) – carbon nanotube (CNT) represents a great interest for a wide spectrum of theoretical and applied problems, for example, in the development of the electronics diagnostic apparatus, in biochemical and biotechnological applications (nanorobotic design, facilities of drug delivery in a living cell, so on). In the present work using molecular dynamics (MD) simulation method the interaction process of a small NC with gold NP on a matrix from CNT was simulated. Hereby for the NC-NP-CNT system in the inter-atomic pair interactions the only presence of Van-der-Waals (VdW) forces were assumed. For the short-ranged VdW forces a pair wise Lennard-Jones (LJ) potential was employed. At the same time, for the CNT description a many body Tersoff potential that, generally, has a quantum-chemical nature was used. Thus, so-called hybrid MD approach was realized, where the quantum-chemistry potential in combination with classical Newtonian trajectory calculations was employed. We have performed a series of the MD calculations with different NC-NP-CNT models that were aimed on the investigation of the peculiarities of NC-NP interactions, the formation of bonds and structures in the system, as well as the dynamical behavior in an environment confined by the CNT matrix

Key words: nucleotide chain (NC), gold nanoparticles (NP), carbon nanotume (CNT), Van-der-Waals (VdW) interactions, molecular dynamics (MD)

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Для публикации материалов в журнале авторам необходимо представить.

1. Рукопись общим объемом до 0,5 п.л. (краткое сообщение до 0,1 п.л.) следует представить в 2-х экземплярах на формате А4, отпечатанную шрифтом Time New Roman Cyt через 1 интервал и на диске (в редакторе Word for Windows), с аннотацией и ключевыми словами (не менее 3, не более 5 слов) (на русском и английском языках), включающих в себя английский перевод названия статьи, Ф.И.О. авторов (английский перевод приводится на последней странице). Форматирование статьи для издания в "Вестнике" производить по форме, аналогичной принятой Международной академической издательской компанией "Наука" (см., например, "Журнал неорганической химии" РАН и др.). Наличие в статье не полностью заполненных страниц не допускается. Статья должна быть подписана авторами на одном экземпляре. Разрешение на публикацию (письмо или экспертное заключение о возможности открытого опубликования) должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

2. Страницы должны иметь следующие размеры полей: верхнее - 2,5 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см. На первой странице текста располагают УДК (в левом верхнем углу листа от поля, размер шрифта 11). Название статьи (заглавными буквами, размер шрифта 11), инициалы и фамилию автора (авторов) (размер шрифта 11) по центру; аннотацию (не более 8 строк, размер шрифта 9); ключевые слова (не менее 3, не более 5 слов). Аннотация и ключевые слова должны располагаться с отступом 0,8 см от левого края. Далее следует текст статьи, формулы (размер шрифта 10) и цитируемая литература (размер шрифта 9). Текст статьи и цитируемую литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см). На последней странице (после литературы) должны быть указаны организация и английский перевод, не отделяемые от основного текста. В конце первой страницы слева под чертой - краткие сведения об авторе (авторах) (фамилия, имя, отчество полностью, место работы, ученая степень и звание, телефон или E-mail, с размером шрифта 9). Краткие сведения об авторах должны представлять собой обычную сноску редактора Word for Windows без символа, которая приводится в начале первого абзаца первой колонки статьи.

3. На отдельном листе следует приложить служебные и домашние адреса (с почтовым индексом), телефоны авторов статьи.

4. Таблицы располагаются по тексту. Каждый элемент таблицы должен представлять собой отдельную ячейку. Не допускается размещать колонку или строку с данными в одной ячейке! Если в статье одна таблица, то слово "Таблица" в названии не пишется. Если в статье несколько таблиц, то над названием таблицы справа пишут "Таблица 1(2,3 и т.д.)". Ссылка на таблицу оформляется следующим образом: "табл. 1(2,3 и т.д.)".

5. Оформление рисунков в формате BMP. Подписанные рисунки не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом с размером шрифта 9 под рисунком. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Тоновые фотографии предоставляются в двух экземплярах на белой глянцевой фотобумаге, без пояснительных надписей (стрелок, обозначений и пр.) на одной из этих фотограф<sup>TM</sup>. Если в статье несколько рисунков, то перед названием пишут "Рис. 1 (2, 3 и т.д.)". Ссылку на рисунок оформляют следующим образом:

"рис. 1(2,3 и т.д.)". Если в статье один рисунок то слово "Рис." под рисунком опускают.

6. Абзацный отступ, равный 0,8 см. должен начинаться после ввода (автоматически). Не допускается формирование абзацного отступа при помощи пробелов и табуляции!

7. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

8. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

9. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В конце материала ссылка должна быть расшифрована в следующем виде:

для статей: авторы; название статьи, издательство, год, том, номер (выпуск), страницы;

для монографий: список авторов; название, издательство, год, общее количество страниц.

Материалы представляются по адресу: Россия, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14.  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», к. 211  
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»  
Тел.: (473)2783-889; E-mail: [vestnik@vorstu.ru](mailto:vestnik@vorstu.ru)

Подписано в печать 25.02.2016.

Формат 60x84/8. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 12,9.

Тираж 500 экз. Заказ № 12.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14