

Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности

О.В. Абрамов, Д.А. Назаров

Аннотация. Рассматривается задача построения и анализа многомерных областей работоспособности аналоговых технических систем. Описывается структура и функциональные возможности программно-алгоритмической системы, предназначенной для решения этой задачи. Предложенные алгоритмы и программная система ориентированы на технологию параллельных и распределенных вычислений.

Ключевые слова: алгоритм, программа, параллельные вычисления, надежность, случайный процесс, область работоспособности, радиоэлектронная аппаратура.

Введение

Нахождение областей в пространстве параметров технических устройств и систем, внутри которых система обладает требуемыми свойствами (устойчивости, качества, работоспособности и т.д.) является одним из важных этапов синтеза динамических систем.

В общем случае такая область может представлять собой точечное множество (счетное, конечное) или некоторый континуум, ограниченное сложной поверхностью в многомерном пространстве. Каждая точка, принадлежащая области, характеризует благоприятное событие (работоспособное состояние системы, устойчивое состояние и т.д.).

При построении областей работоспособности исследуется модель системы, связывающая выходные параметры системы $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ с параметрами элементов этой системы $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в виде зависимостей:

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

Выходные параметры, как правило, представляют собой характеристики системы, интересующие потребителя, которые должны удовлетворять системе определенных ограничений, называемых условиями работоспособности (УР):

$$y_{j \min} \leq y_j \leq y_{j \max}. \quad (2)$$

Нарушение этих ограничений, заданных обычно в техническом задании, считается отказом системы. К нарушению условий (2) может привести неудачное проектное решение, либо дрейф параметров элементов $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, возникающий под влиянием факторов внешней среды и внутренних процессов износа и старения. Одним из способов исследования влияния этих отклонений на работоспособность системы является определение характеристик области в пространстве этих параметров, для которых будут выполняться неравенства (2):

$$D_x = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n | y_{j \min} \leq y_j(\mathbf{x}) \leq y_{j \max}, \forall j = 1, 2, \dots, m\}. \quad (3)$$

Область D_x , определяемая выражением (3), называется областью работоспособности (ОР) в

¹Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ (проекты 14-08-31291 и 14-08-00149). Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН.

пространстве параметров элементов системы, заданной моделью (1) при заданных УР (2).

Многомерность области и неизвестная априори конфигурация ограничивающей ее поверхности создают существенные трудности не только ее нахождения, но и использования при решении прикладных задач.

В данной работе приведено описание программно-алгоритмической системы нахождения и использования областей работоспособности (СНИОР) аналоговой радиоэлектронной аппаратуры. Отличительной особенностью СНИОР является ориентация на технологию параллельных (распределенных) вычислений. Эта система может использоваться как автономно, так и в качестве подсистемы САПР РЭА параллельного типа, ориентированной на решение задач оптимального параметрического синтеза [1].

1. Структура и архитектура системы

Архитектура СНИОР является модульной. Каждый из ее модулей выполняет определенные функции в рамках всего программного комплекса и имеет различную степень автономии. Некоторые модули выделяются только функционально, являясь отдельными звеньями единого процесса, работающими в определенной последовательности. На Рис. 1 изображена модульная структура СНИОР.

Модуль ввода описания проектируемой системы предназначен для настройки интерфейса между указанным пользователем описанием модели и блоком, выполняющим моделирование системы. Модуль обеспечивает унифицированный доступ к средствам вычисления выходных характеристик модели (1). Вводимая в систему модель может быть задана в виде динамически присоединяемой библиотеки функций (например, DLL – для ОС семейства Microsoft Windows, SO – для ОС семейства Linux) с определенной сигнатурой импортируемых из нее функций. Помимо динамически присоединяемых библиотек, которые необходимо сначала запрограммировать, а затем компилировать в ориентированный для конкретной платформы машинный код, наиболее удобным является использование сторонних средств моделирования, например, для имитации работы электрических цепей возможно использование пакетов стандарта SPICE [2]. Для этого модуль должен учитывать особенности взаимодействия со сторонними программными моделирующими средствами. В связи с этим модуль должен иметь возможность расширяемости для использования новых дополнительных средств имитации проектируемых систем. Результатом работы модуля является структура данных, представляющая собой унифицированный интерфейс взаимодействия блока моделирования с моделью системы, заданной

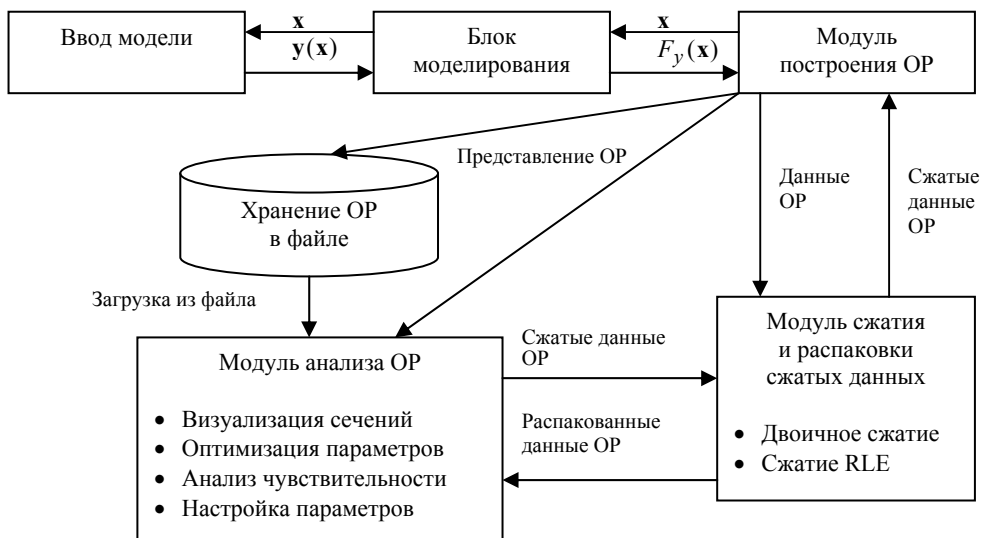


Рис. 1. Модульная структура СНИОР

различными способами. Основные функции, которые обеспечивает этот интерфейс, выполняют следующие задачи:

- вычисление результата функции (1) для всех выходных характеристик;
- получение количества n внутренних параметров, определенных в модели;
- получение количества m выходных характеристик, определенных в модели;
- получение допусков на все внутренние параметры $x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}$;
- получение допусков на все выходные параметры (2).

Блок моделирования выполняет расчет выходных характеристик модели (1) и проверку их соответствия заданным ограничениям (2). Результат работы данного модуля можно представить в виде характеристической функции:

$$F_y(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, y_{j \min} \leq y_j(\mathbf{x}) \leq y_{j \max}, \forall j = 1, 2, \dots, m \\ 0, y_{j \min} > y_j(\mathbf{x}) \vee y_{j \max} < y_j(\mathbf{x}), \exists j \in \{1, 2, \dots, m\} \end{cases} \quad (4)$$

На входе этого модуля вектор варьируемых параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, а на выходе – результат проверки выходных характеристик при указанных значениях параметров элементов на соответствие заданным требованиям согласно выражению (4). Для вычисления выходных характеристик и получения ограничений на выходные характеристики блок моделирования обращается к структурам данных, сгенерированным модулем ввода описания проектируемой системы.

Модуль построения области работоспособности представляет собой реализацию метода многовариантного анализа на многомерной сетке. Результатом работы этого алгоритма является геометрический многомерный аналог ОР, состоящий из дискретного множества элементарных гиперпараллелепипедов, заданных узлами сетки.

Рассмотрим этот алгоритм подробнее. Помимо модели системы (1) и условий работоспособности (УР) (2) для построения области работоспособности (ОР) требуется задать параметры сетки:

- диапазон варьирования каждого параметра: $a_i \leq x_i \leq b_i, \forall i = 1, 2, \dots, n;$ (5)

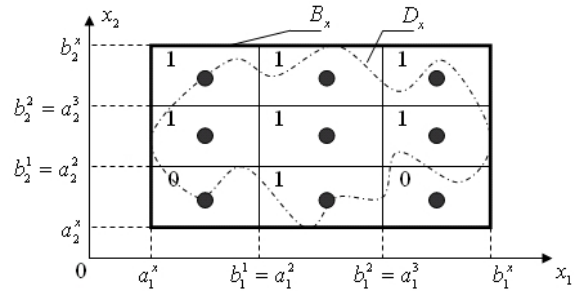


Рис. 2. Квантование диапазонов варьирования параметров для дискретного представления ОР

- количество q_i шагов сетки (квантов) внутри каждого диапазона.

В качестве диапазонов (5) могут быть использованы производственные допуски или границы описанного вокруг ОР гиперпараллелепипеда, построенного методом Монте-Карло [3]. Каждый квант i -го параметра пронумерован индексом $k_i, i = 1, 2, \dots, n$. Обозначим $a_i^{k_i}, b_i^{k_i}$ – соответственно левую и правую границу k_i -го кванта i -го параметра (Рис. 2).

В центре каждого кванта выбирается точка, называемая точкой-представителем этого кванта:

$$c_i^{k_i} = (a_i^{k_i} + b_i^{k_i}) / 2, \quad (6)$$

Главной особенностью использования точки-представителя является принятие допущения, что выполнение УР во всех точках кванта определяется их выполнением в его точке-представителе.

Пересечение границ квантов всех координатных осей параметров образуют сетку, узлы которой задают вершины элементарных параллелепипедов (ЭП), на основе которых строится представление ОР. Каждый ЭП e_{k_1, k_2, \dots, k_n} задается набором индексов (k_1, k_2, \dots, k_n) образующих его квантов. По этим индексам при известных границах варьирования (5) и количестве шагов сетки q_i вычисляются характеристики ЭП: его границы $a_i^{k_i}, b_i^{k_i}, \forall i = 1, 2, \dots, n$ и координаты (6) его точки-представителя [4].

Все полученные ЭП образуют множество $B_x^G = \{e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \mid k_i = 1, 2, \dots, q_i, i = 1, 2, \dots, n\}$. Для представления ОР множеством ЭП требуется выделить некоторое их подмножество

$\mathbf{B}_x^+ \subseteq \mathbf{B}_x^G$. Таким образом, для каждого e_{k_1, k_2, \dots, k_n} требуется признак принадлежности подмножеству \mathbf{B}_x^+ . Таким признаком является значение характеристической функции (4) в точке-представителе $\mathbf{x}^c = (c_1^{k_1}, c_2^{k_2}, \dots, c_n^{k_n})^T$ каждого ЭП.

Таким образом, структура данных для представления ОР дискретным множеством ЭП несет следующую информацию:

- геометрические параметры сетки, задающей множество ЭП;
- данные о принадлежности каждого ЭП подмножеству \mathbf{B}_x^+ .

Информация о принадлежности каждого ЭП подмножеству \mathbf{B}_x^+ хранится в одномерном массиве индикаторов (МИ) $S = (s_1, s_2, \dots, s_R)$,

где $R = \prod_{i=1}^n q_i$ – количество всех ЭП. Каждый из

элементов МИ представляет собой индикатор принадлежности соответствующего элемента e_{k_1, k_2, \dots, k_n} подмножеству \mathbf{B}_x^+ и хранит значение функции $F_y(\mathbf{x}^c)$ в точке-представителе каждого из них:

$$s_p = F_y(\mathbf{x}^c(k_1, k_2, \dots, k_n)), \quad (7)$$

где индекс p – порядковый номер элемента МИ, соответствующий определённому ЭП e_{k_1, k_2, \dots, k_n} и взаимно однозначно связанный с его индексами [5]:

$$p = k_1 + q_1(k_2 - 1) + q_1q_2(k_3 - 1) + \dots + q_1q_2 \dots q_{n-1}(k_n - 1), \quad (8)$$

а выражение $\mathbf{x}^c(k_1, k_2, \dots, k_n)$ означает процедуру вычисления координат (6) точки-представителя для ЭП с индексами (k_1, k_2, \dots, k_n) .

Таким образом, описанная структура данных задаётся моделью G_R :

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (9)$$

где n – размерность пространства внутренних параметров, $B = \{(x_{i \min}, x_{i \max}), i = 1, 2, \dots, n\}$ – образованный границами (5) гиперпараллелепипед, ограничивающий область построения,

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – набор показателей количества квантов для каждого параметра, $S = (s_1, s_2, \dots, s_R)$ – массив индикаторов принадлежности каждого ЭП подмножеству \mathbf{B}_x^+ .

Процедура построения ОР для заданной модели (1) при указанных УР (2) сводится к инициализации элементов МИ при заданных параметрах регулярной сетки согласно выражению (7). Область, состоящая из объединения ЭП, принадлежащих множеству \mathbf{B}_x^+ , называется *дискретным представлением области работоспособности* (ДПОР). Структура данных, описывающая такое представление ОР, задаётся моделью (9).

Алгоритм построения ДПОР представлен в виде блок-схемы на Рис. 3.

Важной особенностью этого алгоритма является выполнение одного набора инструкций независимо для всех элементов сетки или элементов одномерного массива индикаторов (МИ), что позволяет использовать эффективную модель передачи сообщений типа SPMD (Single Program Multiple Date). Использование технологии параллельных вычислений при построении ДПОР обуславливается необходимостью многократного моделирования системы в

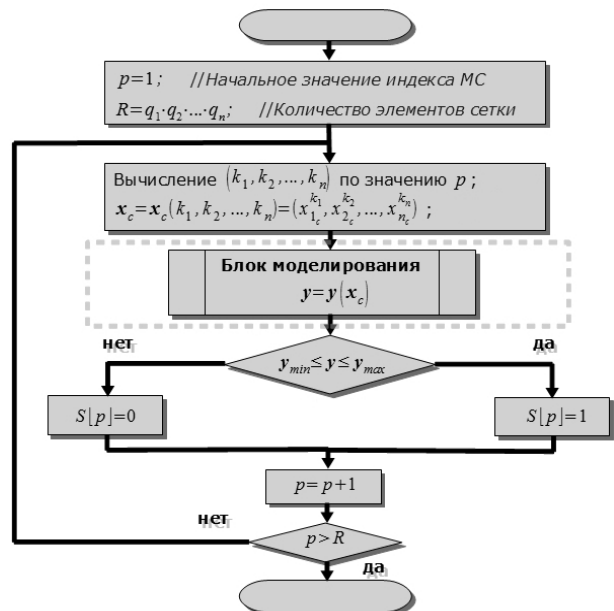


Рис. 3. Алгоритм построения дискретного представления ОР

узлах сетки, что может потребовать большого количества времени. Разделение данных для обработки их на разных вычислительных узлах в параллельном режиме позволит существенно сократить время построения ДПОР. Разбиение МИ на части для параллельной обработки может выполняться с учетом неравномерной загрузки вычислительных узлов в случае использования несимметричной гетерогенной параллельной вычислительной системы. Сбалансировать вычислительную нагрузку можно следующими способами:

- статично: по результатам предварительного замера производительности каждого из узлов МИ разбивается на части в соответствующей пропорции и передается узлам для обработки в параллельном режиме;
- динамически: МИ разбивается на большое количество одинаковых и небольших по объему фрагментов и отправка их вычислительным узлам по мере выполнения ими расчетов предыдущих фрагментов. В результате каждый вычислительный узел выполнит столько работы, сколько позволяют доступные ему ресурсы с учетом изменения его загрузки в процессе решения задачи.

На Рис. 4 приведена схема параллельной обработки частей МИ в процессе построения ДПОР [6].

Результат построения ДПОР может быть сохранен на физическом носителе, либо непосредственно использован для дальнейшего анализа.

Модуль сжатия и распаковки сжатых данных предназначен для уменьшения занимаемого объема данными при построении ДПОР. Так, если для его хранения использовать байт-массив, то потребуется $R = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n$ байт данных. При этом именно в этих данных присутствует большое количество избыточной информации. Эта избыточность порождается, во-первых, представлением множества ЭП, из-за чего в МИ будет присутствовать большое количество длинных серий нулей и единиц, и, во-вторых, внутренним представлением чисел «0» и «1», для которых одного байта, состоящего в большинстве современных архитектур ЭВМ из восьми разрядов, излишне много. В первом случае для сокращения серий повторов предлагается использовать известный алгоритм кодирования длин серий (RLE – Run Length Encoding) [7], согласно которому элементы МИ записываются в виде пар значений $s_i^c = (s_j, l_i), i = 1, 2, \dots, R_c$, где s_j – элемент МИ, с которого начинается i -я серия повторов его значения длиной l_i . R_c – количество всех серий повторов и длина *сжатого массива индикаторов* (СМИ):

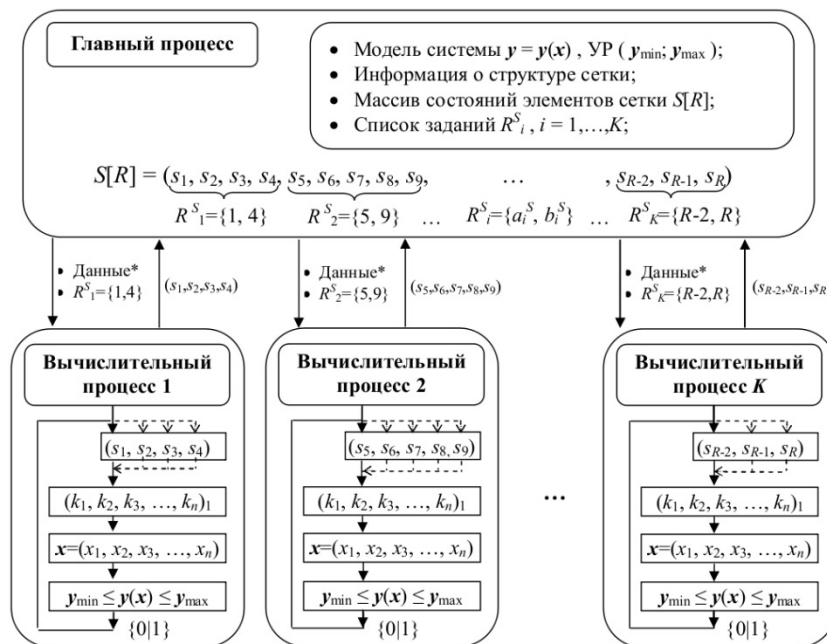


Рис. 4. Взаимодействие параллельных процессов при построении ОП

$$S_c^{rle} = (s_1^c, s_2^c, \dots, s_{R_c}^c).$$

Во втором случае для хранения МИ предлагается задействовать все двоичные разряды непрерывного байт-массива. Поскольку в большинстве современных архитектур компьютеров минимально адресуемым элементом памяти является байт, то для считывания и записи отдельных разрядов потребуется применение двоичной арифметики. Например, для считывания третьего (при 2^2) двоичного разряда байта b_i требуется обнулить все остальные разряды путём выполнения операции логического «И» с байтом-маской $00000100_2 = 2^2$. Если в третьем разряде стояла единица, то результат этой операции будет больше нуля $2^2 > 0$, иначе - «0». Для записи состояния третьего разряда требуется сначала его обнулить, сохранив состояния других разрядов, что достигается в результате операции логического «И» с байтом-маской 11111011_2 , предварительно полученной в результате поразрядного отрицания $00000100_2 = 2^2$. Затем, если необходимо установить третий разряд в состояние «1», то к байту b_i применяется операция логического «ИЛИ» с маской $00000100_2 = 2^2$. При хранении значений элементов МИ во всех двоичных разрядах байт-массива для доступа к элементу с индексом p требуется вычислить номер i

байта b_i , которому принадлежит кодирующий разряд, а также номер r этого разряда. Для этих чисел вместо номеров из натурального ряда удобнее использовать смещения, которые принимают значения, начинающиеся с нуля:

$$i = \lfloor (p-1)/L \rfloor, \quad r = p-1-i \cdot L,$$

где L – количество двоичных разрядов в байте, значение r используется для вычисления маски 2^r

Рассмотренный метод представления элементов МИ с помощью двоичных разрядов байт-массива позволяет сократить объём данных МИ в L раз вне зависимости от конфигурации ОП и параметров сетки. Что касается эффективности алгоритма RLE, то она во многом зависит от конфигурации ОП и параметров сетки. Результаты практического применения этого алгоритма демонстрировали уменьшение объёмов данных от 10 до 1000 раз.

Время доступа к произвольному элементу МИ в случае сжатия по алгоритму RLE без применения дополнительных способов определения позиции нужной серии повторяющихся элементов увеличивается пропорционально его удалённости от начала СММ в связи с тем, что для вычисления начальной и конечной позиции искомой серии необходимо выполнить суммирование длин l_i предыдущих серий. На Рис. 5 приведены графики степени сжатия МИ обоими приведёнными способами, а также время доступа к элементам МИ.

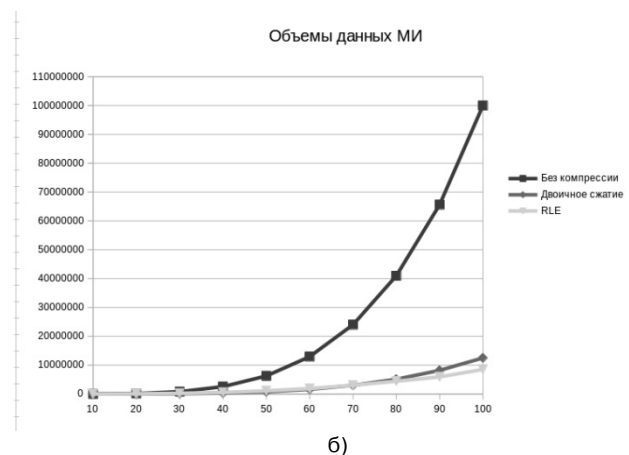
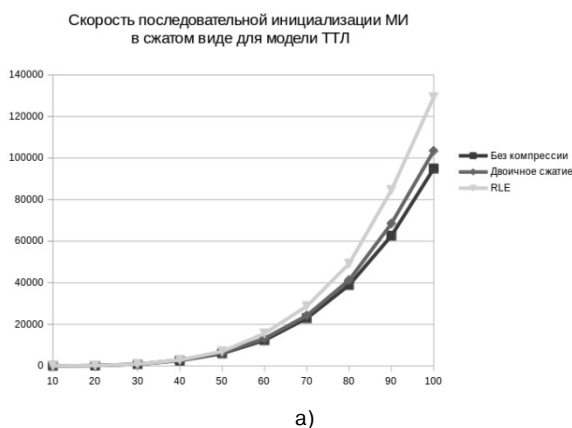


Рис. 5. Графики степени сжатия МИ

- а) увеличение времени инициализации МИ в сжатом виде;
- б) уменьшение объёмов данных МИ с применением алгоритмов двоичного кодирования и RLE

Модуль применяется не только для сжатия данных МИ при построении ОР, но и при использовании этих данных, когда необходимо эти данные распаковать, например, в задачах анализа ОР. При этом нет необходимости в распаковке всего МИ: достаточно вычислить соответствующий кодирующий элемент s_i^c – для кодирования данных по алгоритму RLE или номер i байта b_i , которому принадлежит кодирующий разряд, – в случае сжатия двоичным кодированием.

Модуль анализа ОР предоставляет пользователю ряд алгоритмических средств, позволяющих получить интересные характеристики ОР и иные оценки на основе этих характеристик. Модуль использует сеточное представление ОР, которое может быть загружено из файла или получено непосредственно после построения. Для работы со сжатыми данными МИ модуль обращается к функционалу модуля сжатия и распаковки данных. Модуль является расширяемым, однако основные его задачи направлены на решение задачи выбора оптимальных значений параметров:

- Визуализация сечений сеточного представления ОР. Позволяет проектировщику самостоятельно делать заключения о характеристиках и конфигурации ОР на основе визуального анализа серий двумерных сечений.

- Анализ чувствительности позволяет определить, к изменениям каких параметров работоспособность системы наиболее чувствительна. С точки зрения конфигурации ОР, чем более узкой в сечении исследуемого параметра является ОР, тем меньше диапазон варьирования этого параметра, следовательно, данный параметр можно выделить, как потенциально критичный к параметрическим возмущениям. Дальнейшие исследования об интенсивности его дрейфа, силе влияющих на этот дрейф факторов помогут определить, насколько изменения значений этого параметра влияют на работоспособность системы [8].

- Настройка параметров. Модуль ориентирован на решение задач, возникающих в процессе синтеза аналоговых технических систем, для обеспечения требуемых показателей качества функционирования и надежности которых, необходимы элементы настройки. Использо-

мые здесь и программно реализованные алгоритмы позволяют оценить настроечную способность параметров, которые можно использовать в качестве регулировочных. В качестве критерия оценки настроечной способности используется вероятность успешной настройки. Расчет этого показателя дает возможность выбора оптимальной совокупности переменных (настроечных) параметров [9].

- Оптимизация параметров. Представляет собой наиболее обширную задачу в рамках процесса параметрического синтеза, включающую выбор оптимальных значений внутренних параметров по различным критериям. При проектировании технических систем могут быть неизвестными закономерности дрейфа параметров, ведущего к параметрическому отказу. Поэтому на начальных этапах проектирования может оказаться целесообразным использование детерминированных критериев типа запаса работоспособности.

Одним из критериев выбора оптимальных значений параметров в условии неопределённости тенденций их дрейфа во времени является *запас работоспособности* (ЗР) [1, 10]. Этот критерий является детерминированным, и для его использования необходимы характеристики ОР.

Суть метода выбора, основанного на этом критерии, состоит в нахождении точки $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{D}_x$, максимально удалённой от границы ОР. Процесс нахождения такой точки является двух-этапной процедурой.

Первый этап состоит в определении минимального расстояния от каждой внутренней точки $\mathbf{x} \in \mathbf{D}_x$ до границы ОР, которое обеспечивается вписанным шаром (Рис. 6) с центром в точке \mathbf{x} и объёмом $v_r(\mathbf{x})$:

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

где $V(\mathbf{x}, r)$ – объём шара с центром $\mathbf{x} \in \mathbf{D}_x$ и радиусом r , соединяющим этот центр с некоторой точкой на границе \mathbf{D}_x .

На втором этапе выполняется поиск шара, имеющего максимальный объём среди $v_r(\mathbf{x}), \forall \mathbf{x} \in \mathbf{D}_x$. Искомой точкой в пространстве параметров является центр шара, имеющего максимальный объём. В общем случае возможна ситуация, когда в область \mathbf{D}_x можно впи-

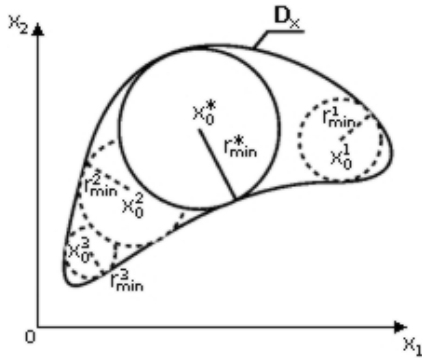


Рис. 6. Максимальный минимум запаса работоспособности

сать более одного шара с максимальным объёмом. Таким образом, решение задачи выбора номинальных значений параметров, оптимальных по критерию ЗР, состоит в отыскании множества $D_{opt} \subset D_x$ точек, для которых выполняется:

$$\max_{\mathbf{x} \in D_x} \min_r V(\mathbf{x}, r). \tag{10}$$

Для выбора номинальных значений параметров по критерию ЗР необходима информация о конфигурации области D_x .

Решение задачи выбора значений параметров с использованием детерминированного критерия (10) для ДПОР предлагается в виде двухэтапной процедуры. На первом этапе выполняется поиск ЭП, удовлетворяющих этому критерию, на втором этапе по связным группам найденных ЭП интерполируются координаты векторов оптимальных параметров.

Алгоритм поиска ЭП, оптимальных по критерию ЗР также основан на максимизации минимального расстояния от некоторого внутреннего элемента $e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in \mathbf{B}_x^+$ до граничного элемента ДПОР. В этом случае расстояние r до границы измеряется количеством ЭП $r \in \mathbf{N}$.

Фигура \mathbf{B}_c^r , вписанная в ДПОР и обеспечивающая минимальный ЗР, также состоит из ЭП, причём $\mathbf{B}_c^r \subseteq \mathbf{B}_x^+$. Целевой функцией оптимизации является объём $V(e_{k_1, k_2, \dots, k_n}, r)$ фигуры, центром симметрии которой является элемент $e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in \mathbf{B}_x^+$. Тогда объём вписанной в ДПОР фигуры является результатом минимизации:

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

Таким образом, первый этап оптимизации по критерию запаса работоспособности (ЗР) состоит в построении вписанной в ДПОР фигуры \mathbf{B}_c^r , являющейся выпуклой и симметричной относительно заданного центрального элемента, для которого рассчитывается минимальный ЗР. Фактически, построение этой фигуры сводится к проверке принадлежности подмножеству \mathbf{B}_x^+ ЭП, находящихся в определённой некоторым образом окрестности центрального элемента. Результатом выполнения первого этапа является установка веса центральному элементу, равному расстоянию $r \in \mathbf{N}$ до границы ДПОР, которое определяет меру запаса работоспособности. Второй этап решения оптимизационной задачи состоит в выборе элементов с максимальным весом:

$$\mathbf{B}_{opt}^r = \{e_{k_1, k_2, \dots, k_n}^* \in \mathbf{B}_x^+ | e_{k_1, k_2, \dots, k_n}^* = \arg \max_{\mathbf{B}_x^+} v_r(e_{k_1, k_2, \dots, k_n})\}.$$

Для вычисления оптимальных значений параметров системы по результатам выбора оптимальных элементарных параллелепипедов (ЭП) необходимо выделить связные подмножества $\mathbf{B}_{opt}^r = \mathbf{B}_{opt_1}^r \cup \mathbf{B}_{opt_2}^r \cup \dots \cup \mathbf{B}_{opt_K}^r$. Связность множества ЭП определяется из возможности обхода всех его элементов при условии возможности перехода только в соседний (имеющий общую границу) элемент. Подробно этот алгоритм описан в работе [3] как алгоритм обхода однотипных ЭП. Интерполяция искомым оптимальных значений параметров для каждого связного подмножества $\mathbf{B}_{opt_i}^r$ выполняется вычислением арифметического среднего (для выпуклых подмножеств):

$$x_j^{Bi} = \sum_{k=1}^{N_i} c_j^k / N_i \quad \forall j = 1, 2, \dots, n,$$

где N_i - количество ЭП в подмножестве $\mathbf{B}_{opt_i}^r$, а c_j^k - j -я координата (6) точки-представителя k -го ЭП в этом подмножестве. Таким образом, в случае наличия K связных подмножеств ЭП, обеспечивающих одинаковый ЗР, вычисляются

K вариантов набора параметров, оптимальных по критерию ЗР.

Наибольшую сложность в описанном выше решении задачи выбора оптимальных параметров составляет первый этап, заключающийся в построении вписанной фигуры для каждого внутреннего ЭП. В качестве такой фигуры предлагается куб, состоящий из ЭП, симметричный относительно заданного центрального элемента.

Как было сказано выше, фигура \mathbf{B}_c^r представляет собой определённую некоторым образом окрестность величины r заданного ЭП. Параметр r в данном случае аналогичен радиусу шара. В качестве окрестности ЭП $e_{k_1^c, k_2^c, \dots, k_n^c} \in \mathbf{B}_x^+$ с индексами $(k_1^c, k_2^c, \dots, k_n^c)$ предлагается строить куб \mathbf{B}_c^r , состоящий из ЭП. Длина ребра этого куба измеряется количеством ЭП и равна $2r+1$. Индексы ЭП, образующих этот куб, определяются ограничениями:

$$k_i^c - r \leq k_i \leq k_i^c + r, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

Тогда куб \mathbf{B}_c^r , который будем называть r -кубом, состоит из элементов:

$$\mathbf{B}_c^r = \{e_{k_1, k_2, \dots, k_n} \in \mathbf{B}_x^s \mid k_i^c - r \leq k_i \leq k_i^c + r, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n\} \quad (12)$$

В выражениях (11) и (12) необходимо также учитывать действие ограничений на значения индексов $1 \leq k_i \leq q_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n$.

Суть алгоритма построения вписанного в ОР r -куба состоит в проверке значений индикаторов ЭП, индексы которых удовлетворяют условиям (11) для заданного центрального элемента $e_{k_1^c, k_2^c, \dots, k_n^c}$ и текущего значения «радиуса» r . При этом значение r итерационно изменяется, начиная с $r=1$. Процесс увеличения «радиуса» и проверки состояний элементов куба \mathbf{B}_c^r прекращается, как только один из индексов вышел за границу допустимых значений, либо найден ЭП, не принадлежащий \mathbf{B}_x^+ , т.е. $\mathbf{B}_c^r \cap \mathbf{B}_x^- \neq \emptyset$. Элементу $e_{k_1^c, k_2^c, \dots, k_n^c}$ присваивается вес, равный значению r последнего успешно вписанного куба, но не менее 1. Для хранения значений

весов используется МИ $s_p = r$, где индекс $p = p(k_1^c, k_2^c, \dots, k_n^c)$ элемента МИ вычисляется согласно выражению (8).

Проверка принадлежности всех элементов куба \mathbf{B}_c^r подмножеству \mathbf{B}_x^+ выполняется путём перебора элементов сетки, индексы которых удовлетворяют выражению (11). При увеличении r на следующей итерации придётся выполнять перебор элементов, которые были проверены на предыдущей итерации при $r-1$. Для устранения повторного перебора необходимо проверять только граничные элементы куба, т.е. такие, у которых один из индексов фиксирован: $k_f = k_f^c - r$ или $k_f = k_f^c + r$, а свободные индексы принимают все возможные значения из их диапазонов (11). Однако и в этом случае при смене фиксированного параметра $k_f, f = 1, 2, \dots, n$ будет выполняться повторная проверка элементов, находящихся в пересечении граничных плоскостей. В двумерном случае такие элементы имеют индексы: $(k_1^c - r, k_2^c - r), (k_1^c - r, k_2^c + r), (k_1^c + r, k_2^c - r), (k_1^c + r, k_2^c + r)$.

Для перебора граничных элементов r -куба с учётом исключения повторной проверки элементов в пересечениях граней предлагается сужать диапазон варьирования свободных индексов следующим образом. Пусть номер f фиксированного индекса k_f последовательно принимает значения от 1 до n . При этом для каждого f индекс k_f принимает сначала значение $k_f = k_f^c - r$, а затем $k_f = k_f^c + r$. Когда $f = 1$, свободные индексы $k_i, \forall i = 2, 3, \dots, n$ принимают все возможные значения из диапазонов (11). На следующей итерации при $f = 2$ к множеству свободных индексов добавляется k_1 , тогда во избежание повторного перебора элементов с индексами $k_1 - r$ и $k_1 + r$ для него необходимо сужить интервал: $k_1^c - r + 1 \leq k_1 \leq k_1^c + r - 1$. Аналогично для последующих итераций увеличения номера f фиксированного индекса k_f . Тогда, с учётом ска-

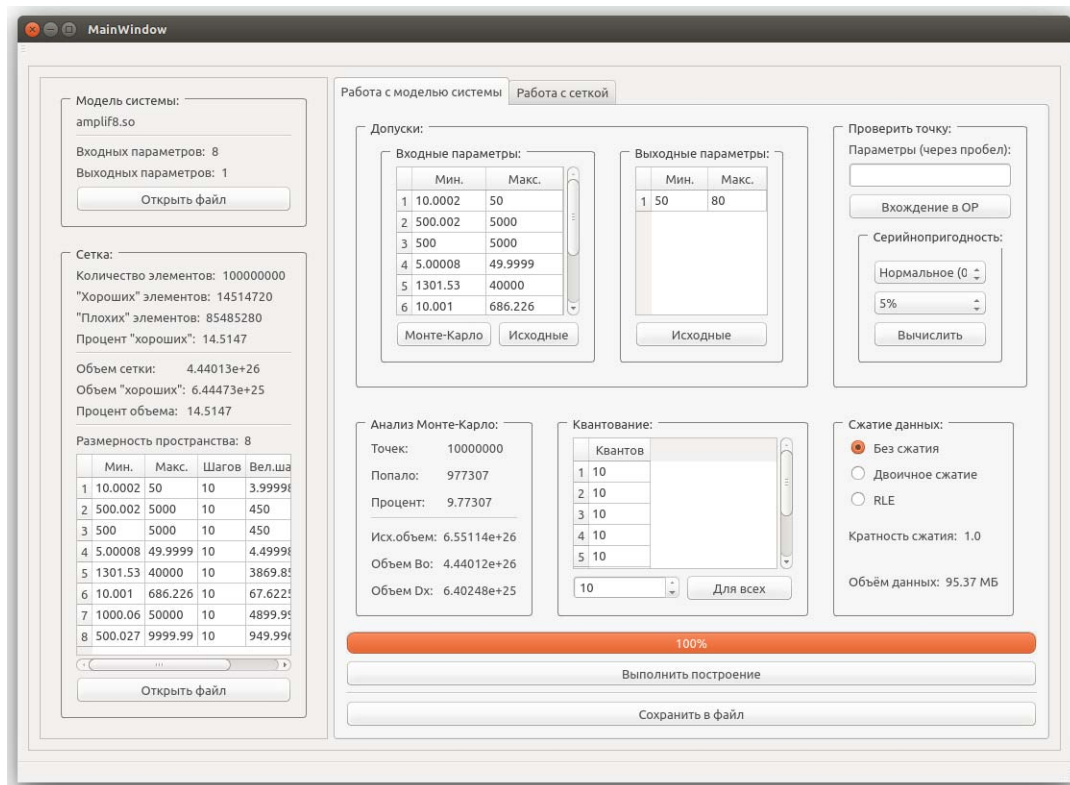


Рис. 7. Окно пользовательской системы построения и анализа ОР

занного, выражение (11) для значений индексов будет иметь вид:

$$k_i^c - r + 1 \leq k_i \leq k_i^c + r - 1, \forall i < f \quad (13)$$

$$k_i^c - r \leq k_i \leq k_i^c + r, \forall i > f$$

Для выполнения перебора всех комбинаций свободных индексов $k_i = 1, 2, \dots, q_i$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{j\}$ используется алгоритм, принцип которого основан на операции переноса слагаемых в старшие разряды при пошаговом инкременте младших в позиционных системах счисления. Пусть определена процедура инкремента i -го индекса, которая в случае $k_i = k_i^{\max}$ и $i < n$ рекурсивно вызывает себя с параметром $i+1$ для инкремента индекса k_{i+1} , предварительно «сбросив» значение текущего индекса на начальное $k_i = k_i^{\min}$. Максимальные и минимальные значения k_i^{\max} и k_i^{\min} для каждого i -го индекса устанавливаются согласно соотношениям (13). Таким образом, для генерирования новой комбинации свободных ин-

дексов достаточно вызвать процедуру инкремента младшего индекса.

Описанная процедура генерирования свободных индексов j -й грани r -куба выполняется в цикле перебора номеров фиксированных индексов этих граней $j = 1, 2, \dots, n$, что в совокупности представляет собой процедуру перебора граничных элементов r -куба.

На Рис. 7 проиллюстрировано главное окно пользовательской версии системы построения и анализа ОР на примере модели высокочастотного электронного усилителя [12].

Заключение

Описанные выше модули СНИОР могут быть собраны как в единую программную среду, так и существовать в виде отдельных программ, вызываемых в строго определенной последовательности для обработки промежуточных данных. Модуль построения ОР, основанный на алгоритме многовариантного анализа, ввиду его высокого потенциала параллельной реализуемости и высоких вычислительных затрат

может быть реализован на специализированном высокопроизводительном суперкомпьютере. Полученные данные ОР, ввиду их большого объема, могут храниться в специализированных хранилищах данных, вместе с этим сама архитектура системы построения и анализа ОР аналоговых технических систем может быть переориентирована на облачный сервис [11].

Литература

1. Абрамов О.В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем. // Проблемы управления – 2006. – № 4. – С. 3 – 8.
2. Quarles, Thomas L. Analysis of Performance and Convergence for Circuit Simulation, Memorandum No. UCSB/ERL M89/42, University of California, Berkeley, Apr. 1989.
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. Катуева Я.В., Назаров Д.А. Аппроксимация и построение областей работоспособности в задаче параметрического синтеза // Международный симпозиум «Надежность и качество»: сб. науч. тр. – Пенза, 2005. – С. 130 – 134.
6. Назаров Д.А. Использование распределенных вычислений при построении области работоспособности. // Информатика и системы управления. – 2008. – № 1(15). – С. 142–151.
7. Salomon D. Data Compression: the complete reference. Volume 10. – Springer, 2007.
8. Nazarov D. An Approach to Complex Systems Sensitivity Estimation on the Basis of Regions of Acceptability // Innovative Information Technologies: Materials of the International Scientific-Practical Conference, Part 2. /Ed. Uvaisov S.U. – М.:HSE, 2014. Pp. 385 – 389.
9. Абрамов О.В. Проектирование технических систем с элементами настройки // Надежность и качество сложных систем. – 2014. - № 2. – С. 51 – 55.
10. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учеб. Для вузов по спец. «Вычислительные маш., компл., сист. и сети». - М.: Высш. шк., 1990
11. Назаров Д.А. Облачная модель системы построения и анализа областей работоспособности // Информатика и системы управления. – 2012. – №3(33). С. 112 – 120.
12. Абрамов О.В., Катуева Я.В. Система автоматизированного проектирования аналоговой радиоэлектронной аппаратуры // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 1999. - № 3. С. 52-54.

Абрамов Олег Васильевич. Заведующий отделом ИАПУ ДВО РАН. Окончил Дальневосточный политехнический институт в 1962 году. Доктор технических наук, профессор. Автор 310 печатных работ из них 7 монографий. Область научных интересов: теория надежности, параметрический синтез стохастических систем, автоматизация проектирования систем управления и РЭА, прогнозирование технического состояния и надежности. E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Назаров Дмитрий Анатольевич. Научный сотрудник Лаборатории управления надежностью сложных систем ИАПУ ДВО РАН. В 2005 г. Окончил Дальневосточный государственный технический университет (ДВПИ им. В.В. Куйбышева) в 2005 году. Кандидат технических наук. Автор 58 печатных работ. Области научных интересов: теория надежности, параметрический синтез, параллельные вычисления. E-mail: nazardim@iacp.dvo.ru