

6. Абрамов О.В. Об использовании параллельных вычислений в задачах оптимального параметрического синтеза // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза.: ПГУ, 2009. С. 49–52.

7. Назаров Д.А. Алгоритм построения области работоспособности с детализированным квантованием области поиска // Надежность и качество: труды международного симпозиума: в 2-х т. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ. – 2009. – 2 т. – С. 18–22.

8. David M. Beazley, "Python Essential Reference". 2009. Pearson Education, Inc.

**УДК 681.5.015.23**

**Назаров Д.А.**

ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ВЛОЖЕННЫХ В ОБЛАСТЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫПУКЛЫХ ФИГУР**

*Рассматривается проблема анализа областей работоспособности аналоговых систем. Под областью работоспособности понимается ограниченная часть пространства параметров элементов, в каждой точке, которой выходные характеристики системы соответствуют заданным требованиям. Используется дискретная модель представления области работоспособности. На основе этой модели рассматриваются алгоритмы построения вложенных фигур для решения задач повышения параметрической надежности аналоговых систем. Предложены методы их параллельной реализации с целью сокращения времени решения этих задач.*

**Ключевые слова:**

НАДЕЖНОСТЬ, ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ, ОБЛАСТЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

**Введение**

Задача построения областей работоспособности (ОР) возникает на этапе проектирования технических систем. ОР аналоговой системы представляет собой множество значений параметров составляющих ее элементов, при которых выходные характеристики этой системы удовлетворяют заданным требованиям. Исследование этой области позволяет учитывать параметрические возмущения и постепенный дрейф параметров при выборе номинальных значений. Особую важность эта задача приобретает при проектировании систем ответственного назначения, уникальных технических систем, к которым не всегда применим вероятностно-статистический аппарат [1, 2].

Конфигурация ОР часто неизвестна, а получение ее характеристик сопряжено с рядом трудностей, как правило, связанных с вычислительной сложностью и высокой размерностью пространства параметров. Нахождение характеристик ОР позволит избежать расчетов модели системы при решении ряда задач исследования области допустимой вариации параметров. В работе используется дискретная модель представления многомерной ОР, основанная на аппроксимации области дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов, заданных узлами регулярной сетки и методе многомерного зондирования. Использование такой аппроксимации многомерной области позволяет исследовать внутренность области, а также выполнять построение вложенных фигур, реализующих критерии максимальной удаленности от границы области [3, 4].

В работах [3, 5] описаны алгоритмы анализа ОР, являющиеся последовательными. Хотя исследование ОР не требует расчетов модели, сами алгоритмы имеют переборный характер и имеют экспоненциальную сложность, зависящую от размерности пространства. Применение технологии параллельных вычислений позволит сократить время выполнения этих задач даже на современных персональных компьютерах, распределив вычислительный процесс по нескольким доступным ядрам процессора.

В данной работе рассматриваются алгоритмы анализа ОР и предлагаются их параллельные аналоги. Поскольку эти алгоритмы основаны на дискретном представлении ОР, то перед их рассмотрением целесообразно привести описание модели и метода такого представления области.

Дискретное представление области работоспособности

Объектом исследования является модель аналоговой технической системы, связывающая свои выходные характеристики, заданные  $m$ -вектором

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1)$$

с параметрами ее элементов (внутренние параметры), заданными  $n$ -вектором:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

в виде зависимостей:

$$y_j = y_j(\mathbf{x}), \forall j = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

На выходные и внутренние параметры налагаются ограничения. Внутренние параметры ограничиваются производственными допусками:

$$x_{j \min} \leq x_i \leq x_{j \max}, \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

а выходные параметры – требованиями к выходным характеристикам системы, как правило, заданным в техническом задании:

$$y_{j \min} \leq y_j \leq y_{j \max}, \forall j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Ограничения (5) называются условиями работоспособности и определяют критерий корректного функционирования системы. Нарушение какого-либо из неравенств (5) квалифицируется как отказ. К такого рода отказам приводят обычно изменения внутренних параметров вследствие их дрейфа под влиянием факторов внешней среды (влажность, температура, излучения) и внутренних процессов износа и старения.

Задача параметрического синтеза [6] состоит в выборе таких значений номинальных внутренних параметров, при которых вероятность безотказной работы в течение заданного интервала времени  $T$  будет максимальной:

$$\mathbf{x}_{nom} = \arg \max P(y_{j \min} \leq y_j(\mathbf{x}_{nom}, t) \leq y_{j \max}, \forall j = 1, 2, \dots, m, t \in [0, T]) \quad (6)$$

где  $X(\mathbf{x}_{nom}, t)$  – случайный процесс изменения внутренних параметров во времени.

Задачу параметрического синтеза (6) можно переформулировать следующим образом:

$$\mathbf{x}_{nom} = \arg \max P(X(\mathbf{x}_{nom}, t) \in D_x, t \in [0, T]), \quad (7)$$

где  $D_x$  – область в пространстве внутренних параметров, в каждой точке которой выходные характеристики (1) удовлетворяют требованиям (5). Эта область называется областью работоспособности:

$$D_x = \{\mathbf{x} \in R^n : y_{j \min} \leq y_j(\mathbf{x}) \leq y_{j \max}, \forall j = 1, 2, \dots, m\}. \quad (8)$$

Замена проверки соответствия выходных характеристик заданным требованиям для каждой случайной реализации вектора параметров на проверку принадлежности этого вектора ОР позволяет избавиться от многократных расчетов модели (3) при получении статистических оценок. Помимо этого, получение характеристик ОР открывает дополнительные возможности геометрического исследования области допустимой вариации параметров и применения детерминированных критериев выбора номинальных значений параметров.

Основную трудность определения характеристик ОР составляют размерность пространства параметров и отсутствие явных аналитических выражений модели (3) для большинства сложных систем ввиду того, что они часто задаются алгоритмически или в виде имитационной модели, вычисляющей выходные характеристики для заданного набора внутренних параметров.

В данной работе рассматривается способ построения ОР на основе аппроксимации многомерной фигуры дискретным множеством элементарных гипер-

параллелепипедов (ЭГ), заданных узлами регулярной сетки, и методе многомерного зондирования внутри этих ЭГ.

Построение ОР выполняется внутри ограничивающего бруса  $B$ , заданного интервалами:

$$B = \{[x_{i\min}, x_{i\max}], \forall i=1,2,\dots,n\}. \quad (9)$$

В качестве этого бруса может выступать как брус допусков (4), так и описанный вокруг ОР брус, найденный методом Монте-Карло [4].

Каждый диапазон  $[x_{i\min}, x_{i\max}], i=1,2,\dots,n$  разбивается эквидистантно на  $q_i$  интервалов - квантов. Их пересечения формируют узлы сетки, которые являются вершинами ЭГ. Каждый ЭГ задается набором  $n$  целочисленных индексов  $(k_1, k_2, \dots, k_n), k_i=1,2,\dots,q_i$ . По этим индексам, зная диапазоны ограничивающего бруса (9) и количества квантов  $q_i, i=1,2,\dots,n$  можно однозначно восстановить геометрические характеристики ЭГ:

$$\begin{aligned} x_{i\min}^k &= x_{i\min} + h_i \cdot (k_i - 1), \\ x_{i\max}^k &= x_{i\min}^k + h_i = x_{i\min} + h_i \cdot k_i \end{aligned} \quad (10)$$

где  $h_i = (x_{i\max} - x_{i\min}) / q_i$  - шаг сетки по каждому параметру внутри бруса  $B$ .

В центре каждого ЭГ выбирается точка-представитель:

$$x_r(k_1, k_2, \dots, k_n) = \left( \frac{x_{1\min}^{k_1} + x_{1\max}^{k_1}}{2}, \dots, \frac{x_{n\min}^{k_n} + x_{n\max}^{k_n}}{2} \right), \quad (11)$$

в которой вычисляются выходные характеристики системы (1). Если полученные выходные характеристики удовлетворяют ограничениям (5), то ЭГ с индексами  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  присваивается признак «1», противном случае - «0». Таким образом, для хранения признаков принадлежности ОР каждого ЭГ используется множество индикаторов:

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_R), \quad (12)$$

где  $R = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n$  - количество ЭГ,  $s_p \in \{0,1\}$  - результат вычисления функции принадлежности:

$$\chi(k_1, k_2, \dots, k_n) = \begin{cases} 1, & y_{j\min} \leq y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \leq y_{j\max}, j=1,2,\dots,m \\ 0, & y_{j\min} > y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \vee y_{j\max} < y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \end{cases} \quad (13)$$

Между индексом  $p$  элемента  $s_p$  множества индикаторов  $S$  и набором индексов  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  существует взаимнооднозначное соответствие [3]:

$$p(k_1, k_2, \dots, k_n) = k_1 + q_1 \cdot (k_2 - 1) + q_1 q_2 \cdot (k_3 - 1) + \dots + q_1 q_2 \dots q_{n-1} \cdot (k_n - 1) \quad (14)$$

Таким образом, модель дискретного представления ОР описывается четверкой:

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (15)$$

где  $n$  - размерность пространства внутренних параметров,  $B$  - ограничивающий брус (9),  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  - вектор с количеством квантов по каждому параметру,  $S$  - множество индикаторов принадлежности каждого ЭГ в соответствии с функцией (13). Построение ОР на основе этой модели состоит в вычислении всех элементов множества  $S$  индикаторов принадлежности.

Обозначим ЭГ  $g_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ , а их множество  $G = \{g_{k_1, k_2, \dots, k_n}, k=1,2,\dots,q_i, i=1,2,\dots,n\}$ . Тогда функция принадлежности (13) задает разбиение этого множества:

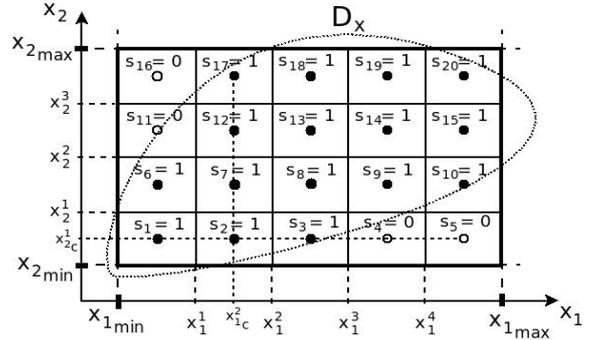
$$G = G^+ \cup G^-, G^+ \cap G^- = \emptyset, \quad (16)$$

где  $G^+ = \{g_{k_1, k_2, \dots, k_n} : s_{p(k_1, k_2, \dots, k_n)} = 1\}$ ,

$G^- = \{g_{k_1, k_2, \dots, k_n} : s_{p(k_1, k_2, \dots, k_n)} = 0\}$ . Множество  $G^+$  является дискретной аппроксимацией ОР в пространстве внутренних параметров.

Использование данных об ОР сводится к вычислению соответствующего ЭГ (10), вычислению со-

ответствующего индекса  $p$  элемента множества индикаторов (14) и проверки значения этого индикатора  $s_p$ . Такое представление позволяет выполнять обход всех ЭГ, исследовать геометрические характеристики этой области, например, поиск наиболее удаленной от границы области точки внутри ОР [3, 5].



$Q_1 = 5, Q_2 = 4$   
 $S = (1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)$   
 Рисунок 1 - Дискретное представление области работоспособности

Параллельный алгоритм построения вписанных симметричных фигур.

В работе [5] описывался алгоритм построения вписанного куба максимального объема как критерий оптимальности выбора номинальных параметров в условиях отсутствия информации о тенденции их дрейфа. Данный алгоритм состоял в последовательном переборе ЭГ из множества  $G^+$  и попытке построить вокруг данного ЭГ выпуклую симметричную фигуру максимального объема, целиком лежащую в ОР. Данная фигура состоит из ЭГ. Ввиду такого способа построения фигуры, наиболее подходящими фигурами считаются многомерный  $r$ -куб и  $r$ -окрестность, являющиеся многомерными аналогами окрестностей Мура и фон-Неймана [7].

Обозначим фигуру с центральным элементом  $g_{k_1, k_2, \dots, k_n}$  и значением половины ширины  $r \in \mathbb{N}$  как  $G_r(k_1, k_2, \dots, k_n) \in G$ . Тогда  $r$ -куб состоит из ЭГ, индексы которых удовлетворяют выражению:

$$G_r^c(k_1, k_2, \dots, k_n) = \{g_{i_1, i_2, \dots, i_n} \in G : k_i - r \leq i \leq k_i + r, r < k_i \leq q_i, i=1,2,\dots,n\} \quad (17)$$

$r$ -окрестность состоит из ЭГ, удовлетворяющие выражению:

$$G_r^d(k_1, k_2, \dots, k_n) = \{g_{i_1, i_2, \dots, i_n} \in G : \sum_{i=1}^n |i - k_i| \leq r\}. \quad (18)$$

Наглядно эти окрестности проиллюстрированы на рисунке 2.

Фигура  $G_r$  ( $G_r^c$  или  $G_r^d$ ) является вписанной в ОР, когда она состоит из элементов  $G^+$ , или, учитывая (15), в ней отсутствуют элементы из  $G^-$

$$G_r \cap G^- = \emptyset. \quad (19)$$

Алгоритм построения выпуклой фигуры состоит в переборе элементов  $g_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in G^+$  множества  $G^+$ . Каждый из этих элементов считается центром вписанной фигуры, состоящей из ЭГ. Для каждого из этих элементов выполняются действия:

Алгоритм 1.

Устанавливается начальный параметр ширины окрестности  $r = 1$ ; Выполняется перебор всех элементов  $G_r$  в соответствии с (17) или (18);

Для каждого элемента из  $G_r$  проверяется его вхождение в  $G^+$  (либо перебор до тех пор, пока не будет найден элемент из  $G^-$ );

Если все элементы  $G_r$  принадлежат  $G^+$ , инкремент  $r + 1$ , переход к шагу 2.

Если  $r > 2$ , то установить ЭГ  $g_{k_1, k_2, \dots, k_n}$  вес, равный  $r - 1$ ;

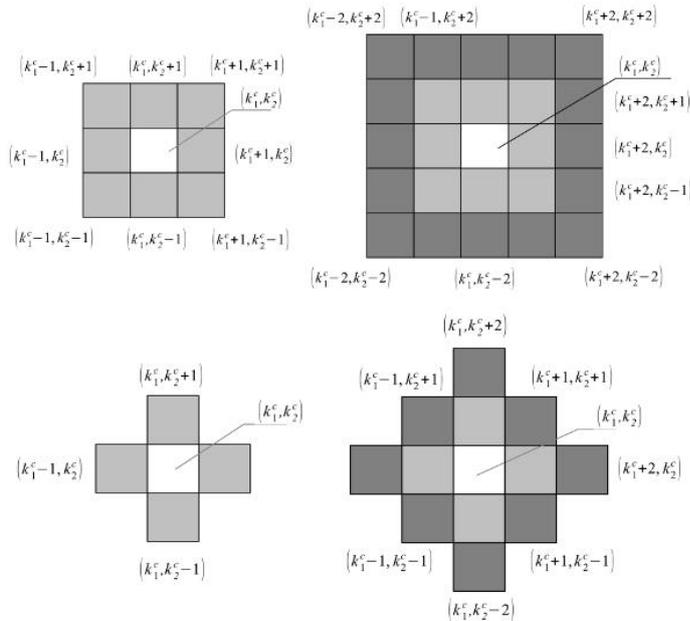


Рисунок 2 - Двумерные  $r$ -кубы (сверху) и  $r$ -окрестность (снизу)

В результате выполнения алгоритма, ЭГ из множества  $G^+$  будут иметь веса, отражающие размер фигуры, которую можно вписать в ОР с центром в данном ЭГ, что принимается за меру удаленности ЭГ от границы ОР [3].

Как видно, приведенный алгоритм выполняется последовательно на всем множестве  $S$  индикаторов принадлежности (12). Для каждого элемента  $s_p \in S$  выполняется попытка построить максимальную фигуру, состоящая в многократной проверке состояния других элементов, что сводится к проверке других элементов множества индикаторов. Декомпозиция данного алгоритма предлагается выполнять на переборе элементов множества индикаторов.

Декомпозиция рассмотренного алгоритма построения вписанных в ОР фигур в рамках используемой дискретной модели (15) заключается в разбиении множества индикаторов  $S$  на  $K$  непересекающихся интервалов:

$$P_s = \{(p_1^1, p_2^1), (p_1^2, p_2^2), \dots, (p_1^K, p_2^K)\}, \quad (20)$$

таким образом, что:

$$S = \bigcup_{i=1}^K \{s_{p_i^1}, \dots, s_{p_i^2}\}. \quad (21)$$

Каждый  $i$ -й параллельный процесс выполняет Алгоритм 1 на интервале  $(p_1^i, p_2^i)$ . Стоит отметить, что в Алгоритме 1 внешний цикл выполнял перебор элементов множества  $G^+$ , однако с технической точки зрения, перебор выполняется по всему множеству ЭГ и предварительной проверкой их принадлежности ОР. Таким образом, стоит отметить, что имея разбиение (20), (21) на равные диапазоны, параллельные процессы будут выполнять различное количество работ, поскольку они будут иметь различное количество нулей и единиц. Блок-схема параллельного процесса построения вписанной фигурой проиллюстрирована на рисунке 3.

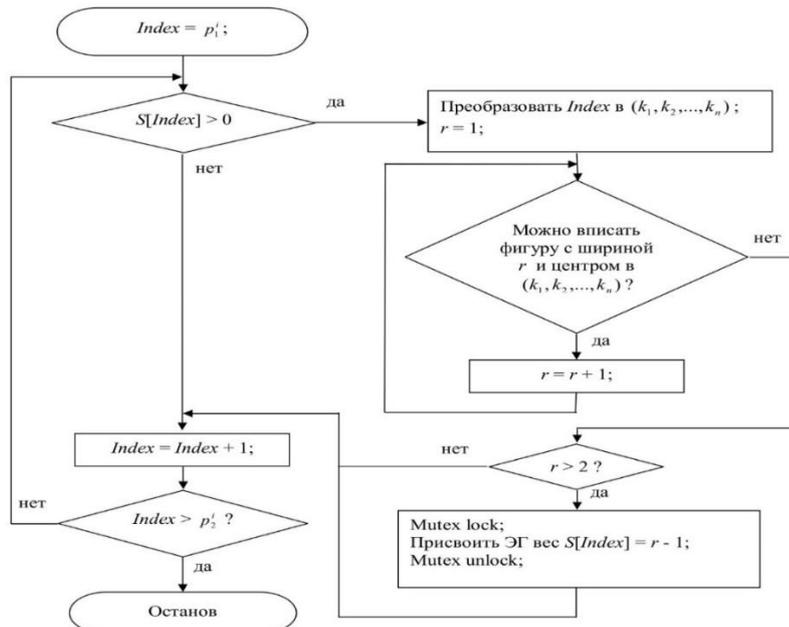


Рисунок 3 - Блок-схема параллельного процесса поиска вписанной фигуры

Результаты экспериментов построения куба максимального объема в ОР делителя напряжения (4 параметра) [8, 9] на компьютерах с двухъядерной, четырехъядерной и восьмьюядерной архитектурой

(соответственно: два параллельных процесса, четыре и восемь) приведены ниже в таблице 1, таблице 2 и таблице 3.

Таблица 1

Ускорение работы алгоритма на 2-ядерной архитектуре			
Квантов	1 процесс, сек.	2 процесса, сек	Ускорение
40	5.5	3.5	1.57
60	58	44	1.31
80	495	412	1.2
100	3233	2852	1.13

Таблица 2

Ускорение работы алгоритма на 4-ядерной архитектуре			
Квантов	1 процесс, сек.	4 процесса, сек	Ускорение
40	2	1	2
60	23	11	2.09
80	199	120	1.65
100	1356	835	1.62

Таблица 3

Ускорение работы алгоритма на 8-ядерной архитектуре			
Квантов	1 процесс, сек.	8 процессов, сек	Ускорение
40	2	1	2
60	30	22	1.36
80	287	227	1.26
100	2385	2012	1.19

#### Заключение

Использование ОР для анализа диапазонов допустимой вариации параметров системы позволяет избежать моделирования системы, что существенно снижает вычислительную трудоемкость ряда задач, связанных с исследованием ОР. Тем не менее, некоторые задачи, использующие информацию об ОР, имеют переборный характер, что в условиях высокой размерности пространства может повысить трудоемкость их решения [10]. С целью повышения эффективности использования вычислительной мощности современных процессоров с многоядерной ар-

хитектурой и реализации алгоритма на суперкомпьютерных системах предложен способ декомпозиции задачи построения вписанных в ОР фигур. Процессы, выполняемые параллельно не обладают полной автономией, т.к. обращаются к общему объекту – множеству индикаторов принадлежности. Результаты натурных экспериментов показали незначительное уменьшение общего времени решения задачи.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов О.В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С.53-66.
2. Абрамов О.В. Об оценке вероятности наступления рискованного события: функционально-параметрический подход // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 1(13). – С.24-31.
3. Назаров Д.А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. – 2011. № 2(28). – С.59-69.
4. Катуева Я.В., Назаров Д.А. Аппроксимация и построение областей работоспособности в задаче параметрического синтеза // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: ПГУ. – 2005. – Т.1. – С.130-134.
5. Катуева Я.В., Назаров Д.А. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности // Информационные технологии. – 2015. – № 9. – С.651-656.
6. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. – М.: Наука, 1992.
7. Schiff J.L. "Cellular automata: a discrete view of the world". A John Wiley & Sons Inc. Publication. University of Auckland. 2008.
8. Саушев А.В. Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем // Информатика и системы управления. – 2012. № 3(33). – С.120-131.
9. Назаров Д.А. Подход к анализу параметрической чувствительности систем на основе дискретного представления областей работоспособности // Информатика и системы управления. – 2017. – № 4(54). – С.94-104.
10. Назаров Д.А. Основные компоненты и функции программного комплекса построения и анализа областей работоспособности // Надежность и качество – 2013: тр. Междунар. симпозиума: в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – 1 т. – С.255-256.

УДК: 658.52

Адамов<sup>1</sup> А.П., Адамова<sup>2</sup> А.А.

<sup>1</sup>Дагестанский Государственный Технический Университет, Махачкала, Россия

<sup>2</sup>Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

#### БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ С НУЛЕВОЙ МОЩНОСТЬЮ

*В течение последних нескольких десятилетий беспроводные сенсорные сети представляют большой интерес. Беспроводные сенсорные сети - это интеграция сенсорной технологии, технологии встроженных вычислений, современных сетевых и беспроводных коммуникационных технологий, технологии распределенной обработки информации и т.д. Они могут использоваться для мониторинга, распознавания и сбора информации об окружающей среде или объектах с помощью микро датчиков и передачи этой информации пользователям. Поэтому они получили множество применений, в таких областях как военная оборона, промышленность и сельское хозяйство, городское управление, биологическое и медицинское лечение и мониторинг окружающей среды.*

*Однако беспроводные сенсорные сети не получили быструю коммерциализацию, как ожидали люди. Одним из проблем стало энергообеспечение сетевых узлов беспроводных датчиков. В настоящее время узел беспроводной сенсорной сети обычно использует традиционную химическую батарею. Из-за большого количества устройств и их небольшого размера замена батареи непрактична или просто невозможна. Он не может полностью удовлетворить требованиям развития беспроводных сенсорных сетей. Поэтому все больше внимания привлечено для сбора энергии из окружающей среды для достижения мощности для беспроводных сенсорных сетей.*

#### Ключевые слова:

БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР, БЕСПРОВОДНОГО СЕНСОРА С НУЛЕВОЙ МОЩНОСТЬЮ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ, ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГИИ

Беспроводные сенсоры с нулевой мощностью

Это беспроводные сенсорные сети (БСС) - это термин, который используется для беспроводных