

УДК 681.5.015.23

© 2012 г. Д.А. Назаров, канд. техн. наук  
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

## ОБЛАЧНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗА ОБЛАСТЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ\*

Рассматривается облачная архитектура программного комплекса построения и анализа областей работоспособности аналоговых технических систем. Описываются компоненты параллельной подсистемы построения области работоспособности.

**Ключевые слова:** проектирование, область работоспособности, облачные вычисления.

### Введение

Задача исследования пространства параметров элементов технического объекта с целью выявления области их допустимых значений является одним из важных этапов проектирования с учетом требований надежности. Особую важность эта задача приобретает при проектировании систем ответственного назначения, отказ которых может привести к техногенным чрезвычайным ситуациям [1]. Существенная часть отказов систем возникает из-за изменения значений параметров их элементов, происходящих из-за влияния как внешних факторов, так и внутренних процессов износа и старения. Получение характеристик области в пространстве значений параметров, внутри которой эти параметры обеспечивают функционирование системы в рамках возложенных на нее требований, позволяет исследовать чувствительность системы к изменениям значений отдельных параметров и оценивать риск отказа. Область допустимых значений параметров элементов далее будет называться областью работоспособности (ОР).

Проблема исследования свойств ОР состоит в отсутствии явных аналитических зависимостей выходных характеристик системы от параметров ее элементов. Это объясняется тем, что для достаточно сложных систем такие выражения, как правило, задаются алгоритмически в виде численного решения систем дифференциальных уравнений. Другой причиной отсутствия аналитических выражений является использование имитационных моделей, построенных с помощью САПР и представляющих собой «черный ящик». Таким образом, доступным методом исследования пространства значений параметров в общем случае является метод

---

\* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН (12-III-B-03-023, 12-I-OЭММПУ-01).

многомерного зондирования, представляющий собой многовариантный анализ системы [2]. Выполнение этой процедуры связано с большими вычислительными затратами. Развитие вычислительной техники в целом за последние два десятилетия, а также специализированной высокопроизводительной техники и технологий параллельных вычислений, в том числе и с использованием графических процессоров [3], позволяет решать переборные задачи за приемлемое время. Вместе с этим стоит отметить одну из проблем использования специализированных программных средств, связанную с их переносом на различные платформы и технической поддержкой. Развертывание программных комплексов, ориентированных на многопроцессорную обработку, часто может сопровождаться трудностями, связанными с настройкой и сопровождением взаимодействия различных модулей как внутри самого программного комплекса, так и его окружения. Поэтому с развитием глобальной сети Интернет все более привлекательной для разработчиков становится модель использования программного средства в виде веб-сервиса (SaaS – Software as a Service).

За последние пять лет отмечается бурный рост и развитие такой модели использования ресурсов, которая в более широком смысле получила название «облачной». Услуги предоставления таких ресурсов обеспечиваются, как правило, сторонними организациями и могут иметь характер публичного доступа или закрытого корпоративного доступа. Несмотря на риски возможной утечки информации или иных сбоев, облачная концепция организации информационной инфраструктуры компании в некоторых случаях позволяет сократить расходы на содержание собственного оборудования и обслуживающего персонала [4].

Решение задачи построения ОР связано с использованием не только высокопроизводительного оборудования, но и различных средств моделирования исследуемых объектов, – например, систем стандарта SPICE – для моделирования электрических цепей. Наличие связей программного средства с другими системами требует больше квалифицированной поддержки, чем независимое программное обеспечение. Подключение программных модулей, реализующих исследуемую модель, также требует большего контроля и возможности оперативного административного вмешательства.

Необходимость использования аппаратных средств высокопроизводительных вычислений для системы построения ОР также может создать определенные трудности настройки и поддержки. Реализация системы построения и анализа ОР в виде веб-сервиса позволит существенно снизить негативный эффект, вызванный указанными выше техническими трудностями.

В данной работе предлагается архитектура программного комплекса построения и анализа ОР аналоговых технических систем с учетом облачной модели доступа к его ресурсам. Рассматриваются основные функциональные компоненты программного комплекса и их взаимосвязи.

Для понимания механизмов взаимодействия основных функциональных элементов рассматриваемого программного комплекса важно иметь представление об используемых подходах к представлению ОР и реализующих их алгоритмах.

## Постановка задачи построения ОР

В рамках данной задачи считается, что рассматриваемая система состоит из атомарных неделимых элементов, имеющих количественные характеристики и выполняющих определенные функции. Параметры этих элементов, которые называются *внутренними параметрами*, задаются вектором

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad x_i \in \mathbf{R} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Выходные количественные характеристики исследуемой системы называются *выходными параметрами* и обозначаются  $m$ -вектором:

$$\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, \quad y_i \in \mathbf{R} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

Значения выходных параметров связаны с внутренними параметрами зависимостями:

$$y_i = y_i(\mathbf{x}), \quad \forall i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

которые представляют собой модель процесса функционирования исследуемой системы. Модели достаточно сложных систем обычно задаются алгоритмически в виде численного решения систем дифференциальных уравнений или с помощью имитационной модели.

Выходные параметры выражают характеристики устройства или системы, интересующие потребителя. Для выполнения определенных функций и удовлетворения потребностей конечного пользователя эти параметры должны находиться в определенном диапазоне значений, который называется *условиями работоспособности* (УР):

$$\mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{y}_{\max}. \quad (4)$$

Считается, что устройство работоспособно, если его выходные параметры удовлетворяют выражению (4) при заданном наборе внутренних параметров, и неработоспособно – в противном случае, что выражается функцией:

$$F^y(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{y}_{\max}, \\ 0, & [\mathbf{y}(\mathbf{x}) < \mathbf{y}_{\min}] \vee [\mathbf{y}(\mathbf{x}) > \mathbf{y}_{\max}]. \end{cases} \quad (5)$$

Нарушение УР вызываются изменениями значений внутренних параметров, которые возникают под влиянием факторов различной природы: воздействие внешних факторов, – таких как температура, влажность, различные излучения, внутренние процессы износа и старения, а также взаимное влияние элементов.

Условия работоспособности (4) определяют в пространстве внутренних параметров область, в каждой точке которой выходные параметры удовлетворяют этим условиям:

$$\mathbf{D}_x = \{\mathbf{x} \in R^n \mid \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{y}_{\max}\}. \quad (6)$$

Область  $\mathbf{D}_x$ , определенная выражением (6), называется *областью работоспособности* исследуемого технического объекта, заданного моделью (3), для условий работоспособности (4). ОР обычно имеет непустое пересечение с областью допусков, образованной, как правило, производственными ограничениями на значения внутренних параметров:

$$x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

В случае если это пересечение пусто, необходим возврат к этапу структурного синтеза для выбора другой топологии системы [5]. Область допусков представляет собой  $n$ -мерный гиперпараллелепипед и является областью поиска при построении ОР.

Задача построения ОР заключается в необходимости построить в пространстве внутренних параметров фигуру с известной конфигурацией, аппроксимирующую неизвестную область  $D_x$  (6) при заданной модели (3), известных УР (4) и допусках (7) на внутренние параметры (1).

В работе рассматривается способ построения геометрического аналога ОР на основе многовариантного анализа системы в пространстве значений ее параметров и представлении многомерной области дискретным множеством элементарных параллелепипедов. Координаты пробных точек и вершин элементарных параллелепипедов задаются узлами регулярной сетки. Представление многомерной области дискретным множеством элементарных гиперпараллелепипедов по результатам многовариантного анализа системы в пространстве значений ее внутренних параметров описывается моделью:

$$G_R = (n, B, Q, S), \quad (8)$$

где  $n$  – размерность пространства внутренних параметров;  $B$  – гиперпараллелепипед допусков, заданный неравенствами (7);  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  — вектор, содержащий количество шагов сетки внутри диапазона допуска каждого параметра;  $S = (s_1, s_2, \dots, s_R)$ ,  $s_i \in \{0,1\}$  – массив индикаторов (МИ) принадлежности каждого элементарного параллелепипеда аппроксимирующей ОР фигуре;  $R = q_1 \times q_2 \times \dots \times q_n$  – количество элементов сетки [6].

Суть алгоритма построения ОР на основе модели (8) состоит в переборе всех элементов  $n$ -мерной регулярной сетки, параметры которой определяются границами допусков (7) и вектором  $Q$ , проверки УР посредством вычисления функции принадлежности (5) для центральной точки каждого элемента сетки и сохранения этого результата в МИ. Особенностью этого алгоритма является то, что перебор выполняется не по индексам элементов сетки ( $k_1, k_2, \dots, k_n$ ), а по индексу одномерного МИ, имеющего взаимно однозначную связь с набором этих индексов [7]. Таким образом, с учетом сказанного выше, алгоритм построения ОР состоит из одного цикла, на каждой итерации которого текущий индекс МИ преобразуется в соответствующий набор  $n$  индексов элемента сетки, для которого вычисляются координаты пробной точки, а затем вычисляется бинарный результат функции принадлежности (5) и сохраняется в текущей позиции МИ.

Поскольку вычисление функции (5) для каждого отдельного элемента сетки выполняется независимо, то параллельное выполнение алгоритма может быть достигнуто разбиением МИ [8].

### Архитектура подсистемы построения ОР

Решение задачи построения ОР в параллельно выполняемых процессах подразумевает наличие двух типов программных компонентов: управляющий узел; вычислительный узел.

Функции управляющего узла заключаются в формировании параметров всей задачи по введенным пользователем данным, запуск вычислительных узлов, мониторинг и объединение результатов их работы.

Основными параметрами задачи построения ОР являются:

- 1) модель исследуемой системы (3);
- 2) количество варьируемых внутренних параметров (1);
- 3) интервалы допусков (7) всех варьируемых параметров;
- 4) количество шагов сетки по всем варьируемым параметрам;
- 5) условия работоспособности (4);
- 6) количество вычислительных процессов.

На основе этой информации *модуль создания задачи* управляющего узла создает структуру (8) для представления ОР дискретным множеством элементарных параллелепипедов. В рамках этой процедуры создается пустой МИ, к заполнению которого, как было сказано выше, сводится задача построения ОР. В случае указания параллельного режима (количество процессов более одного), *модуль декомпозиции данных* выполняет декомпозицию задачи разбиением МИ [8]. Запуск задачи инициируется пользователем и заключается в запуске *модуля контроля вычислительных узлов*, который запускает один или несколько параллельных вычислительных процессов и отслеживает их работу (рис. 1). В случае успешного выполнения задачи вычислительным процессом. Результаты его работы сохраняются на управляющем узле.

Функцией *вычислительного узла* является заполнение локальной части МИ путем полного перебора соответствующих элементов сетки и определения их принадлежности аппроксимации ОР.

Запуск вычислительного процесса сопровождается передачей перечисленных выше параметров задачи (1) – (5) и диапазона ( $p_{i\ min}$ ,  $p_{i\ max}$ ) индексов элементов МИ, которые будут обработаны вычислительным узлом в рамках выполнения  $i$ -го задания.

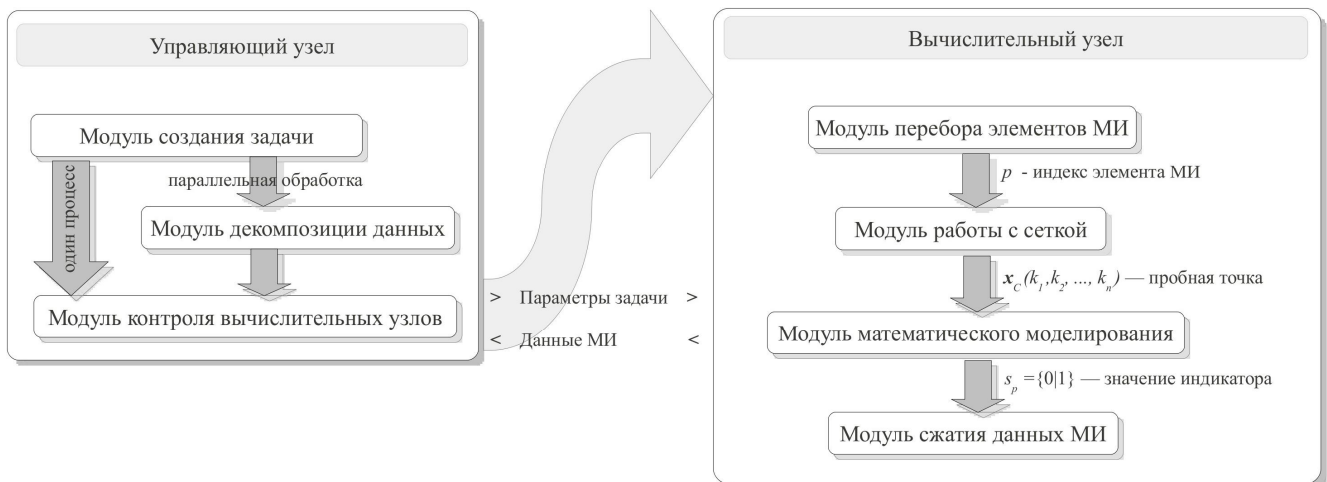


Рис. 1. Основные компоненты системы построения ОР и их связи.

Получив задание, вычислительный узел обращается к *модулю перебора элементов МИ*, представляющий собой цикл по значениям индексов в указанном диапазоне  $p = p_{i\ min}, p_{i\ min} + 1, p_{i\ min} + 2, \dots, p_{i\ max}$ . На каждой итерации этого цикла

происходит обращение к *модулю работы с сеткой*, в котором на основе полученной в задании информации о сетке вычисляются индексы  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  соответствующего ее элемента. Другая функция этого модуля вычисляет координаты пробной точки  $\mathbf{x}_c(k_1, k_2, \dots, k_n)$ , также используя информацию о величине шага сетки по каждому параметру. Координаты пробной точки передаются в *модуль математического моделирования* для вычисления значений выходных параметров (2) и проверки выполнения УР (4). Модуль математического моделирования представляет собой в общем случае интерфейс различных моделирующих систем и программных модулей, реализующий модель (3) вычисления выходных характеристик для заданного набора параметров. Целью этого модуля является унификация доступа к моделям различных систем, заданных как посредством разделяемых динамических библиотек, соответствующих определенной сигнатуре вызываемых функций, так и специализированных программных комплексов типа SPICE для моделирования электрических цепей [9]. Результатом работы модуля является значение функции принадлежности текущего элемента сетки аппроксимирующей ОР фигуре, т.е. значение текущего индикатора  $s_p = F^y(\mathbf{x}_c(k_1, k_2, \dots, k_n))$ .

Полученное в модуле математического моделирования значение индикатора записывается в локальную часть МИ, созданную и обрабатываемую текущим процессом. Функции записи и хранения этих значений содержатся в *модуле сжатия данных МИ*. Сжатие данных МИ необходимо ввиду их существенной избыточности [10], однако по желанию пользователя они могут храниться и передаваться в несжатом виде. Основной функцией модуля является хранение и оптимизация локальной части МИ, а также подготовка его к передаче на управляющий узел после окончания работы основного цикла перебора элементов сетки.

В случае успешного выполнения задачи вычислительным узлом выполняется передача заполненной локальной части МИ на управляющий узел для последующего включения этой части в общий МИ. Стоит отметить, что ввиду большого объема данных этап передачи является наиболее уязвимым, требует быстрого и надежного канала связи.

### **Облачная модель доступа к системе построения и анализа ОР**

Реализация облачной модели доступа к системе построения и анализа ОР обеспечит возможность обращения к ее ресурсам независимо от используемой платформы и типа устройства. Любому пользователю системы доступны задачи построения ОР указанной им модели исследуемого объекта и анализа построенной или уже имеющейся в специальном хранилище области. Главная особенность предложенной модели состоит в возможности задействовать высокопроизводительные средства и технологии для решения задачи, не прибегая к процедурам развертывания системы и поддержки ее корректной работы. Общая схема облачной архитектуры системы построения и анализа ОР представлена на рис. 2.

Человеко-машинный интерфейс представлен веб-узлом системы, на котором пользователю в рамках его полномочий доступны функции управления очередями задач и результатами их выполнения. Основными доступными для запуска задачами являются: построение ОР; анализ ОР.

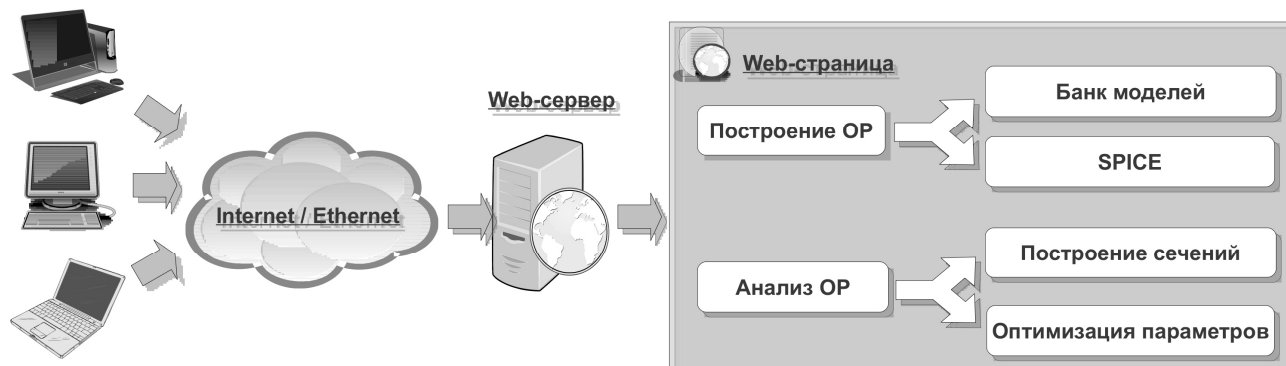


Рис. 2. Схема облачной модели доступа к системе построения ОР.

Задача *построения ОР* на рис. 2 подразумевает ряд действий пользователя для запуска подсистемы построения ОР, архитектура которой была описана выше. Запуск этой задачи требует ввода следующих параметров:

1) модель системы в виде (3). Пользователю предлагается выбор модели из имеющегося банка моделей или загрузку описания электрической цепи в формате SPICE;

2) выходные параметры (2). Для модели из банка выходные параметры фиксированы;

3) условия работоспособности (4) для выходных параметров;

4) список варьируемых параметров элементов (1). На усмотрение пользователя некоторые параметры могут быть зафиксированы;

5) допуски (7) на варьируемые параметры. Для определения границ описанного параллелепипеда с целью сужения области поиска при условии задания всех четырех предыдущих параметров возможен запуск специальной задачи, основанной на методе Монте-Карло [7];

б) количество параллельных процессов, в которых будет выполняться решение задачи. Количество процессов пользователь задает исходя из информации, имеющейся в системе, о доступности и загруженности узлов вычислительного кластера. В случае недоступности вычислительного кластера, невысокой загруженности системы и при наличии полномочий имеется возможность запустить задание на самом сервере.

Запуск задачи построения ОР инициируется пользователем после корректного ввода всех ее параметров. Во время запуска задачи веб-узел передает управление подсистеме построения ОР, архитектура которой была описана выше, а на персональной странице пользователя отображается текущее состояние процесса. Возможность добавления новых задач в очередь и их количество зависит от вычислительных возможностей системы и регулируется администратором.

После выполнения задачи построения ОР пользователь на свое усмотрение может добавить ее в общий банк ОР, привязанных к соответствующим моделям. В противном случае данные ОР сохраняются в пользовательской учетной записи.

*Банк моделей* представляет собой набор программных компонентов, реализующих функционал имитационных моделей, удовлетворяющих виду (3). Эти модели должны соответствовать определенным требованиям совместимости с ис-

пользующим их программным модулем построения ОР и предоставлять единый интерфейс к своим функциям. Наиболее подходящим средством реализации таких моделей является механизм динамически присоединяемых библиотек, имеющийся во всех наиболее распространенных операционных системах. Банк моделей может пополняться пользователями системы.

Использование моделирующей среды стандарта SPICE требует ввода модели электрической цепи в формате этого стандарта. Как правило, это текстовый файл, содержащий описание связанных между собой узлов электрической цепи и составляющих ее элементов.

Задача *анализа ОР* выполняется только для построенной ОР, которую можно выбрать из банка общедоступных ОР либо из собственной учетной записи. Выбор ОР выполняется по следующим характеристикам: название и описание модели; выходные параметры и УР; варьируемые параметры, их допуски и количество шагов сетки.

Если пользователя не удовлетворяют какие-либо характеристики ОР из имеющихся в банке, то он может построить ОР с нужными ему характеристиками. Построение ОР является одним из этапов решения задачи выбора оптимальных значений параметров исследуемых технических объектов. Построенная на основе модели (8) фигура дает возможность оценить чувствительность системы к изменениям любого параметра, выбрать их оптимальные в определенном смысле значения. Для этого необходимы специальные алгоритмы анализа ОР [6].

Функция *анализа ОР* нацелена на решение двух задач.

*Первая задача* – визуализация двух- или одномерных сечений ОР. Эта задача представляет собой графическое отображение сечений множества элементарных параллелепипедов, аппроксимирующих ОР. Для запуска задачи необходимо ввести следующие параметры: свободные координаты для построения сечения; указание значений квантов фиксированных параметров.

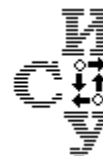
*Вторая задача* – поиск вектора оптимальных значений параметров с использованием детерминированного критерия. Решение задачи выполняется по алгоритму построения вписанного в ОР куба, имеющего максимальный объем [6].

Задачи анализа ОР запускаются на одном процессоре, поскольку визуализация сечений не требует вычислительных затрат, а алгоритм поиска оптимальных параметров по детерминированному критерию обладает низким потенциалом параллелизма.

## Заключение

Работа посвящена проблеме построения и анализа ОР в рамках задачи параметрического синтеза аналоговых технических систем. Рассмотрена модель представления ОР дискретным множеством параллелепипедов на основе многовариантного анализа системы в пространстве значений параметров ее элементов. Предложена архитектура подсистемы построения ОР в рамках облачной модели системы построения и анализа ОР с учетом возможности использования технологии параллельных вычислений. Описаны основные компоненты и их взаимосвязи в рамках описанной архитектуры.





ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О.В.* Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. – 2011. – №2(28). – С. 4-15.
2. *Норенков И.П., Маничев В.Б.* Основы теории и проектирования САПР: Учеб. для вузов по спец. «Вычислительные маш., компл., сест. и сети». – М.: Высш. шк., 1990.
3. *Pharr M., Randima F.* GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation. Addison-Wesley, 2005.
4. *Antonopoulos N., Gillam L.* Cloud Computing: Principles, Systems and Applications. – Springer, 2010.
5. *Абрамов О.В.* Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. – М.: Наука, 1992.
6. *Назаров Д.А.* Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. – 2011. – №2(28). – С. 59-69.
7. *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.
8. *Назаров Д.А.* Использование распределенных вычислений при построении области работоспособности // Информатика и системы управления. – 2008. – №1(15). – С. 142-151.
9. *Kundert K.S., Zinke O.* The Designer's Guide to SPICE & SPECTRE. – Springer, 2004.
10. *Назаров Д.А.* Алгоритмы сжатия данных при построении и использовании областей работоспособности // Международный симпозиум «Надежность и качество»: Сб. науч. тр. – Пенза, 2011. – Т. 1. – С. 250-254.

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

*E-mail:*

*Назаров Дмитрий Анатольевич – [nazardim@iacp.dvo.ru](mailto:nazardim@iacp.dvo.ru).*

УДК 681.5.63

© 2012 г. **А.В. Саушев**, канд. техн. наук

(Санкт–Петербургский государственный университет водных коммуникаций)

## **АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД НАЗНАЧЕНИЯ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассматривается задача назначения допусков на параметры элементов динамических систем. Предложен метод решения задачи, основанный на аппроксимации области работоспособности логическими  $R$ -функциями. Метод характеризуется низкой методической погрешностью.

**Ключевые слова:** область работоспособности, допуск,  $R$ -функции.

### **Введение**

Одной из важнейших задач параметрического синтеза технических систем (ТС), которые рассматриваются как динамические системы, является задача на-