

УДК 681.5:004.415.2

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ ДИСКРЕТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Назаров Д.А.

Под областью работоспособности в данной работе понимается ограниченная многомерная область в пространстве значений параметров элементов системы, в которых ее выходные характеристики удовлетворяют заданным требованиям. Задача исследования областей работоспособности возникает на этапе проектирования технических систем и позволяет исследовать диапазоны допустимой вариации их параметров с целью обеспечения параметрической надежности. Дискретная аппроксимация области работоспособности может иметь существенные погрешности и, помимо получения количественных характеристик погрешности, важно обладать визуальными средствами мониторинга ошибок такой аппроксимации. Главной проблемой используемого метода дискретной аппроксимации является сохранение таких важных для решения задачи параметрического синтеза свойств области как выпуклость/вогнутость, связность. Предлагается способ ручного контроля точности аппроксимации области работоспособности с помощью средств визуализации ее двумерных сечений методом Монте-Карло. В работе описывается программный компонент для визуального контроля точности аппроксимации в рамках программного комплекса нахождения и использования областей работоспособности.

Ключевые слова: проектирование, САПР, параметрическая надежность, область работоспособности.

A SOFTWARE COMPONENT FOR VISUAL ACCURACY CONTROL OF AN ACCEPTABILITY REGION APPROXIMATION

Nazarov D.A.

Under the term of acceptability region is understood as a multidimensional region in the space of system parameters space, where every point yields system responses which meet their specifications. The problem of acceptability region characteristics determination arises during system design and facilitates system's parameters space exploration in order to provide parametric reliability. A discrete approximation of acceptability region may contain significant errors, and in addition to quantitative approximation error estimation tools a visual monitoring of approximation accuracy tool is also required. The main problem of an acceptability region discrete approximation is retention of the region characteristics such as convexity or concavity, connectivity which significantly affect parametric synthesis problem solution. A human monitoring of acceptability region approximation accuracy approach based on visualization of 2-dimensional cross sections of an acceptability region using Monte-Carlo method is proposed. A software component for visualization of acceptability region's cross sections is considered in the scope of software complex for acceptability regions construction and utilization.

Key words: computer-aided design, parametric reliability, acceptability region.

Введение

Под областью работоспособности (ОР) технической системы понимается многомерная область в пространстве параметров ее элементов, в каждой точке которой эта

система удовлетворяет заданным выходным требованиям. Задача определения характеристик конфигурации ОР возникает в процессе проектировании технических объектов и называется построением ОР. Данная задача наиболее характерна для проектирования устройств и систем уникальных, дорогих, производимых в нескольких экземплярах. Такие системы могут состоять из нетиповых элементов, для которых отсутствуют статистические данные об отказах, что затрудняет применение вероятностного подхода к оценке надежности. Даже в случае возможности применения вероятностного подхода к оценке надежности использование детерминированных методов анализа области допустимой вариации параметров может дать дополнительные сведения, позволяющие повысить параметрическую надежность проектируемой системы.

Одной из основных трудностей, относящейся ко всем методам построения ОР, является большая размерность пространства параметров элементов (внутренних параметров). Другой проблемой, связанной с видом модели исследуемой системы, является отсутствие явных аналитических выражений, связывающих выходные характеристики с внутренними параметрами. Причиной их отсутствия зачастую является сложность модели и использование различных имитационных программных средств, реализующих концепцию «черного ящика». Таким образом, в качестве доступного метода исследования пространства внутренних параметров является только поточечное зондирование.

В данной работе рассматривается метод построения ОР, основанный на аппроксимации многомерной области дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов, заданных узлами регулярной сетки, и методе многомерного зондирования [1]. Такой подход методологически имеет погрешность, обусловленную шагом сетки. В рамках системы нахождения и использования областей работоспособности (СНИОР) [2, 3] необходим дополнительный инструментарий для контроля точности сеточной аппроксимации ОР. Проблема оценки точности ОР в пространстве параметров заключается в том, что точные характеристики этой области неизвестны. Поэтому оценить точность сеточной аппроксимации предлагается методом, в котором можно достичь определенной точности без увеличения хранимых данных, – Монте-Карло.

Для понимания проблемы оценки точности используемой аппроксимации ОР необходимо рассмотреть постановку задачи построения этой аппроксимации.

Задача построения области работоспособности

Перед рассмотрением задачи построения ОР и основных связанных с ней трудностей рассмотрим порождающую ее задачу параметрического синтеза [2]. Пусть задана модель системы (1):

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}(\mathbf{x}), \quad (1)$$

связывающая ее выходные характеристики (выходное напряжение, коэффициент усиления и т.п.), заданные m -вектором (2):

$$(y_1, y_2, \dots, y_m)^T, \quad (2)$$

с набором внутренних параметров (сопротивления резисторов, емкости конденсаторов, и т.п.), заданных n -вектором (3):

$$(x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (3)$$

При этом важно отметить, что модель (1) не обязательно задана аналитически: это может быть имитационная модель, реализующая концепцию «черного ящика». На выходные параметры (2), как правило, в техническом задании налагаются ограничения (4):

$$y_{i \min} \leq y_i(\mathbf{x}) \leq y_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

которые называются условиями работоспособности (УР) и определяют состояние системы. Система считается работоспособной, когда все выходные параметры удовлетворяют (4), и система неработоспособна, когда хотя бы один параметр вышел за указанные ограничения.

Ограничения также задаются и для внутренних параметров. Они представляют собой допуски (5), заданные производителем элемента и выражают возможное поле рассеивания значений характеризующего его параметра:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

Задача выбора оптимальных в определенном смысле значений внутренних параметров (задача параметрического синтеза) по стохастическому критерию требует вычисления выходных характеристик и проверки выполнения УР (4):

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

где $X(\mathbf{x}_{nom}, t)$ - случайный процесс изменения внутренних параметров в течение срока эксплуатации T . Очевидно, что для получения вероятностных характеристик требуется многократное моделирование с вычислением выходных параметров модели, что, в зависимости от ее сложности, может требовать больших вычислительных затрат и времени.

Как можно видеть, УР (4) формируют в пространстве внутренних параметров область, в каждой точке которой они выполняются:

$$D_x = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n : y_{i \min} \leq y_i(\mathbf{x}) \leq y_{i \max}, \forall i = 1, 2, \dots, m\}. \quad (7)$$

Множество D_x , заданное выражением (7), называется областью работоспособности в пространстве внутренних параметров исследуемой системы. При известных характеристиках этой области и возможности проверить принадлежность ей произвольного набора

параметров $\mathbf{x}^* \in D_x$ задача параметрического синтеза (6) может быть записана следующим образом (8):

$$\mathbf{x}_{nom} = \arg \max P(X(\mathbf{x}_{nom}, t) \in D_x, t \in [0, T]). \quad (8)$$

Очевидно, в большинстве случаев операция проверки принадлежности произвольной точки $\mathbf{x}^* \in D_x$ требует меньше вычислительных затрат, чем вычисление модели, что может существенно ускорить процесс вычисления вероятностных характеристик надежности и решения задачи (8). При этом сама задача построения ОР остается вычислительно трудоемкой и рассматривается как отдельная процедура в процессе проектирования, требующая специализированного высокопроизводительного оборудования.

Задача построения ОР при заданной модели (1), УР (4) и допусках на значения внутренних параметров состоит в определении характеристик конфигурации ОР (7). Определить эти характеристики можно путем построения многомерной фигуры, являющейся аппроксимацией ОР [1,4, 5].

Дискретная аппроксимация области работоспособности

Среди различных известных подходов к построению ОР в данной работе используется аппроксимация многомерной области дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов, заданных узлами регулярной сетки на основе метода многомерного зондирования. Рассмотрим только основную концепцию такой аппроксимации, а более подробно этот алгоритм изложен в работе [1].

Совокупность допусков на внутренние параметры (5) формируют брус (гиперпараллелепипед) допусков. Он ограничивает область поиска при построении ОР. Дополнительно уменьшить область поиска можно построением описанного вокруг ОР бруса. Эта задача сводится к поиску экстремальных точек методом Монте-Карло [4]. Таким образом, для построения ОР необходимо знать координаты вершин ограничивающего бруса, заданный интервалами (9):

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

Каждая i -й интервал, определяющий границы бруса(5) разбивается эквидистантно на q_i интервалов-«квантов» с величиной шага $h_i = (x_{i \max} - x_{i \min}) / q_i$. В результате получается многомерная сетка, узлы которой состоят из пересечений границ квантов. Эта сетка задает вершины элементарных гиперпараллелепипедов (ЭГ). Каждый из ЭГ уникально определяется набором индексов (10):

$$(k_1, k_2, \dots, k_n), k_i = 1, 2, \dots, q_i. \quad (10)$$

Используя набор индексов и зная величину шага h_i , можно вычислить границы любого ЭГ. В центре каждого ЭГ выбирается его точка-представитель $\mathbf{x}_c(k_1, k_2, \dots, k_n)$. Ее координаты также могут быть вычислены по набору индексов ЭГ. В этой точке вычисляются выходные характеристики и проверяются УР (4), что можно выразить бинарной характеристической функцией (11):

$$\chi(k_1, k_2, \dots, k_n) = \begin{cases} 1, & \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}_c(k_1, k_2, \dots, k_n)) \leq \mathbf{y}_{\max} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (11)$$

В рамках данного метода аппроксимации принимается, что значение характеристической функции (11), вычисленное в точке-представителе распространяется на все точки соответствующего ЭГ. Значение характеристической функции (11) для каждого ЭГ записывается в набор бинарных индикаторов принадлежности (12):

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_R), s_i \in \{0, 1\}. \quad (12)$$

где $R = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n$ - количество ЭГ. Индекс каждого индикатора взаимно однозначно связан с индексами (k_1, k_2, \dots, k_n) соответствующего ЭГ [1]. Таким образом, функция (11) задает разбиение множества ЭГ B_g на непересекающиеся подмножества:

$$B_g = B_g^0 \cup B_g^1, B_g^0 \cap B_g^1 = \emptyset. \quad (13)$$

Подмножество B_g^1 - является искомой аппроксимацией ОР. Таким образом, модель дискретной аппроксимации ОР множеством ЭГ, заданных регулярной сеткой, имеет вид (14):

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (14)$$

где n - размерность пространства внутренних параметров, B - ограничивающий брус(9), $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ - вектор, содержащий количества «квантов» по каждому параметру внутри бруса B , S - набор индикаторов (12) принадлежности каждого ЭГ аппроксимации ОР [1, 4]. На рисунке 1 проиллюстрирована аппроксимация двумерной ОР с помощью описанной модели (14).

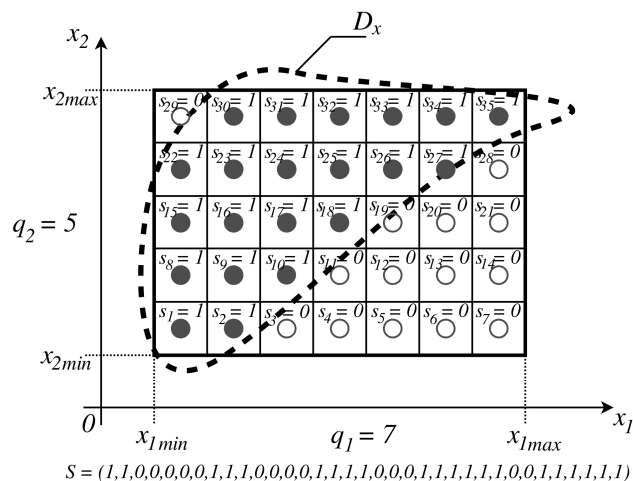


Рис. 1. Дискретная аппроксимация области работоспособности в двумерном случае

Программный модуль визуального контроля точности дискретной аппроксимации области работоспособности

Проблема оценки точности аппроксимации ОР состоит в том, что сами характеристики этой области неизвестны (кроме тех случаев, когда доступно явное аналитическое описание модели (1)). Для большинства задач проектирования, связанных с оптимальным выбором параметров [3, 4, 5, 6] высокая точность аппроксимации ОР, в частности, ее приграничных областей, не важна, поскольку интерес представляет подобласть, удаленная от границы. Например, на рисунке 1 схематично изображено отсечение незначительных участков ОР ограничивающим брусом при построении его методом Монте-Карло. Для выбора наиболее оптимальных значений номиналов параметров эти части не представляют интереса. При этом слишком грубое представление ОР, например, вложенными гиперпараллелепипедами или эллипсоидами могут 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 (14) 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 может повлечь некорректный выбор номиналов. В качестве одного из эффективных методов визуального контроля дискретной аппроксимации ОР предлагается построение двумерных сечений ОР методом Монте-Карло.

На рисунке 2.а показано сечение дискретной аппроксимации ОР плоскостью первого и второго параметров, проходящей через найденную оптимально удаленную от границ

области точку. На рисунке 2.б изображено сечение ОР этой же плоскостью с теми же значениями фиксированных параметров, построенное непосредственно по ОР методом Монте-Карло. Можно видеть, что существенных различий в конфигурации и форме области в данном сечении не наблюдается.

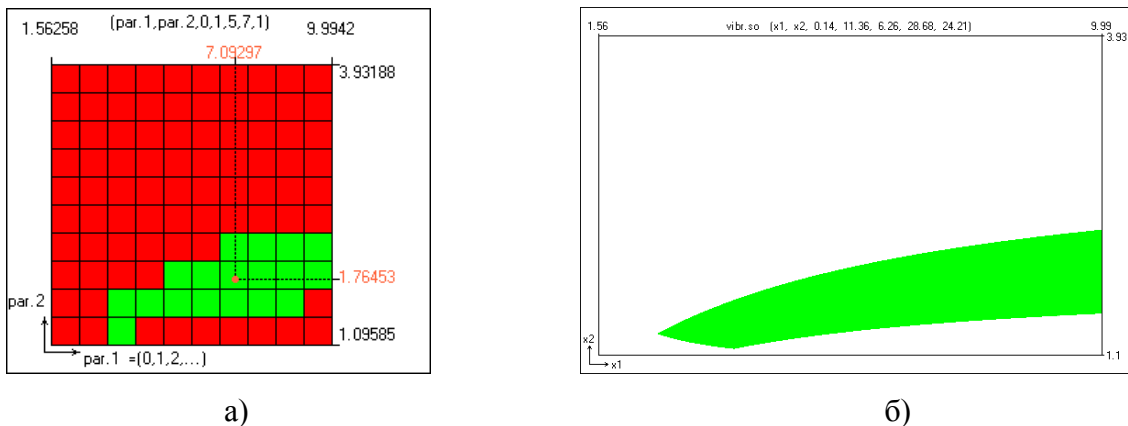


Рис. 2. Сечение ОР: а) сечение дискретной аппроксимации ОР; б) контрольное сечение ОР, построенное методом Монте-Карло.

На рисунках 3 проиллюстрирована некорректная аппроксимация ОР из-за относительной узости фактической ОР и крупного шага сетки. Как видно на рисунке 3.а, по результатам дискретной аппроксимации ОР воспринимается как неодносвязная область, в то время как контрольное сечение этой же плоскостью показывает, что область односвязная (рис. 3.б).

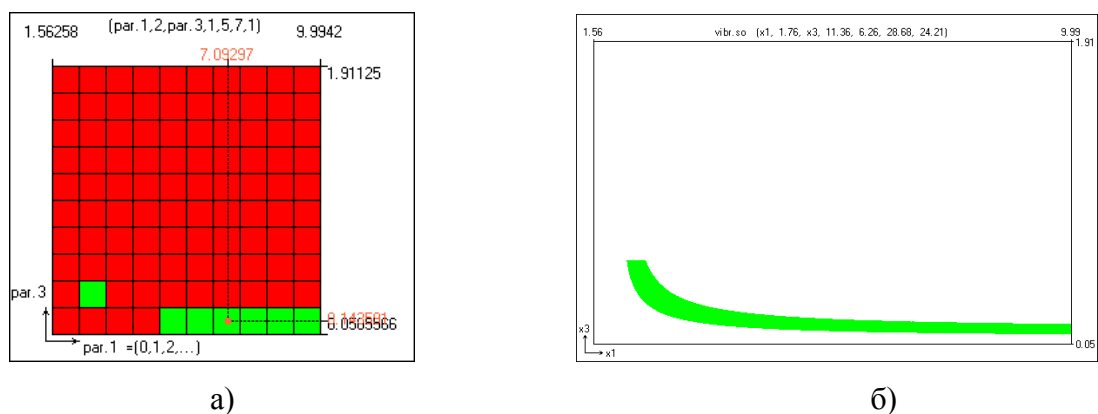


Рис. 3. Ошибка дискретной аппроксимации ОР: а) отсутствие связности области б) контрольное сечение ОР, построенное методом Монте-Карло.

На основании построенных контрольных сечений можно делать выводы о корректности дискретной аппроксимации ОР и на усмотрение проектировщика принимать

решения о построении более точной аппроксимации или использовании существующей с определенными поправками.

Программный модуль, выполняющий построение контрольных сечений, представляет собой отдельное консольное приложение (работающее со стандартными потоками ввода/вывода) в рамках системы нахождения и использования областей работоспособности (СНИОР). Данный модуль принимает на вход следующие параметры:

- Путь к файлу и имя динамической библиотеки с функциями модели (1)
- Индексы фиксированных параметров и их значения
- Интервалы варьирования свободных параметров (опционально)
- Интервалы УР (опционально)
- Количество точек метода Монте-Карло
- Путь и имя выходного файла изображения (опционально)
- Ширина и высота картинка (опционально)

Выходом программы является картинка с изображением сечения ОР, аналогичная приведенным на рис 2.б и 3.б.

Заключение

Дискретная аппроксимация ОР на основе регулярной сетки и метода многомерного зондирования дает представление о ее конфигурации, позволяет снижать вычислительные затраты при получении различных статистических характеристик параметрического дрейфа, а также применять геометрические методы анализа ОР для выбора оптимальных в определенном смысле значений параметров [1, 4, 5, 6]. Несомненно, построение дискретной аппроксимации ОР требует больших вычислительных затрат и ресурсов для хранения данных, данная задача целесообразна при проектировании уникальных и дорогостоящих технических систем. Помимо ресурсных затрат на построение ОР возникает методологическая проблема, связанная с точностью ее аппроксимации. При этом особую важность имеет не столько точность аппроксимации вблизи границ области, сколько сохранение характеристик истинной области таких как: связность, выпуклость. Эти характеристики области могут существенно влиять на выбор номинальных параметров и важно иметь инструментарий, позволяющий контролировать качество аппроксимации. Одним из предложенных в работе подходов является визуальный контроль качества аппроксимации ОР, основанный на визуализации двумерных сечений методом Монте-Карло.

Список литературы

1. Назаров Д.А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. - 2011. - №2(28). - С. 59 – 69.
2. 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.
3. 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.
4. Катueva Я.В., Назаров Д.А. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности // Информационные технологии. - 2015. - №9. С. 651 — 656.
5. Y. Katueva and D. Nazarov, «The methods of parametric synthesis on the basis of acceptability region discrete approximation». Applied Mathematics in Engineering and Reliability, Proceedings of the 1st International Conference on Applied Mathematics in Engineering and Reliability (Ho Chi Minh City, Vietnam, 4-6 May 2016). CRC Press, 2016. Pp. 187 — 192. DOI: 10.1201/b21348-31
6. Назаров Д.А. Алгоритм построения гиперпараллелепипедов, вписанных в область работоспособности аналоговых технических систем // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2015. - 1 том. С. 88 — 90.

Сведения об авторах

Назаров Д.А.

ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук», Владивосток, Россия (690041, Владивосток, ул. Радио, 5), e-mail:nazardim@iacp.dvo.ru

ФГБОУ ВО «Владивостокский университет экономики и сервиса», Владивосток, Россия (690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41), e-mail:nazardim@iacp.dvo.ru

Authors

Nazarov D.A.,

Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia (690041, Vladivostok, 5 Radio street), e-mail:nazardim@iacp.dvo.ru

Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia (690014, Vladivostok, 41 Gogolya street), e-mail:nazardim@iacp.dvo.ru