

УДК 681. 5.015.23

© 2018 г. Д.А. Назаров, канд. техн. наук  
(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

## ПРОГРАММНАЯ ПОДСИСТЕМА АНАЛИЗА КОНФИГУРАЦИИ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Рассматривается задача анализа конфигурации областей работоспособности аналоговых систем в рамках проблемы оптимального параметрического синтеза. Описываются структура и функциональные возможности подсистемы анализа областей работоспособности в рамках программной системы нахождения и использования областей работоспособности аналоговых систем.

**Ключевые слова:** надежность, параметрический синтез, область работоспособности, САПР.

DOI: 10.22250/isu.2018.58.92-103

### Введение

Одним из важных этапов проектирования технических систем является этап параметрического синтеза с учетом требований надежности по постепенным отказам. В особой степени это касается систем ответственного назначения, которые зачастую являются уникальными, выпускаемыми в единичных экземплярах, к которым не всегда применим вероятностно-статистический аппарат, являющийся доминирующим в теории надежности. В этом случае необходим подход, основанный на исследованиях и учете функциональных связей между выходными характеристиками системы, параметрами ее элементов и эксплуатационными факторами, вызывающими их изменение в процессе функционирования. Такой подход называется *функционально-параметрическим* [1, 2].

Решение задачи оптимального выбора номинальных значений параметров элементов системы на основе функционально-параметрического подхода включает исследование области в пространстве значений этих параметров, при которых выходные характеристики системы удовлетворяют заданным требованиям. Такая область в данной работе называется *областью работоспособности* (ОР), строгое определение которой будет дано ниже.

Получение геометрических характеристик ОР позволяет существенно сокращать вычислительные затраты при получении стохастических оценок надежности путем имитации случайных параметрических возмущений и проверки нахождения вектора параметров в области. В зависимости от способа описания геометрических характеристик многомерной ОР становится возможным применение детерминированных критериев выбора оптимальных в определенном смысле значений параметров, а также исследование свойств самой области (односвязность, выпуклость, ориентация в пространстве и т.д.) [3 – 10].

В данной работе описывается подсистема программной системы нахождения и использования областей работоспособности (СНИОР) [11], ее компоненты, функции и алгоритмы, лежащие в их основе. Перед рассмотрением алгоритмов анализа ОР важно привести описание модели представления ОР, на которой основаны эти алгоритмы.

### Задача построения ОР

В рамках функционально-параметрического подхода рассматривается модель системы, связывающая вектор характеристик, интересующих потребителя,

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

с вектором параметров ее элементов (внутренних параметров)

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

в виде зависимостей:

$$y_i = y_i(\mathbf{x}), \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

На практике для достаточно сложных систем часто трудно задать модель (1) в явном аналитическом виде, поэтому зависимости (1) описываются алгоритмически в виде численного решения систем дифференциальных уравнений либо задаются в виде имитационных моделей, реализующих концепцию «черного ящика» [12].

На выходные и входные параметры налагаются ограничения. Выходные параметры ограничиваются условиями работоспособности, заданными в спецификации:

$$y_{\min i} \leq y_i(\mathbf{x}) \leq y_{\max i}, \forall i = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

внутренние параметры ограничиваются обычно производственными допусками

$$x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Условия работоспособности (2) определяют в пространстве внутренних параметров область, в каждой точке которой выходные характеристики удовлетворяют требованиям (2):

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

Задача построения ОР состоит в необходимости построить в пространстве внутренних параметров фигуру с известной конфигурацией, которая бы являлась приближением к неизвестной области  $D_x$  при заданной модели (1), известных условиях работоспособности (2) и допусках (3).

Основные трудности определения характеристик этой области состоят в том, что, как было сказано выше, модель (1) часто задается в неявном виде, что дает возможность только поточечного исследования пространства параметров, большой размерности этого пространства, а также вычислительной сложности модели.

Существуют различные способы построения и аппроксимации ОР [13]. В данной работе используется модель дискретного представления многомерной области множеством элементарных гиперпараллелепипедов (ЭГ), заданных узлами регулярной сетки [4].

Эта модель описывается четверкой вида:

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (3)$$

где  $n$  – размерность пространства внутренних параметров;  $B = \{(x_{\min i}, x_{\max i}), \forall i = 1, 2, \dots, n\}$  – ограничивающий брус, в качестве которого может выступать как брус допусков, заданный ограничениями (3), так и построенный методом Монте-Карло описанный около ОР брус, являющийся первым ее приближением [14]. Компонент  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  описывает количество интервалов-«квантов», на которое разбивается каждый  $i$ -й диапазон бруса  $B$ . Точки пересечения этих квантов по всем параметрам образуют сетку, а сами кванты – ребра ЭГ. Каждый ЭГ задается набором индексов  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ ,  $k_i = 1, 2, \dots, q_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , по которым можно вычислить координаты всех его вершин, длины его ребер и его объем. Таким образом, брус  $B$  разбивается на  $R = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n$  ЭГ, которые образуют множество:

$$B_g = \{e_{k_1, k_2, \dots, k_n} : k_i = 1, 2, \dots, q_i, i = 1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

где  $e_{k_1, k_2, \dots, k_n}$  – ЭГ, образованный квантами с индексами  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ . Из всего множества  $B_g$  необходимо выделить такие ЭГ, которые бы в объединении представляли аппроксимацию неизвестной ОР. Для этой цели используется компонент  $S = (s_1, s_2, \dots, s_R)$  модели (3), являющийся множеством индикаторов принадлежности ЭГ аппроксимации ОР. Каждый элемент этого множества  $s_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, R$  показывает, какому из подмножеств  $B_g = B_g^+ \cup B_g^-$ ,  $B_g^+ \cap B_g^- = \emptyset$  принадлежит соответствующий ЭГ  $e_{k_1, k_2, \dots, k_n}$ . Подмножество  $B_g^+$  состоит из ЭГ со значением индикаторов принадлежности, равным 1, и представляют собой искомую аппрок-

симацию ОР. Между каждым элементом  $s_p$  множества индикаторов и набором индексов ЭГ  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  существует взаимнооднозначное соответствие [4, 5]. Значение каждого индикатора вычисляется при построении ОР с помощью характеристической функции принадлежности, в основе которой – вычисление выходных характеристик (1) и проверка выполнения условий работоспособности в центральной точке каждого ЭГ. В работе [4] подробно описан алгоритм построения ОР на основе модели (3). На рис. 1 приведена наглядная иллюстрация используемого принципа построения ОР на основе модели (3). В этой работе рассматривается структура данных построенной аппроксимации ОР на основе такой модели.

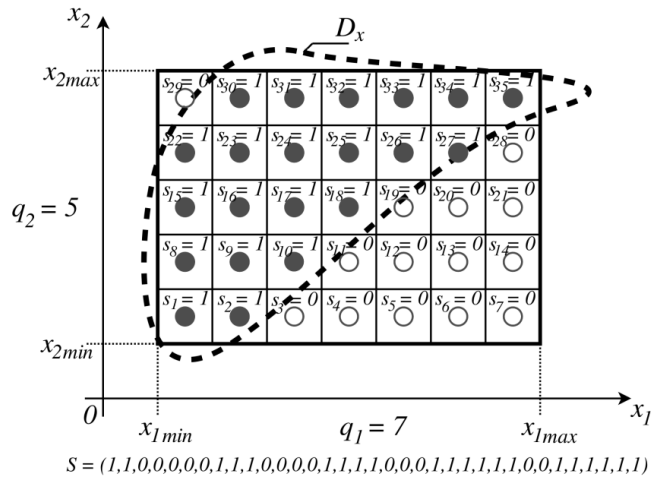


Рис. 1. Дискретное представление ОР в двумерном случае.

## Программный комплекс построения и анализа ОР

Общая структура СНИОР приведена на рис. 2. Подсистема построения ОР с описанием основных функций ее модулей, структур данных и алгоритмов приведена в работе [11]. Для рассмотрения функций подсистемы анализа ОР приведем описание лишь взаимодействия модулей системы, используемых при анализе ОР.

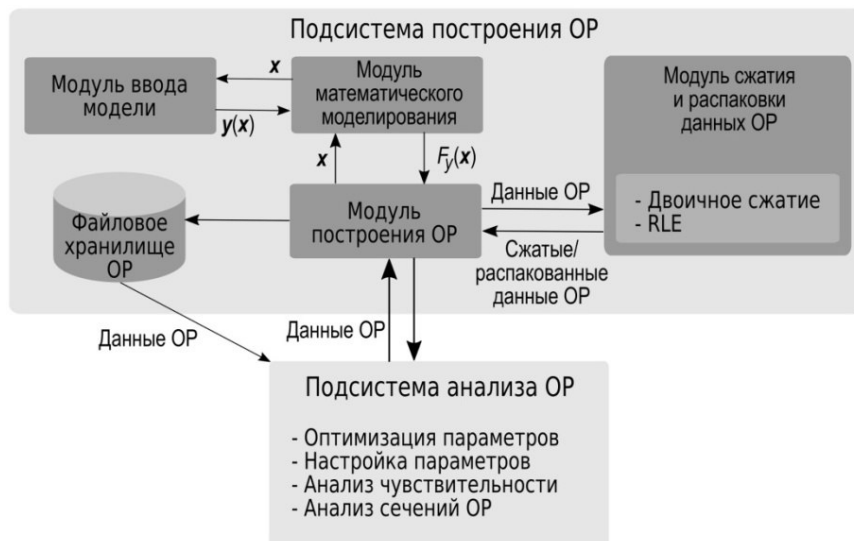


Рис. 2. Модульная структура СНИОР.

Подсистема анализа ОР может использовать как данные ОР, сохраненные в файле, так и только что построенной области. В обоих случаях подсистема использует модель  $G_R$  (3) дискретного представления ОР. Алгоритмы анализа ОР оперируют ЭГ, которые задаются набором индексов  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$ , и в процессе их перебора необходимо знать, какому из подмножеств ( $B_g^+$  или  $B_g^-$ ) каждый из них принадлежит. Для выполнения этой проверки следует вычислить индекс  $p$  элемента множества индикаторов  $s_p$ , соответствующего индексам  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  ЭГ. Такую функцию предоставляет *модуль построения ОР*. Если данные ОР подвергались сжатию, то выполняется обращение к функциям *модуля сжатия и распаковки данных ОР*, после чего требуемая информация возвращается в *подсистему анализа ОР*. Обозначим операцию вычисления индекса  $p$  индикатора принадлежности  $s_p$  по индексам  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  как  $p(k_1, k_2, \dots, k_n)$ . Формулы взаимнооднозначного соответствия этих индексов приведены в [5] и в данной работе не принципиальны.

### Подсистема анализа ОР

Подсистема анализа ОР является расширяемой: возможно дополнение его новыми функциями анализа дискретного представления ОР на основе модели (3). Главная, но не обязательная особенность функций этой подсистемы состоит в отсутствии необходимости обращения к модели самой системы (1), что для некоторых задач (например, проверки нахождения произвольного вектора параметров внутри области) существенно снижает вычислительные затраты и время получения стохастических оценок параметрической надежности. Рассмотрим далее основные функции данной подсистемы, нацеленные на исследование свойств ОР, которые могут помочь при решении задачи повышения параметрической надежности систем на этапе их проектирования.

Задача оптимизации параметров состоит в применении детерминированного критерия типа запаса к поиску внутри области точки, имеющей максимальную удаленность от границы этой области [4,7,8,9,13]. Данный подход применим в случае отсутствия знаний о закономерностях дрейфа параметров во времени и когда наиболее рациональным решением выбора номинальных значений параметров будет максимальное удаление от границы для наихудшего варианта развития событий – движения вектора параметров к границе по кратчайшему расстоянию.

Реализация кратчайшего расстояния от некоторой внутренней точки  $\mathbf{x} \in D_x$  до границы области состоит в построении вписанного в ОР шара: среди всех возможных отрезков от точки  $\mathbf{x} \in D_x$  до точки на границы наименьшим из них будет

радиус  $r$  вписанного шара, имеющего наименьший объем  $V(\mathbf{x}, r)$ :

$$v_r(\mathbf{x}, r) = \min_r V(\mathbf{x}, r),$$

тогда оптимальным по критерию запаса работоспособности решением задачи будет поиск точки  $\mathbf{x} \in D_x$ , являющейся центром максимального вписанного шара (рис. 3):

$$\mathbf{x}_o = \arg \max_{\mathbf{x} \in D_x} v_r(\mathbf{x}) = \arg \max_{\mathbf{x} \in D_x} \min_r V(\mathbf{x}, r). \quad (5)$$

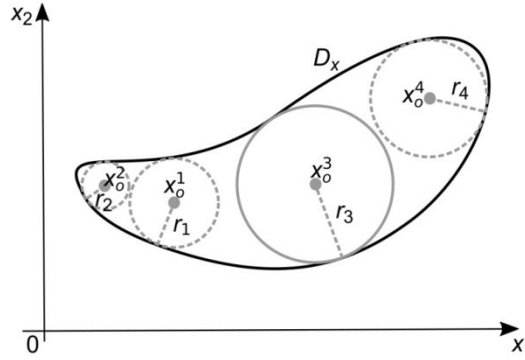


Рис. 3. Критерий запаса работоспособности выбора оптимальных параметров в двумерном случае.

Решение задачи выбора оптимальных в смысле критерия (5) параметров для дискретного представления ОР на основе модели (3) выполняется на дискретном множестве  $B_g$  ЭГ и состоит в двухэтапной процедуре. На первом этапе выполняется поиск ЭГ, удовлетворяющих критерию (5). На втором этапе по связным множествам найденных ЭГ интерполируются значения оптимальных параметров.

Алгоритм поиска ЭГ, оптимальных по критерию запаса работоспособности, основан на максимизации минимального расстояния от некоторого внутреннего элемента  $e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in B_g^+$  до граничного элемента. В этом случае расстояние  $r$  до границы измеряется количеством ЭГ.

Фигура  $B_c^r$ , вписанная в  $B_g^+$  и обеспечивающая минимальный запас работоспособности, также состоит из ЭГ:  $B_c^r \subseteq B_g^+$ . Целевой функцией является объем фигуры  $V(e_{k_1, k_2, \dots, k_n}, r)$ , центр которой ЭГ  $e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in B_g^+$ . Тогда объем вписанной фигуры – результат минимизации:

$$v_r(e_{k_1, k_2, \dots, k_n}) = \min_r V(e_{k_1, k_2, \dots, k_n}, r).$$

Искомое множество ЭГ, оптимальных в смысле максимального запаса работоспособности, является результатом максимизации объема вписанной фигуры по ЭГ множества  $B_g^+$ :

$$B_o^r = \{e_{k_1, k_2, \dots, k_n}^* \in B_g^+ : e_{k_1, k_2, \dots, k_n}^* = \arg \max_{B_g^+} v_r(e_{k_1, k_2, \dots, k_n})\}. \quad (6)$$

В качестве вписанных в  $B_g^+$  фигур используется  $r$ -куб как  $n$ -мерная реализация окрестности Мура, и  $r$ -окрестность как  $n$ -мерная реализация окрестности фон Неймана [15]. На рис. 4 приведены примеры  $r$ -куба и  $r$ -окрестности.

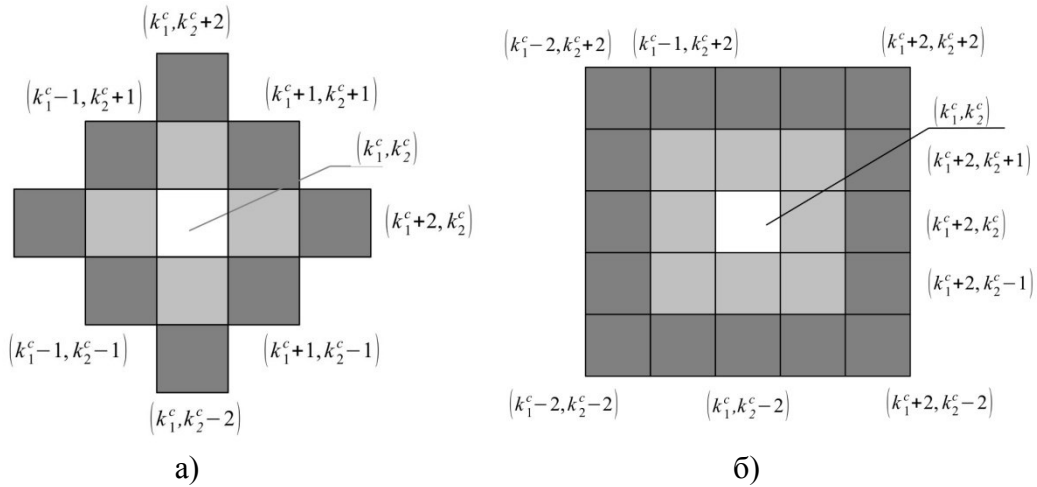


Рис. 4. Примеры вписываемых фигур в двумерном случае:

а)  $r$ -окрестность при  $r = 2$ ; б)  $r$ -куб при  $r = 2$ .

Применение  $r$ -окрестности и  $r$ -куба в качестве критерия запаса работоспособности, очевидно, будет давать различные результаты. Эти отличия зависят от конфигурации ОР и детализации сетки, на основе которой строилось дискретное представление ОР, поэтому четкие рекомендации по использованию того или иного критерия дать затруднительно, однако очевидно, что  $r$ -окрестности удобно использовать в областях с ярко выраженной диагональной конфигурацией, тогда как  $r$ -куб подойдет для областей, более ориентированных по координатным осям.

Задача анализа чувствительности системы к параметрическим возмущениям состоит в выполнении геометрического анализа ОР, позволяющего сделать заключение о величине допустимых отклонений параметров для заданных номиналов, выявить «узкие места» ОР, в которых случайные параметрические возмущения могут привести к отказу. В данной работе предлагается подход к получению такой информации на основе построения вписанных в ОР гиперпараллелепипедов, длины ребер которых по каждому измерению будут показывать относительные запасы для дрейфа соответствующих параметров.

Для оценки запасов по каждому отдельному параметру и получения их соотношений требуется алгоритм построения несимметричных фигур, вписанных в ОР. В качестве таких фигур рассмотрим гиперпараллелепипеды с гранями, параллельными осям координат. Как и симметричные фигуры, эти гиперпараллелепипеды по сути являются множествами ЭГ, принадлежащих дискретному представлению ОР с индексами, удовлетворяющими определенным требованиям для формирования фигуры. Обозначим такую фигуру  $P \subseteq B_G^+$ .

Характерной особенностью алгоритма построения вписанного гиперпарал-

лелепеда в отличие от куба является указание в качестве начального элемента не центрального, а вершинного элемента. Увеличение объема фигуры достигается не итерационным радиальным «наращиванием» посредством увеличения длины ребра [4, 9], а указанием диагонального элемента, вычисляемого путем последовательного смещения  $(\delta_1^P, \delta_2^P, \dots, \delta_n^P)$  индексов относительно начального элемента  $(k_1^P, k_2^P, \dots, k_n^P)$ . Алгоритм построения вписанных гиперпараллелепипедов детально описан в работе [5]. В работе [6] приведена модификация этого алгоритма для выполнения с использованием параллельных вычислений.

Пример результата работы алгоритма для делителя напряжения [5, 16] может выглядеть как в таблице, а также в графическом виде, отображая на сечениях области найденные гиперпараллелепипеды.

Параметр	Мин	Макс	Длина ребра	Кол-во квантов
$R_1$ , Ом	1,004	150,901	149,897	2
$R_2$ , Ом	507,286	1500,0	992,713	15
$C$ , Ф	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$4,555 \cdot 10^{-9}$	$4,455 \cdot 10^{-9}$	9
$U_{BX}$ , В	4,577	6,289	1,713	3

При анализе полученных прямоугольников также нельзя упускать из виду тот факт, что разные параметры могут иметь различную скорость дрейфа, а это может внести существенные поправки в результаты анализа конфигурации ОР. Еще одним важным для предложенного метода анализа конфигурации ОР является тот факт, что он рассматривает дрейф параметров по отдельности и не учитывает их совместную вариацию. Тем не менее, предложенный метод полезен для выявления ОР, имеющих характерные вытянутые по отдельным параметрам формы.

Функция анализа сечений ОР предназначена для автоматического и ручного анализа ОР по отдельным ее сечениям. Наиболее информативными являются двумерные сечения, но для ОР больших размерностей их анализ по двумерным сечениям может быть громоздким, трудным. С целью оценки выбора номинальных параметров, их корректировки, а также оценки конфигурации ОР по отдельным параметрам анализ сечений ОР может быть очень полезен при принятии проектных решений.

Построение сечений дискретного представления ОР не представляет никакой сложности. Для загруженной ОР оператор системы указывает индексы пары свободных параметров  $(p_1, p_2)$ ,  $p_i = 1, 2, \dots, n$ ,  $p_1 \neq p_2$  и задает значения остальных фиксированных параметров  $f_j = 1, 2, \dots, q_j$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{p_1, p_2\}$ . Система выполняет построение указанного сечения дискретного представления ОР.

Полезным может быть размещение точки с указанными координатами, –



например, для случая, когда требуется визуально показать положение параметров в ОР. На рис. 5 показаны сечения дискретного представления ОР.

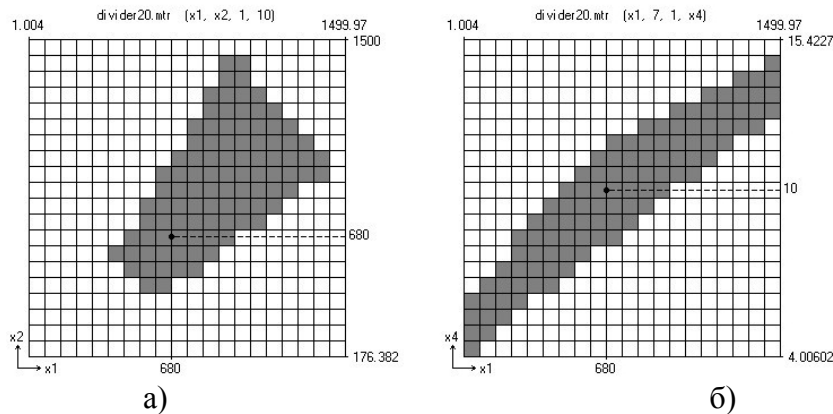


Рис. 5. Пример построения двумерных сечений дискретного представления ОР с нанесением вектора номинальных значений параметров.

Построение сечений методом Монте-Карло. Построение ОР с помощью модели (3), основанной на регулярной сетке, представляет собой аппроксимацию, при этом точные характеристики истинной области неизвестны. Поэтому оценить точность сеточной аппроксимации предлагается методом, в котором можно достичь определенной точности без увеличения хранимых данных, – Монте-Карло [17].

Для большинства задач проектирования, связанных с оптимальным выбором параметров [4, 9, 10], высокая точность аппроксимации ОР, в частности ее приграничных областей, не важна, поскольку интерес представляет подобласть, удаленная от границы. При этом слишком грубое представление ОР, – например, вложенными гиперпараллелепипедами или эллипсоидами – может не дать достаточно такой информации о конфигурации области как односвязность, выпуклость или вогнутость. Рекомендаций к выбору оптимального шага сетки для представления ОР с помощью модели (3) также нет.

Основная потребность в контроле точности аппроксимации ОР состоит в подтверждении корректности определения таких характеристик области как связность области, выпуклость или вогнутость. Аппроксимация с использованием достаточно крупной сетки в некоторых случаях может представить ОР в виде многосвязной фигуры, что способно повлечь некорректный выбор номиналов. В качестве одного из эффективных методов визуального контроля дискретной аппроксимации ОР предлагается построение двумерных сечений ОР методом Монте-Карло.

На рис. 6а показано сечение дискретной аппроксимации ОР плоскостью первого и второго параметров, проходящей через найденную оптимально удаленную от границ области точку. На рис. 6б изображено сечение ОР этой же плоскостью с теми же значениями фиксированных параметров, построенное непосред-

ственно по ОР методом Монте-Карло. Можно видеть, что существенных различий в конфигурации и форме области в данном сечении не наблюдается.

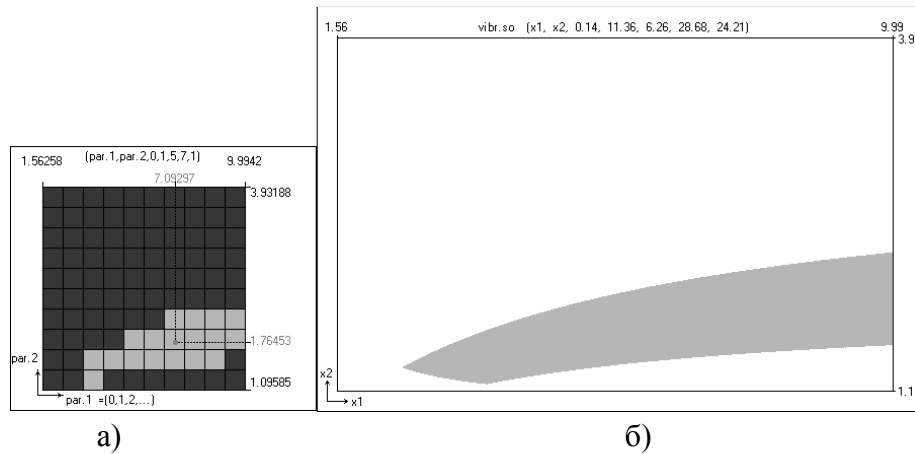


Рис. 6. Сечение ОР: а) сечение дискретной аппроксимации ОР; б) контрольное сечение ОР, построенное методом Монте-Карло.

На рис. 7 проиллюстрирована некорректная аппроксимация ОР из-за относительной узости фактической ОР и крупного шага сетки. Как видно на рис. 7а, по результатам дискретной аппроксимации ОР воспринимается как неодносвязная область, в то время как контрольное сечение этой же плоскостью показывает, что область односвязная (рис. 7.б).

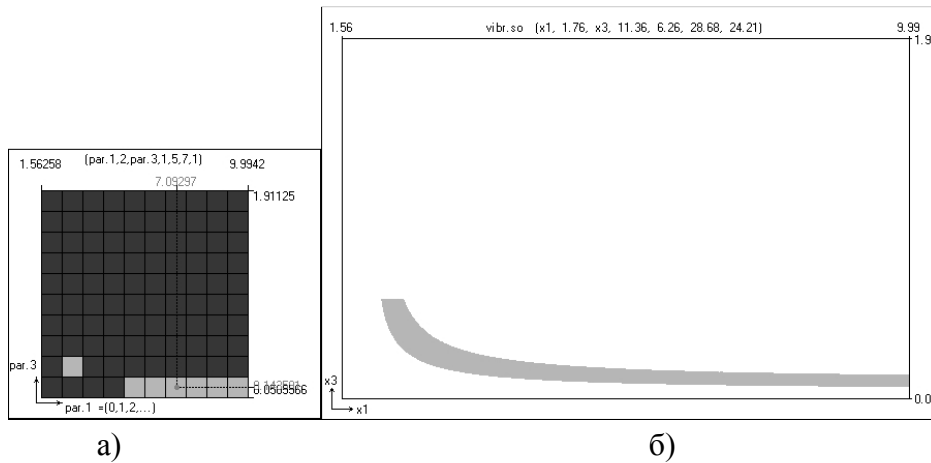


Рис. 7. Ошибка дискретного представления ОР: а) сечение дискретной аппроксимации ОР; б) контрольное сечение ОР, построенное методом Монте-Карло.

Функция проверки связности ОР выполняет обход элементов множества ЭГ  $B_g^+$ , выделяя связные подмножества. В определении связности множества дискретных ЭГ главным понятием является соседство двух ЭГ. Два ЭГ  $e_{k_1, k_2, \dots, k_n}$  и  $e_{m_1, m_2, \dots, m_n}$  являются соседними, если только один из их индексов отличается не более чем на единицу (например, расположение соседнего ЭГ в двумерном случае: слева, справа, сверху, снизу)  $\sum_{i=1}^n |k_i - m_i| = 1$ . Алгоритм подробно описан в работе [3], а его схематическая иллюстрация приведена на рис. 8.

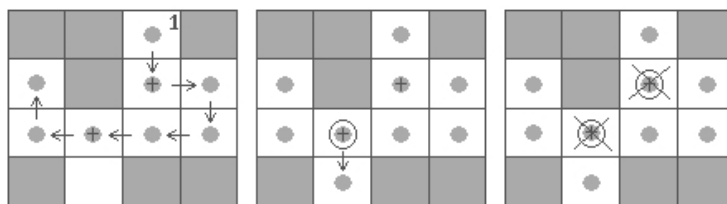


Рис. 8. Иллюстрация алгоритма обхода связного множества ЭГ.

Основной принцип работы алгоритма состоит в маркировке непомяченных ЭГ, запоминании узловых элементов и возвращении в последний добавленный узел при попадании в тупик. Каждое связное множество помечается своим маркером, что позволяет различать их и исследовать по отдельности.

### Заключение

Рассмотренная в работе программная подсистема анализа конфигурации областей работоспособности аналоговых систем предназначена для проведения дополнительных исследований областей допустимых значений параметров с целью повышения параметрической надежности проектируемых систем. Исследования конфигурации областей работоспособности позволяют применять детерминированный критерий выбора номинальных значений параметров, основанный на принципе максимизации минимального запаса работоспособности. Алгоритм построения вложенных в область гиперпараллелепипедов дает возможность оценить допустимые диапазоны дрейфа параметров относительно друг друга и сделать предварительные выводы о чувствительности системы к возмущениям отдельных параметров. Проверка качества аппроксимации дискретным представлением его области связности дает информацию о необходимости рассмотрения отдельных связных частей области или возможности пренебречь отдельными незначительными частями, а также о выпуклости или вогнутости области. Описанная программная подсистема может пополняться новыми функциями анализа дискретного представления области работоспособности на основе модели (3).

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С. 53-66.
2. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965.
3. *Катуева Я.В. Назаров Д.А.* Алгоритмы анализа области работоспособности, заданной в матричной форме // Информатика и системы управления. – 2005. – № 2(10). – С. 118-128.
4. *Назаров Д.А.* Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. – 2011. – №2(28). – С. 59-69.
5. *Назаров Д.А.* Подход к анализу параметрической чувствительности систем на основе дискретного представления областей работоспособности // Информатика и системы управле-

- ния. – 2017. – № 4(54). – С. 94-104. DOI: 10.22250/isu.2017.54.94-104
6. *Назаров Д.А.* Параллельный алгоритм построения вложенных в область работоспособности гиперпараллелепипедов // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2017): тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф., 12-14 декабря 2017. – М.: ИПУ РАН. – 2017. – С. 260-263.
  7. *Назаров Д.А.* Параллельный алгоритм построения вложенных в область работоспособности выпуклых фигур // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2018. – Т.1. – С. 258-261.
  8. *Nazarov D.A.* Parallel algorithm of inscribing figures into acceptability region // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. /Ed. Uvaysov S.U., Ivanov I.A. – М.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018. Pp. 214-220.
  9. *Катueva Я.В., Назаров Д.А.* Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности // Информационные технологии. – 2015. – №9. – С. 651-656.
  10. *Katueva Y., Nazarov D.* The methods of parametric synthesis on the basis of acceptability region discrete approximation.// Applied Mathematics in Engineering and Reliability, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability (Ho Chi Minh City, Vietnam, 4-6 May 2016). CRC Press. – 2016. – P. 187-192. DOI: 10.1201/b21348-31.
  11. *Абрамов О.В., Назаров Д.А.* Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2015. – №2. – С. 3-13.
  12. *Норенков И.П.* Основы автоматизированного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
  13. *Abramov O.V., Nazarov D.A.* Regions of acceptability in Reliability Design // Reliability: Theory & Applications. – 2012. – Vol.7, No.3(26). – P. 43-49.
  14. *Abramov O.V., Katueva Y.V. and Nazarov D.A.* Reliability-directed distributed computer-aided design system // Proc. of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore. – 2007. – P. 1171-1175.
  15. *Schiff J.L.* Cellular automata: a discrete view of the world. A John Wiley&Sons Inc. Publication. University of Auckland. – 2008.
  16. *Саушев А.В.* Аналитический метод назначения допусков на параметры динамических систем // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3(33). – С. 120-131.
  17. *Назаров Д.А.* Программный модуль визуального контроля точности дискретной аппроксимации области работоспособности // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2017. – Т.2. – С. 150-153.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии О.В. Абрамовым.*

*E-mail:*

*Назаров Дмитрий Анатольевич – nazardim@iap.dvo.ru.*