УДК 681.5.015.23

ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Д.А. Назаров
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Россия, 690041, Владивосток, Радио 5
E-mail: nazardim@iacp.dvo.ru

Ключевые слова: проектирование, надежность, область работоспособности

Рассматривается задача анализа чувствительности технических систем к параметрическим возмущениям. Данная задача возникает обычно на стадии параметричской оптимизации процесса проектирования технических систем с учетом требований надежности. Описан подход, основанный на испльзовании дискретного представления области работоспособности проектируемой системы.

Введение

Проектирвание технических устройств и систем с учетом требований наджности связано с анализом влияния отклонений параметров составляющих элементов на способность этих систем выполнять свои функции согласно требований спецификации. Отклонения значений параметров элементов от расчетных связано с влиянием на них как факторов внешней среды, так и внутренних деградационных процессов износа и старения. Получение характеристик области допустимой вариации параметров позволит существенно сократить вычисительные затраты при исследовании параметрических возмущений, решении задачи выбора оптимальных значений параметров и назначении допусков.

1. Определение области работоспособности

С точки зрения потребителя, любая техническая система должна выполнять некоторые функции и, следовательно, обладать некоторыми выходными характеристиками. Эти характеристики будем называть *выходными параметрами* и обозначим вектором (1):

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \ldots, y_m)^T. \tag{1}$$

С точки зрения проектировщика, техническая система состоит из отдельных элементов, выполняющих свои функции и обладающих некоторыми количественными характеристиками, которые будем называть *внутренними параметрами* и обозначать вектором (2):

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_n)^T. \tag{2}$$

В процессе проектирования исследуется модель системы (3), связывающая выходные параметры с входными:

$$y_i = y_i(\mathbf{x}),\ i = 1, 2, \ldots, m. \tag{3}$$

На внутренние и выходные параметры системы накладываются ограничения. Внутренние параметры (2) ограничиваются обычно производственными допусками (4):

$$x_{min_i} \le x_i \le x_{max_i},\ \forall i = 1, 2, \ldots, n. \tag{4}$$

Выходные параметры ограничиваются требованиями спецификации проектирумого устройства (5):

$$y_{min_i} \le y_i \le y_{max_i},\ \forall i = 1, 2, \ldots, m, \tag{5}$$

которые также называются *условиями работоспособности* (УР).

В процессе изготовления, хранения и, в особой степени, эксплуатации, элементы системы подвержены влиянию факторов как внешней среды, так и внутренних процессов износа и старения, что вызывает отклонения значений их параметров от расчетных. Ввиду зависимости (3) выходных параметров от внутренних, параметрические возмущения влияют на выходные характеристики системы, что может привести к нарушению требований (5). Нарушение требований к выходным характеристиками системы квалифицируется как отказ, который может повлечь серьезные последствия [1].

Исследование влияния параметрических возмущений на выходные параметры системы относится к отдельному этапу проектирования сложных технических систем - задаче *параметрического синтеза*, которая состоит в выборе теких номинальных значений внутренних параметров

$$\mathbf{x}_{nom} = (x_{nom_1},\ x_{nom_2},\ \ldots,\ x_{nom_n})^T,$$

которые обеспечивают максимум вероятности нахождения параметров элементов в области их допустимых значений при наличии параметрических возмущений:

$$\mathbf{x}_{nom} = \arg\max\ P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom},\ t) \in \mathbb{D}_x, \forall t \in [0,\ T]\}, \tag{6}$$

где $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom},\ t)$ - случайный процесс изменения параметров, $\mathbb{D}_x$ - область допустимой вариации внутренних параметров - *область работоспособности* (ОР), T - заданное время эксплуатации устройства.

Область работоспособности $\mathbb{D}_x$ представляет собой множество точек пространства внутренних параметров, для которых выходные характеристики системы удовлетворяют требованиям (5):

$$\mathbb{D}_x = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n\ \mid\ \mathbf{y}_{min}\ \le\ \mathbf{y}(\mathbf{x})\ \le\ \mathbf{y}_{max}\}. \tag{7}$$

Как правило, характеристики области (7) неизвестны, поэтому проверку принадлежности $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{nom},\ t) \in \mathbb{D}_x$ в выражении (6) приходится заменять на проверку вычисленных выходных характеристик требованиям спецификации (5). Таким образом, получение статистических оценок связано с трудоемкими вычислениями. Получение характеристик ОР позволяет существенно сократить время вычислений при решении задачи параметрического синтеза с использованием стохастического критерия (6).

Помимо проверки принадлежности вектора внутренних парметров системы области $\mathbb{D}_x$, данные о конфигурации области могут быть полезны при решении задач проектирования, связанных с определением допусков, оптимизации параметров с использованием детерминированных критериев [4], а также для оценки чувствительности системы к параметрическим возмущениям.

Определение характеристик ОР сопряжено с рядом трудностей. Как правило, модель (3) достаточно сложных систем задаются не в аналитическом, а алгоритмическом виде или с помощью имитационной модели, реализующей концепцию «черного ящика». В этом случае доступным методом исследования пространства параметров является многомерное зондирование.

Задача построения ОР заключается построении в пространстве внутренних параметров фигуры с известной конфигурацией, которая являлась бы приближением неизвестной области $\mathbb{D}_x$ при заданной модели (3), известных УР (5) и допусках (4) на внутренние параметры, ограничивающих область поиска.

2. Дискретная модель представления области работоспособности

Среди различных способов приближения ОР известными фигурами, таких как вписанные и описанные параллелепипеды, эллипсоиды или их комбинациями, в данной работе используется сеточное представление ОР, основанное на *методе матричных испытаний* [5]. Изначально метод матричных испытаний был разработан для физического моделирования процесса изменения значений параметров схемных элементов, однако его реализация с привлечением ЭВМ широкого распространения не получила из-за проблемы, связанной с вычислительной сложностью выполнения полного перебора.

Согласно методу матричных испытаний, заданный диапазон возможного изменения каждого параметра

$$a_i^x \le x_i \le b_i^x, \tag{8}$$

разбивается эквидистантно на q_i отрезков - квантов $k_i = 1, 2, \ldots, q_i,\ i = 1, 2, \ldots, n$, в центре каждого из которых выбирается «точка-представитель»:

$$c_i^{k_i} = \frac{a_i^{k_i} + b_i^{k_i}}{2}, \tag{9}$$

где $a_i^{k_i}, b_i^{k_i}$ - соответственно левая и правая границы k_i-го кванта i-го параметра [3].

Диапазоны (8) образуют n-мерный гиперпараллелепипед B_x в декартовой системе координат значений внутренних параметров. В качестве этого параллелепипеда может выступать гиперпараллелпипед допусков B_d, образованный допустимыми значениями каждого параметра в отдельности, либо *описанным гиперпараллелепипедом* B_o, ограничивающий область допустимых значений совместной вариации внутренних параметров.

В результате квантования B_x образуется сетка (рис. 1), разбивающая область поиска на множество непересекающихся элементарных гиперпараллелепипедов. В геометрическом центре каждого из этих гиперпараллелепипедов задана точка-представитель с координатами (9), которые задают множество несовместных ситуаций дискретного изменения значений параметров в области, ограниченной B_x. В каждой такой точке-представителе вычисляются выходные значения параметров и проверяются УР (**??**). Преедполагается, что результаты расчета значений выходных параметров и проверки УР в точке представителе элементарного параллелепипеда распространяются на все его точки. Таким образом, множество элементарных параллелепипедов $\mathbb{B}_g$ разбивается на два непересекающихся подмножества $\mathbb{B}_x^g = \mathbb{B}_x^+ \cup \mathbb{B}_x^-$, при этом $\mathbb{B}_x^+ \cap \mathbb{B}_x^- = \oslash$, где $\mathbb{B}_x^+$ является представлением искомой ОР $\mathbb{D}_x$, которое будем называть *сеточным представлением области работоспособности* (СПОР). Элементарные параллелепипеды из множества $\mathbb{B}_x^g$ будем называть *элементами* или *ячейками* сетки.

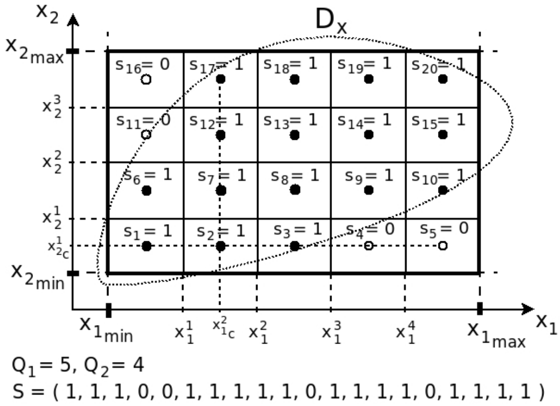

Рис. 1. Квантование области поиска и сеточное представление ОР в двумерном пространстве параметров

Для задания СПОР используются наборы данных двух типов:

- Геометрические параметры сетки;
- Данные о принадлежности каждого элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^+$ или $\mathbb{B}_x^-$;

Геометрические параметры сетки позволяют вычислить координаты границ любого ее элемента и координаты его точки-представителя, имея набор индексов $(k_1, k_2, \ldots, k_n)$, а также можно вычислить индексы элемента сетки в котором находится некоторая точка с заданными координатами (внутри гиперпараллелепипеда B_x) $\vec{x}^* = (x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*)^T$. Геометрические параметры сетки задаются следующим набором данных:

- Размерность n пространства внутренних параметров;

- Диапазон (8) допустимых значений для каждого параметра;
- Количество квантов в разбиении диапазона значений каждого параметра;

Принадлежность элемента сетки с индексами $(k_1, k_2, \ldots, k_n)$ множеству $\mathbb{B}_x^+$ или $\mathbb{B}_x^-$ задается *массивом состояний* (МС) элементов сетки $S[R] = (s_1, s_2, \ldots, s_R)$, где R - количество элементов сетки:

$$R = \prod_{i=1}^{n} q_i, \tag{10}$$

а элементы МС принимают значения (для нормированного массива) $s_p \in \{0, 1\}$. Элемент s_p МС далее будет обозначаться как $S[p]$. Значение состояния $S[p] = 0$ означает принадлежность соответствующего элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^-$, а значение $S[p] = 0$ означает принадлежность соответствующего ему элемента сетки подмножеству $\mathbb{B}_x^+$. О соответствии каждому элементу сетки, заданному с помощью n индексов $(k_1,\ k_2,\ \ldots,\ k_n)$, единственного элемента $S[p]$ МС более подробно описано в работе [3].

3. Алгоритм анализа

Список литературы

1. Абрамов О.В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. - 2011. - № 2(28). - С. 4-15.
2. Абрамов О.В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. М.: Наука, 1992.
3. Катуева Я.В., Назаров Д.А Аппроксимация и построение областей работоспособности в задаче параметрического синтеза// Международный симпозиум «Надежность и качество», Пенза: ПГУ, 2005, С. 130 - 134.
4. Назаров Д.А. Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. - 2011. №2(28). - С. 59-69.
5. Б.В. Васильев, Б.А. Козлов, Л.Г. Ткаченко Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. - М.: Советское радио, 1964.