

в них процессы. В таких условиях рассмотрена задача принятия решений в условиях неопределенности, реализующая обеспечение гарантированного результата и предложены методы прямого поиска,

допускающие распараллеливание вычислительных процессов и использующие многометодную технологию.

ЛИТЕРАТУРА

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. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4(42). – С. 64-77.
3. Абрамов О.В. Некоторые особенности задачи оптимального параметрического синтеза // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 23-31 мая, г. Пенза. – Пенза: ПГУ, 2011. – Т. 1. – С. 3-5.
4. Абрамов О.В. Алгоритм оценки и прогнозирования остаточного ресурса сложных технических систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 27 мая – 3 июня, г. Пенза. – Пенза: ПГУ, 2013. – Т. 1. – С. 5-6.
5. Абрамов, О.В. Технология предупреждения отказов технических систем ответственного назначения [Электронный ресурс]: труды XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. / О.В. Абрамов. – Электронные данные. – М.: ИПУ, 2014. – 1 эл. опт. Диск (DVD-ROM). – С. 7540-7545.
6. Озерный В.М. Принятие решений. Обзор // Автоматика и телемеханика, №11, 1971. – С. 106-121.
7. Абрамов О.В. Управление состоянием сложных технических систем // Труды международного симпозиума "Надежность и качество 2010", Пенза: ПГУ, 2010. т. I, С. 24-26.
8. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. . – 446с.
9. Аноп М.Ф., Катуева Я.В., Михаличук В.И. Алгоритмы роя пчел и частиц в задаче обеспечения надежности по постепенным отказам // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2015. № 1. DOI: 10.7463/0115.0755194.
10. Родзин С.И., Родзина О.Н. Поиск оптимальных решений комбинаторных задач: теория, эволюционные алгоритмы и их приложения для проблемно-ориентированных информационных систем // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2014. –№ 4(19). – С. 18-33.
11. Диго Г.В., Диго Н.В. Применение эволюционных вычислений при управлении параметрической надежностью аналоговых технических устройств и систем // Информатика и системы управления. – 2018. – №4(58). – С.70-81.
12. Luke S. Essentials of Metaheuristics. A Set of Undergraduate Lecture Notes. Zeroth Edition. Online Version 0.5. October, 2009 (<http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>).
13. Сулимов В. Д., Шкапов П. М. Применение гибридных алгоритмов глобальной оптимизации к экстремальным задачам для гидромеханических систем // Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. №11. С.141-158.

УДК 681.5.015.23

Назаров Д.А.

ФГБУН «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии наук» (ИАНУ ДВО РАН), Владивосток, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕГРАДАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ

Рассматривается задача проектирования технических систем с учетом параметрического дрейфа, возникающего в процессе эксплуатации. Для анализа допустимых параметрических отклонений используется информация о конфигурации области работоспособности в пространстве внутренних параметров системы. В качестве способа описания области работоспособности используется модель дискретного представления многомерных областей. На примере схемы делителя напряжения и данных о деградации резисторов и конденсаторов рассматривается задача анализа дрейфа параметров. С помощью программной системы нахождения и использования областей работоспособности приводится визуализация сечений области работоспособности по текущим значениям параметров и анализируется тенденция параметрического дрейфа.

Ключевые слова:

ОБЛАСТЬ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ДРЕЙФ, ДЕГРАДАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ, ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА

Введение

Проектирование технических систем с учетом требований надежности требует анализа влияния на их функционирование как случайных параметрических возмущений, так и постепенного дрейфа параметров элементов под влиянием факторов внешней среды и внутренних физико-химических процессов старения. Одним из подходов к анализу параметрических возмущений является использование областей работоспособности (ОР) – многомерных областей в пространстве значений параметров элементов системы (внутренних параметров), при которых эта система считается работоспособной. Такой подход характерен для функционально-параметрического подхода в теории надежности, когда исследуемая система описывается в виде функциональных зависимостей выходных характеристик от параметров составляющих ее элементов [1].

Информация о конфигурации ОР, как правило, неизвестна. Кроме того, описание модели системы далеко не всегда позволяет получить аналитические выражения для представления ОР, поскольку для достаточно сложных систем зависимости выходных параметров от внутренних чаще задаются алгоритмически, в виде численного решения систем дифференциальных уравнений [2]. В этом случае используется метод многомерного зондирования пространства внутренних параметров. Задаче ап-

проксимации и построения ОР в пространстве внутренних параметров посвящено множество работ, обзоры которых приведены в [3, 4]. В данной статье используется подход, основанный на представлении многомерной фигуры дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов (ЭГ), заданных узлами многомерной регулярной сетки [4, 5].

ОР используется, главным образом, для снижения вычислительных затрат при решении ряда задач, связанных с выбором оптимальных в определенном смысле значений внутренних параметров по стохастическим критериям. Данные о границах и форме ОР могут быть также использованы для оптимизации номинальных значений параметров по детерминированному критерию типа запаса работоспособности. Такой критерий используются при недостатке информации о дрейфе параметров во времени, и наиболее целесообразным решением в этом случае считается выбор рабочей точки внутри ОР, максимально удаленной от границы области [4, 6, 7]. В случае доступности информации о тенденциях дрейфа параметров элементов, номинальные значения параметров могут быть оптимизированы в определенном смысле с учетом этих тенденций и конфигурации ОР. В данной работе рассматривается подход к анализу деградационных изменений параметров в рамках программно-алгоритмической системы нахождения и использования областей работоспособности (СНИОР) [8].

Для понимания описываемого в работе подхода к анализу параметрических отклонений рассмотрим способ представления и основную идею алгоритма построения ОР. Под построением ОР понимается построение многомерной фигуры известной конфигурации, аппроксимирующую истинную ОР в пространстве внутренних параметров.

Задача построения области работоспособности Пусть исследуемая система обладает m выходными характеристиками, интересующими потребителя:

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m), y_i \in R, \quad (1)$$

каждая из которых в любой момент времени зависит от набора текущих значений внутренних параметров:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_i \in R \quad (2)$$

в виде зависимостей:

$$y_i = y_i(x), i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

Выражения (3) представляют собой собственно модель системы.

На выходные характеристики (1), как правило, накладываются ограничения, указываемые в спецификации к системе или устройству:

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

которые называются условиями работоспособности (УР), поскольку определяют состояние работоспособности системы или состояние отказа. Эти ограничения формируют в пространстве внутренних параметров область:

$$D_x = \{x \in R^n : y_i^{\min} \leq y_i(x) \leq y_i^{\max}, \forall i = 1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

которая называется областью работоспособности системы и, как можно видеть, представляет собой множество точек пространства внутренних параметров, при которых система находится в работоспособном состоянии.

В данной работе рассматривается способ построения ОР на основе аппроксимации многомерной фигуры дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов (ЭГ), заданных узлами регулярной сетки, и методе многомерного зондирования на этой сетке.

Построение ОР выполняется внутри ограничивающего бруса B , заданного интервалами:

$$B = \{[x_{i \min}, x_{i \max}], i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (6)$$

В качестве этого бруса может выступать как брус допусков на внутренние параметры, так и описанный вокруг ОР брус, найденный методом Монте-Карло [5]. Каждый диапазон $[x_{i \min}, x_{i \max}]$, $i = 1, 2, \dots, n$ внутри бруса B разбивается эквидистантно на q_i интервалов-квантов. Их пересечения формируют узлы сетки, которые являются вершинами ЭГ. Каждый ЭГ задается набором n целочисленных индексов (k_1, k_2, \dots, k_n) , $k_i = 1, 2, \dots, q_i$. По этим индексам, зная диапазоны ограничивающего бруса (6) и количества квантов q_i можно однозначно восстановить геометрические характеристики ЭГ.

$$x_{i \min}^{k_i} = x_{i \min} + h_i \cdot (k_i - 1), \quad (7)$$

$$x_{i \max}^{k_i} = x_{i \min}^{k_i} + h_i = x_{i \min} + h_i \cdot k_i$$

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

В центре каждого ЭГ выбирается точка-представитель:

$$x_r(k_1, k_2, \dots, k_n) = \left(\frac{x_{1 \min}^{k_1} + x_{1 \min}^{k_1}}{2}, \dots, \frac{x_{n \min}^{k_n} + x_{n \min}^{k_n}}{2} \right) \quad (8)$$

для которой вычисляются выходные характеристики системы (1). Если полученные выходные характеристики удовлетворяют ограничениям (4), то ЭГ с индексами (k_1, k_2, \dots, k_n) присваивается признак «1», противном случае - «0». Таким образом, для хранения признаков принадлежности ОР каждого ЭГ используется множество индикаторов (МИ):

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_R) \quad (9)$$

где $R = q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_n$ - количество ЭГ, s_p , $p = 1, 2, \dots, R$ - результат вычисления функции принадлежности:

$$\chi(k_1, k_2, \dots, k_n) = \begin{cases} 1, & y_{j \min} \leq y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \leq y_{j \max}, j = 1, 2, \dots, m \\ 0, & y_{j \min} > y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \vee y_{j \max} < y_j(x_r(k_1, k_2, \dots, k_n)) \end{cases} \quad (10)$$

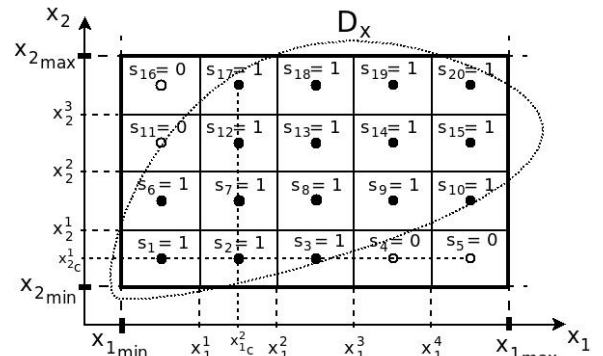
Между индексом p элемента s_p множества индикаторов S и набором индексов (k_1, k_2, \dots, k_n) существует взаимнооднозначное соответствие [4]:

$$p(k_1, k_2, \dots, k_n) = k_1 + q_1 \cdot (k_2 - 1) + q_1 q_2 \cdot (k_3 - 1) + \dots + q_1 q_2 \dots q_{n-1} (k_n - 1), \quad (11)$$

Таким образом, модель дискретного представления ОР описывается четверкой:

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (12)$$

где, n - размерность пространства внутренних параметров, B - ограничивающий брус (6), $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ - вектор с количеством квантов по каждому параметру, S - множество индикаторов принадлежности каждого ЭГ в соответствии с функцией (10). Построение ОР на основе этой модели состоит в вычислении всех элементов множества S индикаторов принадлежности. На рисунке 1 проиллюстрирован принцип построения двумерной ОР на основе модели (12).



$$Q_1 = 5, Q_2 = 4$$

$$S = (1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1)$$

Рисунок 1 - Дискретное представление области работоспособности

Имея представление ОР на основе модели (12) можно выполнять статистические испытания с вариацией внутренних параметров при существенно меньших вычислительных затратах, поскольку нет необходимости прибегать к моделированию системы с целью проверки выполнения УР (4). Проверка нахождения произвольной точки $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ в ОР сводится к нахождению индексов соответствующего ЭГ и проверке его состояния в множестве индикаторов (9). Индексы ЭГ вычисляются следующим образом:

$$k_i^* = \left\lfloor \frac{x_i^* - x_{i \min}}{h_i} \right\rfloor, \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

Для полученного набора индексов, используя выражение (11), вычисляется номер элемента массива индикаторов $p(k_1^*, k_2^*, \dots, k_n^*)$ и проверяется его состояние: если $s_p = 1$, то точка x^* находится внутри ОР, если $s_p = 0$, то заданная точка находится вне области.

Исследование деградационных изменений внутренних параметров с использованием ОР основывается на проверке вхождения текущей реализации набора параметров в эту область. Данная операция в большинстве случаев требует гораздо меньше вычислительных затрат, чем расчет модели системы (3) с целью проверки соответствия выходных параметров УР (4). В рамках имитации параметрического дрейфа, порождение новой реализации вектора внутренних параметров осуществляется либо из имеющейся статистики реальных измерений, либо использованием известных законов деградации параметров для каждого конкретного элемента.

Учет деградационных изменений параметров для оптимального выбора номиналов

Изучению процессов деградации параметров электронных компонентов посвящено огромное количество работ, и с развитием и появлением новых элементов, основанных на новых материалах, количество этих исследований вряд ли уменьшится. Процесс дрейфа параметров, особенно в нормальных условиях, обычно протекает довольно длительное время, что создает определенные трудности в выявлении статистически устойчивых закономерностей и построении актуальных моделей. В этом случае часто применяют ускоренные испытания, подвергая испытываемые объекты экстремальным агрессивным воздействиям основных факторов внешней среды: повышенная температура, повышенная влажность, излучения. На основе полученных данных строят деградационные модели [9, 10] в том числе и с использованием процессов случайных блужданий, например, винеровский процесс или нашедший широкое применение в имитации случайных параметрических возмущений гамма-процесс [10].

В данной работе на примере делителя напряжения рассматривается процедура исследования тенденций дрейфа электронных компонентов на основе изученных и описанных явлений деградационных изменений конденсаторов [11, 12] резисторов [13] с помощью дискретного представления ОР (12).

Пример

Рассмотрим делитель напряжения, принципиальная схема которого изображена на рисунке 2 [3].

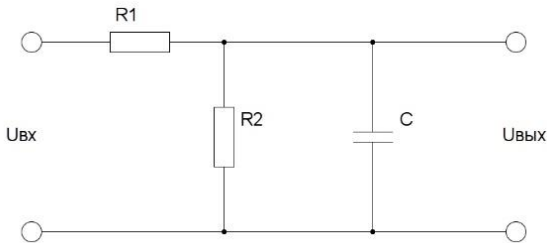


Рисунок 2 - Принципиальная схема делителя напряжения

Внутренними параметрами делителя являются:

$x_1 = R_1$ – сопротивление резистора R_1 , Ом;

$x_2 = R_2$ – сопротивление резистора R_2 , Ом;

$x_3 = C$ – емкость конденсатора C , Ф;

$x_4 = U_{вх}$ – входное напряжение, В.

Выходными характеристиками этого делителя являются:

$y_1 = \tau$ – постоянная времени перезаряда конденсатора C ;

$y_2 = P$ – мощность рассеяния, Вт;

$y_3 = U_{вых}$ – напряжение на выходе делителя, В.

Выходные характеристики связаны с параметрами элементов выражениями [3]:

$$y_1 = \frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2}, \quad y_2 = \frac{U_{вх}^2}{R_1 + R_2}, \quad y_3 = \frac{U_{вх}R_2}{R_1 + R_2}.$$

На выходные характеристики налагаются условия работоспособности:

$$y_1 < 0.5 \cdot 10^{-6}; \quad y_2 < 0.1; \quad 4 \leq y_3 \leq 6.$$

ОР построена внутри описанного гиперпараллелепипеда, определенного методом Монте-Карло:

$$1.004 \leq x_1 \leq 1499.97 \text{ Ом};$$

$$176.382 \leq x_2 \leq 1500 \text{ Ом};$$

$$1 \cdot 10^{-10} \leq x_3 \leq 9.99984 \cdot 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$4.00602 \leq x_4 \leq 15.4227 \text{ В}.$$

Номинальные значения внутренних параметров имеют следующие значения:

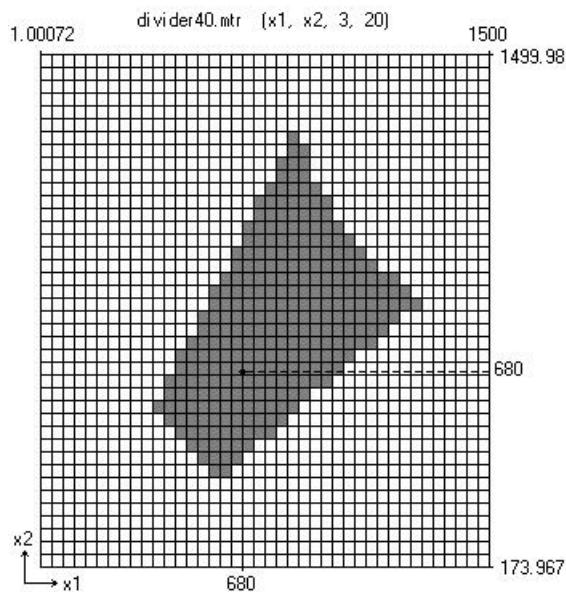
$$R_1 = 680 \text{ Ом}; \quad R_2 = 680 \text{ Ом}; \quad C = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}; \quad U_{вх} = 10 \text{ В}$$

Рассмотрим данные по дрейфу параметров элементов схемы, описанные в работах [11 – 13]. Для резисторов фиксировалось время, за которое величина сопротивления изменялась на 1% номинала. Эти временные интервалы были совмещены с данными по дрейфу значения емкости конденсатора. В таблице 1 рассчитаны значения параметров схемы на основании использованных данных о тенденции дрейфа.

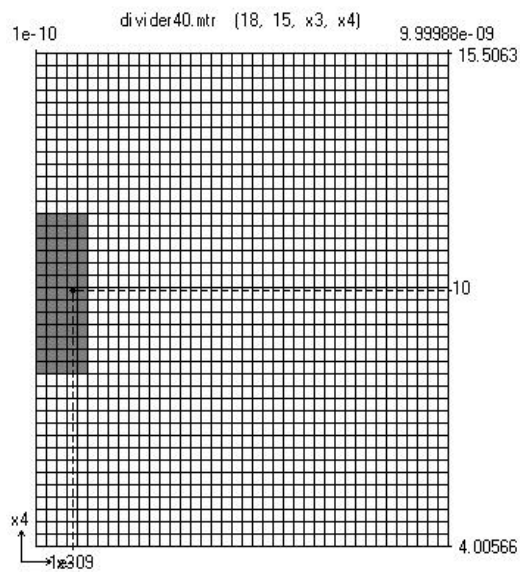
Данные о деградационных изменениях параметров во времени Таблица 1

Наработка, час	R_1 , Ом	R_2 , Ом	C , Ф
0	680	680	$1 \cdot 10^{-9}$
500	687	687	$9,7 \cdot 10^{-10}$
1000	694	694	$9,6 \cdot 10^{-10}$
3000	700	700	$9,2 \cdot 10^{-10}$

С помощью программного комплекса СНИОР была проведена визуализация рабочей точки на сечениях дискретного представления ОР с дискретизацией диапазонов варьирования внутренних параметров в 40 квантов. На рисунках 3 и 4 показаны двумерные сечения ОР с визуализацией параметрического дрейфа от начального состояния до значений при наработке в 3000 часов, указанных в таблице 1.



а)



б)

Рисунок 3 - Сечения ОР с отображением начальных значений параметров при $t = 0$

а) Плоскость параметров R_1, R_2 ; б) Плоскость параметров $C, U_{вх}$

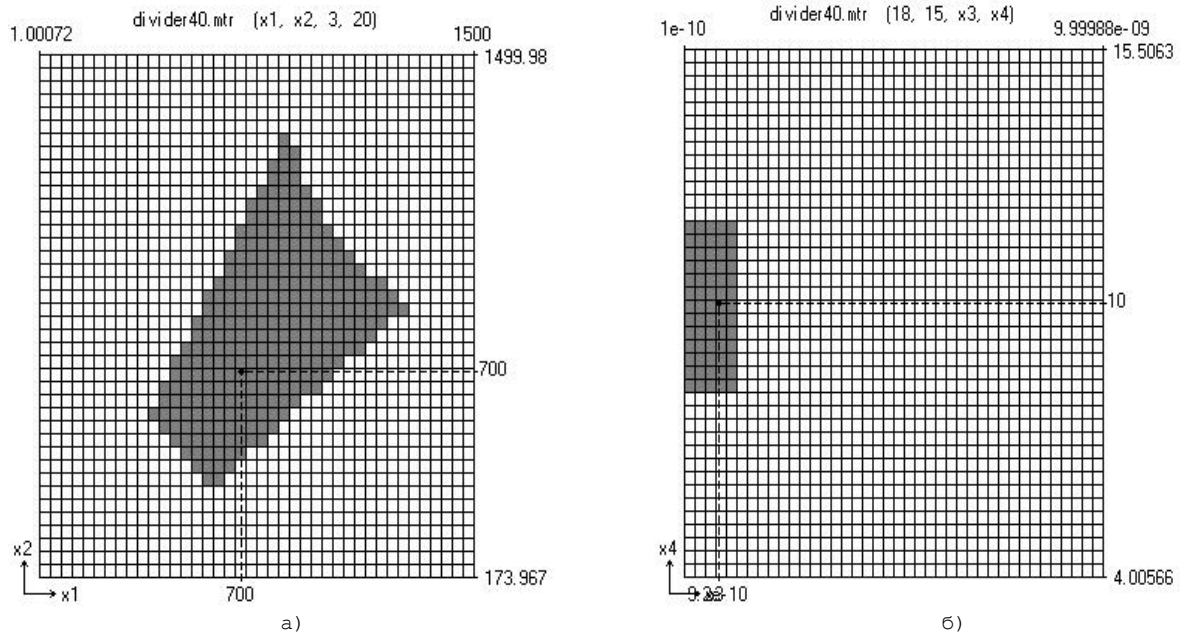


Рисунок 4 – Сечения ОР с отображением значений параметров при $t = 3000$ ч
 а) Плоскость параметров R_1, R_2 ; б) Плоскость параметров C, U_{ex}

Как можно видеть из визуализации процесса дрейфа на рисунках 3 и 4, номиналы параметров выбраны с достаточно большим запасом, обеспечивающим сохранение работоспособного состояния системы даже при существенных параметрических возмущениях. Учитывая описанные в Таблице 1 тенденции параметрического дрейфа, очевиден существенный запас работоспособного состояния системы, а также возможна коррекция значений резисторов в сторону уменьшения без потери работоспособности в рамках указанных условий по выходным параметрам.

Заключение

Рассмотрена проблема учета деградиционных изменений параметров при решении задачи выбора их номинальных значений с учетом требований надежности. Особенностью предложенного в работе решения является использование области допустимой вариации внутренних параметров – области работоспособности. На приведенном примере можно видеть достаточно большой запас для дрейфа в случае сохранения тенденции как для резисторов, так и для конденсатора. Показано, что применяя различные способы симуляции параметрического дрейфа, применение информации о конфигурации области работоспособности позволяет оценить имеющийся запас работоспособного состояния системы до наступления отказа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов О.В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4(42). – С. 64–77.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
3. Саушев А.В. Области работоспособности электротехнических систем / А.В. Саушев. – Санкт-Петербург: Политехника, 2013.
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. трудов. – Пенза: ПГУ. – 2005. С. 130 – 134.
6. Катуева Я.В., Назаров Д.А. Методы параметрического синтеза на основе сеточного представления области работоспособности // Информационные технологии. – 2015. – №9. Том 21. С. 651 – 656.
7. Абрамов О.В. Алгоритм оценки и прогнозирования остаточного ресурса сложных технических систем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 27 мая – 3 июня, г. Пенза. – Пенза: ПГУ, 2013. – Т. 1. – С. 5–6.
8. 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.
9. Еремина И.Н. Прогнозирование срока службы изделий на основе активационных моделей процессов дегградации функциональных параметров // Надежность и качество: труды междуна. симпоз. в 2-х томах. – Пенза. – 2007. – Том 2. – С. 18–21.
10. Четвертакова Е.С. Исследование деградиционных гамма-моделей со случайным и фиксированным эффектами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 6. С. 120–128. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-120-128
11. Anunay Gupta, Om Prakash Yadav, Douglas DeVoto, and Joshua Major. "A Review of Degradation Behavior and Modeling of Capacitors." // Proceedings of the ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. ASME 2018. San Francisco, California, USA, 2018. DOI: 10.1115/IPACK2018-8262.
12. C. Kulkarni, G. Biswas, X. Koutsoukos, K. Goebel, and J. Celaya. "Experimental Studies of Ageing in Electrolytic Capacitors," // Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, 2010.
13. C. Park, and W. Padgett, "Accelerated degradation models for failure based on geometric brownian motion and gamma processes", Lifetime Data Analysis, 11(4), 2005. Pp. 511–527.
14. Старостин И.Е., Быков В.И. Анализ и моделирование в сосредоточенных параметрах динамики реальных физико-химических процессов методами современной неравновесной термодинамики с использованием системного анализа // Труды международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2018. 1 т. С. 210 – 214.