

# МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ<sup>1</sup>

О. В. Абрамов

Рассмотрена проблема синтеза аналоговых технических систем с детерминированной структурой и случайными параметрами. Введено расширенное понятие параметрического синтеза, результатом которого должна быть некоторая стратегия управления параметрами, обеспечивающая требуемые или оптимальные характеристики надежности синтезируемой системы. Обсуждены параллельные алгоритмы решения возникающих при этом задач многовариантного анализа и оптимизации.

## ВВЕДЕНИЕ

В традиционном понимании задача параметрического синтеза сводится к выбору таких значений параметров элементов системы (при заданной ее структуре), при которых выполняются условия работоспособности [1]. Учет возможных отклонений параметров от полученных расчетных значений и разработка мероприятий, обеспечивающих работоспособность системы при наличии таких отклонений, переносятся на последующие этапы проектирования (а иногда на этапы производства и эксплуатации). Такой подход к задаче параметрического синтеза наиболее распространен на практике. Найденный при этом вектор внутренних параметров позволяет говорить только о том, что «номинальный» проект работоспособен.

Отклонения параметров от расчетных (номинальных) значений могут привести к потере работоспособности, поэтому можно попытаться найти в некотором смысле оптимальные значения внутренних параметров (например, которые обеспечивают наибольший запас работоспособности или максимальную вероятность выполнения условий работоспособности).

Выбор оптимальных значений параметров не всегда позволяет создать систему с требуемыми потребительскими свойствами, т. е. обеспечить заданное качество ее функционирования. Определив номинальные значения параметров, при кото-

рых обеспечивается максимальная вероятность безотказной работы объекта в течение определенного промежутка времени  $P_{\max}(T)$ , и сравнив полученное значение с требуемым  $P_{\text{тр}}(T)$ , разработчик не может считать процесс проектирования законченным, если оказалось, что  $P_{\max}(T) < P_{\text{тр}}(T)$ . В этом случае необходимо искать пути дальнейшего улучшения решения. Требуемую гарантию работоспособности можно обеспечить настройкой или регулировкой некоторых параметров. Таким образом, для обеспечения требуемого качества функционирования объекта необходимо выбрать и реализовать некоторую стратегию управления его параметрами.

В дальнейшем будем говорить о *параметрическом синтезе в узком смысле*, понимая под этим определение номинальных значений параметров системы без учета вариаций параметров, и *параметрическом синтезе в широком смысле* (ПСШ), результатом которого является некоторая стратегия управления параметрами системы.

Основное содержание методологии параметрического синтеза в широком смысле составляют ответы на следующие три взаимосвязанных вопроса: какие параметры выбрать в качестве управляемых; когда необходимо осуществлять управление; какие значения должны принять управляемые параметры.

## 1. ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В ШИРОКОМ СМЫСЛЕ

Параметрический синтез начинается с выбора некоторых исходных значений параметров элементов системы  $x_{1\text{ном}}^{(0)}, x_{2\text{ном}}^{(0)}, \dots, x_{n\text{ном}}^{(0)}$ , при кото-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (05-08-013998) и ДВО РАН (Программа № 16 ОЭММПУ РАН).

рых выполняются условия работоспособности. Эти условия задаются обычно в виде ограничений на выходные параметры:

$$A_j \leq y_j(\mathbf{x}, \mathbf{Q}) \leq B_j, \quad j = 1, m. \quad (1)$$

Здесь  $y_j(\mathbf{x}, \mathbf{Q})$  —  $j$ -й выходной параметр, являющийся некоторой функцией внутренних  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$  и внешних  $\mathbf{Q} = (q_1, \dots, q_r)$  параметров;  $A_j$  и  $B_j$  — верхняя и нижняя границы допустимых изменений  $j$ -го выходного параметра (технические требования), задаваемые в техническом задании.

Исходные значения параметров выбираются без учета возможных отклонений параметров от расчетных (необходимые для этого данные еще отсутствуют), и их выбор можно назвать *параметрическим синтезом нулевого уровня*. На этом этапе синтеза вопрос о выборе управляемых параметров не возникает, так как конечным его результатом должны быть номинальные значения всех параметров.

Найдя вектор параметров  $x_{\text{ном}}^{(0)}$ , обеспечивающий выполнение условий работоспособности, можно попытаться улучшить полученное решение путем его коррекции. Параметры можно оптимизировать без привлечения дополнительной информации, если при выбранных значениях параметров в качестве целевой функции принять запас работоспособности или некоторую меру отклонения поведения системы от идеального. Задача будет состоять в выборе такого вектора внутренних параметров  $x_{\text{ном}}^{(1)}$ , что запас работоспособности (отклонение вектора выходных параметров от границ области работоспособности) максимален, или таких параметров, при которых, например, интегральная ошибка, служащая мерой отклонения поведения объекта от желаемого, минимальна. В качестве оптимизируемых (управляемых) параметров выбираются внутренние параметры, которые можно изменять на данном этапе синтеза. В общем виде задача обычно записывается следующим образом:  $\max F(\mathbf{x}, \mathbf{Q}), \mathbf{x} \in D, \mathbf{Q} \in E$ , где целевая функция  $F(\mathbf{x}, \mathbf{Q})$  и функция ограничения — нелинейные функции управляемых параметров;  $D$  — область допустимых изменений внутренних параметров, являющаяся отображением условий работоспособности в пространство внутренних параметров. При оптимизации выбираются либо номинальные значения внешних параметров, либо такие, которые следуют из принципа наилучшего случая.

Выбор оптимальных значений внутренних параметров, осуществляемый без учета производственных и эксплуатационных изменений параметров, будем называть *параметрическим синтезом первого уровня*.

Параметрический синтез первого уровня является шагом вперед по сравнению с параметриче-

ским синтезом нулевого уровня, так как в результате получаем решение, обеспечивающее некоторый запас работоспособности при возможных отклонениях действительных значений параметров от расчетных. Это решение оптимально и вполне оправданно в условиях, когда информация о закономерностях отклонений параметров от расчетных (номинальных) значений полностью отсутствует.

Выбор параметров на этапах параметрического синтеза нулевого или первого уровней позволяет определить режимы работы элементов системы, выбрать их типонамины, классы точности и получить информацию о закономерностях возможных отклонений параметров от расчетных данных. После этого появляется возможность проверить выполнение требований к качеству функционирования с учетом этих отклонений.

Отклонения параметров возникают под влиянием факторов, действующих в процессе производства, хранения и эксплуатации, и имеют случайный характер. Поэтому внутренние параметры следует рассматривать как некоторые случайные функции времени. Следовательно, условия работоспособности могут быть удовлетворены лишь с определенной вероятностью

$$P(T) = P\{X(t) \in D, \forall t \in [0, T]\},$$

где  $X(t)$  — случайный процесс изменения внутренних параметров,  $T$  — заданное время функционирования системы. Выбранные номинальные значения параметров можно рассматривать как компоненты вектора математических ожиданий случайного процесса  $X(t)$  в начальный момент времени  $t = 0$ , т. е.  $x_{\text{ном}}^{(1)} = M[X(0)]$ .

Если при выбранных на предыдущих этапах номинальных значениях внутренних параметров вероятность выполнения условий работоспособности в течение заданного времени  $P(T, x_{\text{ном}}^{(1)})$  окажется ниже требуемой  $P_{\text{тр}}(T)$ , необходимо перейти к *параметрическому синтезу второго уровня*, под которым будем понимать выбор номинальных значений параметров с учетом закономерностей их производственных и эксплуатационных вариаций [2].

Параметрический синтез второго уровня состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров, при которых обеспечивается максимальная гарантия работоспособности (максимальная вероятность безотказной работы в течение заданного времени или максимальная наработка до отказа, а при отсутствии сведений о закономерностях временного дрейфа — максимальная серийнопригодность и др.).

Пространство управляемых параметров совпадает здесь с пространством управляемых параметров параметрического синтеза первого уровня, од-



нако в некоторых случаях для уменьшения трудоемкости расчетов имеет смысл ограничить число оптимизируемых параметров.

Таким образом, параметрический синтез второго уровня представляет собой задачу оптимизации при стохастических критериях. Результатом ее решения являются значения внутренних параметров

$$x_{\text{ном}}^{(2)} = \arg \max P\{X(t) \in D, \forall t \in [0, T]\}, x \in D_y,$$

где  $D_y$  — пространство управляемых параметров. Если при выбранных в процессе параметрического синтеза второго уровня значениях параметров вероятность безотказной работы (или какой-либо другой стохастический критерий) не удовлетворяет предъявляемым требованиям, переходим к параметрическому синтезу следующего уровня.

Повышение вероятности выполнения условий работоспособности может быть достигнуто, если некоторые из внутренних параметров системы сделать настраиваемыми (регулируемыми). Синтез настраиваемых систем будем называть *параметрическим синтезом третьего уровня*. В процессе этого синтеза самостоятельное значение приобретает задача выбора совокупности параметров, с помощью которых наиболее целесообразно осуществлять настройку управляемых параметров и рациональных диапазонов их изменения. После ее решения возникает задача выбора оптимальных значений управляемых параметров, устанавливаемых при настройке.

Задача однократной настройки, решаемая в процессе параметрического синтеза третьего уровня, не всегда обеспечивает необходимое качество синтезируемой системы.

Следующим уровнем параметрического синтеза является синтез системы с многократно корректируемыми параметрами. Назовем его *параметрическим синтезом четвертого уровня*. Его цель — дать ответ на все поставленные выше вопросы, какие параметры, когда и как (на какую величину) надо изменить, чтобы обеспечить заданные требования к качеству функционирования системы (вероятность выполнения работоспособности в течение времени эксплуатации  $T$ , среднюю наработку  $T_{\text{ср}}$  и т. д.).

При параметрическом синтезе четвертого уровня оптимизация параметров осуществляется в целях предупреждения потери работоспособности и носит характер профилактических коррекций [3]. Для настраиваемых систем необходимо выбрать совокупность параметров настройки (регулируемых параметров), определить целесообразные моменты проведения профилактических коррекций (настроек) параметров, дать рекомендации по выбору оптимальных значений корректируемых параметров. Для ненастраиваемых систем необ-

димо назначить сроки профилактических мероприятий (изменений параметров), дать рекомендации по отысканию элементов, подлежащих замене, и определить параметры элементов замены.

На этом уровне синтеза необходимо различать системы первой группы, параметры которых не контролируются в процессе эксплуатации, и второй группы, имеющие средства контроля. Моменты изменения и оптимальные значения управляемых параметров для первой группы систем определяются по априорным сведениям о процессах эксплуатационных изменений параметров и вследствие этого справедливы для всего ансамбля однотипных систем (носят групповой характер), для систем второй группы — определяются на основании априорных данных и результатов контроля параметров конкретной системы. Полученные при этом рекомендации будут справедливы только для конкретной системы, и стратегия управления параметрами в этом случае строго индивидуальна. При этом может возникнуть необходимость определения и целесообразных моментов (сроков) проведения контрольных измерений.

Приведем в общем виде постановки некоторых типовых задач оптимального ПСШ.

1. *Задача оптимального выбора номиналов*. При известных характеристиках  $X(t)$  и заданных  $D$  и  $T$  найти такие неслучайные, корректирующие исходные номиналы, значения  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , при которых

$$P\{(X_1(t) + E_1, X_2(t) + E_2, \dots, X_n(t) + E_n) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P.$$

2. *Задача оптимальной настройки*. При известных характеристиках случайных процессов изменения нерегулируемых  $X_1(t), \dots, X_k(t)$  и регулируемых  $X_{k+1}(t), \dots, X_n(t)$  параметров найти такие  $E_{k+1}, \dots, E_n$ , при которых

$$P\{(X_1(t), \dots, X_k(t), X_{k+1}(t) + E_{k+1}, \dots, X_n(t) + E_n) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P.$$

3. *Задача оптимального планирования профилактик (технического обслуживания)*:

— *априорное планирование профилактик*: при известных характеристиках априорного случайного процесса  $X^{Pr}(t)$ , заданных области допустимых значений параметров  $D$  и времени  $T$  найти такую неслучайную функцию  $E(t)$ , при которой  $P\{(X_1^{Pr}(t) + E_1(t), \dots, X_n^{Pr}(t) + E_n(t)) \in D, \forall t \in [0, T]\} = \max P$  при условии  $C(t) \leq C_0$ , где  $C(t) = \int_0^T C(E(t))dt$  — затраты, связанные с проведе-

нием коррекции параметров (технического обслуживания);  $C_0$  — допустимый уровень затрат;

— *апостериорное (индивидуальное) планирование профилактики*: при известных характеристиках апостериорного случайного процесса  $X^{P_s}(t)$ , получаемого из априорного с учетом результатов контроля, заданных  $D$  и  $T$ , найти такую функцию  $E(t)$ , при которой

$$P\{(X_1^{P_s}(t) + E_1(t), \dots, X_n^{P_s}(t) + E_n(t)) \in D, \\ \forall t \in [0, T]\} = \max P \text{ при } C_1(t) \leq C_0,$$

где  $C_1(t)$  — затраты, связанные с проведением контроля и коррекций параметров.

Анализируя приведенные постановки задач, нетрудно убедиться в их принципиальной общности, причем задачи типа 1 и 2 — частные случаи задачи 3. По своей сути все они относятся к классу задач управления случайными процессами. Их решение должно основываться на результатах прогнозирования процесса дрейфа параметров (технического состояния) и надежности оптимизируемых систем. При разработке методов прогнозирования и управления необходимо учитывать как специфику случайных процессов (они относятся к классу нестационарных и локально управляемых), так и особенности самого управления (импульсная коррекция).

Сложность задач ПСШ не позволяет надеяться на получение аналитических решений. Пригодные для практики аналитические решения удается получить лишь в отдельных простых случаях. Попытки усложнения исходных постановок приводят к результатам, представляющим, в основном, академический интерес и носящим скорее методологический, чем практический характер.

Потребности практики заставляют обратиться к методам численного решения задач ПСШ на базе современных информационных технологий и средств вычислительной техники. В их основе лежат идеи физического и математического моделирования процессов функционирования технических систем, использования параллельных и распределенных моделей вычислений.

И, наконец, одна из наиболее важных и сложных проблем, возникающих при решении задач параметрического синтеза, — априорная неопределенность закономерностей дрейфа параметров объекта, условий эксплуатации, ошибок измерений и контроля. Это заставляет строить методику параметрического синтеза в виде набора («веера») стратегий, позволяющих принимать решения при тех объемах исходной информации, которой пользователь реально может располагать, применяя принципы адаптации, минимакса и робастной статистики.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Основные трудности, возникающие при решении задачи параметрического синтеза технических систем с учетом случайных вариаций их параметров, связаны с высокой вычислительной трудоемкостью возникающих при этом задач многовариантного анализа и оптимизации по стохастическим критериям. На каждом шаге оптимизации возникает необходимость проведения статистического анализа для получения оценки критерия оптимальности. При этом на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло) многократно рассчитывается исследуемая система (устройство) при различных значениях параметров элементов. Число расчетов  $N$ , равное числу реализаций случайного вектора параметров, определяется из условия обеспечения необходимой точности оценки критерия. Для обеспечения удовлетворительной точности оценки необходимо на каждом шаге поиска выполнять полный расчет системы от нескольких сотен до тысяч раз.

Высокая вычислительная трудоемкость решения оптимизационных задач со стохастическим критерием заставляет искать способы достаточно быстрого получения желаемых результатов. В работах [2, 4] были предложены некоторые методы и алгоритмы, упрощающие в известной мере процедуру поиска оптимальных решений в задаче параметрического синтеза. Сравнительный анализ и эксперименты показали, что их применение позволяет сократить время решения задачи в 3—5 раз по сравнению с классическими методами, основанными на прямом методе статистического моделирования.

В последние годы стал активно развиваться достаточно радикальный путь сокращения трудоемкости решения сложных вычислительных задач, в основе которого лежит идея распараллеливания процессов поиска конечного результата. Параллельный подход приводит к самым разнообразным вариантам архитектуры высокопроизводительных вычислительных комплексов. В качестве параллельных вычислителей широко используются открытые системы массового параллелизма, состоящие из стандартных компонентов, в том числе массовых серийных микропроцессоров. Для создания подобных кластерных компьютеров сформировался как рынок аппаратных средств, так и требуемый для распределенной обработки набор программных компонентов, состоящий из некоммерческого свободно распространяемого программного обеспечения. Возникает естественная проблема — как наилучшим образом использовать имеющиеся аппаратные средства для решения конкретной вычислительной задачи.



Реализация задач анализа и оптимизации подразумевает отображение всей вычислительной схемы, включая методы многовариантного детерминированного и статистического анализа, а также оптимизации по стохастическим критериям на параллельную архитектуру кластера, учитывая топологию межпроцессорных связей и обеспечивая правильность взаимодействия множества параллельно выполняющихся независимо друг от друга процессов.

Представим программную среду для решения задач ПСШ в виде набора следующих взаимосвязанных программно-алгоритмических модулей.

- *Модуль ввода описания проектируемой системы в ЭВМ.* При его создании необходимо обеспечить простоту описания для пользователя и простоту перевода описания с языка пользователя на язык ЭВМ.
- *Средства преобразования описания системы в математическую модель.* В их основе — процедуры составления и формирования уравнений, образующих описание процессов функционирования системы.
- *Модуль детерминированного анализа.* Для выбранной структуры (топологии) и заданных значений внутренних параметров  $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$  здесь вычисляются значения выходных параметров системы  $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$ ,  $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$ . Этот этап, по сути, состоит в решении систем уравнений, при этом может возникнуть необходимость выбора метода решения и параметров вычислительного алгоритма (шага интегрирования, параметров останова и т. д.). Поскольку обращение к этому модулю многократно, здесь уместен диалоговый (интерактивный) режим организации вычислительного процесса на стадии настройки и организация параллельного процесса вычислений, что особенно важно для последующих этапов многовариантного детерминированного и статистического анализа, а также оптимизации.
- *Модуль статистического анализа.* Он включает в себя алгоритмические и программные средства генерации случайных процессов изменения внутренних параметров  $X(t)$  и вычисления целевой функции методом статистических испытаний (Монте-Карло). Высокая вычислительная трудоемкость этого метода, а также необходимость многократного вычисления значений целевой функции в процессе поисковой оптимизации вызывает необходимость разработки параллельного аналога метода Монте-Карло. Один из вариантов параллельного алгоритма статистических испытаний приведен в работе [5].
- *Модуль оптимизации.* Он включает в себя набор алгоритмических и программных средств

поиска номинальных значений параметров  $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{n\text{ном}})$ , доставляющих максимум целевой функции.

В процессе проектирования технических объектов наиболее часто встречаются оптимизационные задачи со следующей формулировкой: найти экстремум целевой функции  $\Phi(x)$  в области работоспособности, в которой целевая функция и функции-ограничения являются нелинейными функциями управляемых параметров. Классические методы нахождения экстремумов целевых функций здесь практически не применяются, так как случаи аналитического задания функций в задачах ПСШ крайне редки, а используются обычно математические модели, заданные алгоритмически. В связи с этим определение значений целевых функций, функций-ограничений и их градиентов возможно только алгоритмически путем численного решения систем уравнений и подсчета функционалов. В такой ситуации применяют методы поисковой оптимизации. Распараллеливание этих методов является одним из путей снижения трудоемкости решения задач параметрического синтеза.

Здесь можно применить различные стратегии. Одна из них состоит в применении параллельных аналогов методов случайного поиска, относящихся к методам иерархической оптимизации. В простейших случаях процедура случайного поиска генерирует в некоторой окрестности поисковой переменной ее случайные приращения, вычисляет значение оптимизируемой функции, сравнивает с ее значениями на предыдущем шаге поиска и, в зависимости от результата (приближения или удаления от экстремума), либо повторяет предыдущий шаг, либо генерирует новые случайные приращения поисковой переменной. Далее все повторяется. Здесь случайный поиск можно рассматривать как реализацию простейшего оптимизационного метода «поиск и ошибок».

В более сложных случаях алгоритм метода случайного поиска обладает свойством адаптивности, реализуемым с помощью запоминания как траектории поискового процесса (значений поисковых переменных и целевых функций, а также соответствующих ограничений), так и параметров самого алгоритма (размеры и направления поискового шага и т. п.). Именно это свойство делает его эффективным средством решения сложных экстремальных задач, к числу которых принадлежат и задачи параметрического синтеза.

Другая стратегия заключается в создании параллельных модификаций классических методов поиска (градиентного, квазиньютоновского и др.), положительно зарекомендовавших себя при решении экстремальных задач. В качестве примера можно рассмотреть метод Хука—Дживса. Он состоит из шагов исследующего поиска вокруг базо-

вой точки, за которой в случае успеха следует поиск по образцу. Во время поиска вокруг базовой точки происходит «нащупывание» направления движения в сторону экстремума. При поиске по образцу происходит движение в выбранном направлении, причем оно в некоторых пределах корректируется. Алгоритм Хука—Дживса является последовательным. Распараллеливание здесь основывается на декомпозиции алгоритма и применении схемы «главный—подчиненный», являющейся одной из парадигм параллельного программирования. Главный отвечает за работу алгоритма поиска экстремума, за раздачу заданий подчиненным на этапе декомпозиции. Подчиненный получает от главного пакет с заданием об обработке нескольких точек и поиска такой точки, значение функции в которой экстремально. При использовании схемы «главный—подчиненный» возможна ситуация, когда мастер простаивает, так как объем работ для разных процессоров или локальных станций может быть различным. Это обеспечивает неравномерную загрузку участников вычислений. Поэтому осуществлять ее необходимо динамически по мере освобождения элементов вычислительной системы.

Следующей идеей может стать применение параллельного аналога — метода сканирования (слепого поиска). Наиболее простой алгоритм поиска экстремума методом сканирования (последовательного поиска на сетке переменных) заключается в том, что по каждой независимой переменной задаются приращения в соответствующем порядке, обеспечивающем заполнение всей исследуемой области равномерной и достаточно густой сеткой. Так, для поиска экстремума функции двух переменных сначала при фиксированном значении одной переменной рассчитываются значения функции для всего диапазона изменения второй независимой переменной и фиксируется значение экстремума. Затем первая переменная изменяется на размер заданного шага и расчеты повторяются при варьировании второй переменной и т. д. Для произвольного числа переменных шаг по следующей переменной производится после завершения цикла по предыдущей.

Основное достоинство метода сканирования при достаточно густом расположении точек — всегда гарантируется отыскание глобального экстремума. Однако для этого требуется значительный объем вычислений, снизить который можно путем распараллеливания алгоритма либо распределения вычислений по станциям локальной вычислительной сети. Для поиска экстремума каждым подчиненным процессором или станцией локальной вычислительной сети производится расчет значений целевой функции для заданного заранее подмножества проверяемых точек и фик-

сируется значение экстремума для своей группы точек. Главный процессор или станция запоминает переданные значения. Для обеспечения такой возможности должна быть образована локальная база поисковых данных для своевременного пополнения результатами вычислений. На конечном этапе из поисковой базы данных выбирается экстремальное значение целевой функции.

При данном параллельном алгоритме время вычислений по сравнению с последовательным методом существенно сокращается. Важный момент предлагаемого алгоритма состоит в том, что процессоры и станции локальной сети могут быть как однотипными, так и отличающимися друг от друга по своим вычислительным характеристикам. Как результат, выполнение испытаний на процессорах не синхронизируется, и выполнение итераций глобального поиска на каждом процессоре может выполняться в произвольном темпе. Такая схема повышает надежность вычислений, устраняется возможность блокировки системы. Более того, при таком подходе можно сохранить возможность продолжения вычислений даже при выходе из строя одного или нескольких процессоров или станций локальной сети.

**В заключение** отметим, что применение технологии параллельных вычислений еще не гарантирует получение результата в приемлемое время. Могут возникнуть ситуации, например, при решении задачи поиска экстремума методом сканирования (полного перебора), когда число вариантов становится слишком велико. Необходим поиск путей, позволяющих повысить эффективность алгоритмов многовариантного анализа и оптимизации. Так, одним из универсальных средств ускорения перебора является быстрое отсеечение ложных (или вероятно ложных) ветвей перебора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления* / Под ред. А. А. Воронова, И. А. Огурка. — М.: Наука, 1984.
2. *Абрамов О. В.* Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности. — М.: Наука, 1992.
3. *Абрамов О. В., Бернацкий Ф. И., Здор В. В.* Параметрическая коррекция систем управления. — М.: Энергоиздат, 1982.
4. *Абрамов О. В., Катыева Я. В., Супоня А. А.* Эффективные методы параметрической оптимизации по стохастическим критериям // Тр. Междунар. конф. по проблемам управления / Фонд Проблемы управления. — М., 1999. — Т. 2. — С. 130—132.
5. *Абрамов О. В., Катыева Я. В.* Технология параллельных вычислений в задачах анализа и оптимизации // Проблемы управления. — 2003. — № 4. — С. 11—15.

☎ (4232) 31-02-02

e-mail: [abramov@iacp.dvo.ru](mailto:abramov@iacp.dvo.ru)

