

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

## FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 681.5.015.63:62-192  
doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

### О ВЫБОРЕ СТРАТЕГИИ ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА В САПР

**О. В. Абрамов**

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Владивосток, Россия  
abramov@iacp.dvo.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены некоторые методологические проблемы принятия проектных решений, возникающие в процессе оптимального параметрического синтеза аналоговых технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности. *Материалы и методы.* Обсуждаются основные особенности оптимизационных задач, возникающих в процессе параметрического синтеза. *Результаты и выводы.* Полученные результаты могут быть полезны при разработке алгоритмов параметрического синтеза, основанных на технологии параллельных вычислений.

**Ключевые слова:** технические устройства и системы, параметрический синтез, параллельный алгоритм, параметр, надежность, оптимизация

**Для цитирования:** Абрамов О. В. О выборе стратегии оптимального параметрического синтеза в САПР // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 5–12. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

### ON THE CHOICE OF AN OPTIMAL PARAMETRIC SYNTHESIS STRATEGY IN CAD

**O.V. Abramov**

Institute for Automation and Control processes,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia  
abramov@iacp.dvo.ru

**Abstract.** *Background.* Some methodological problems of making design decisions that arise in the process of optimal parametric synthesis of analog technical devices and systems, taking into account the stochastic laws of changing their parameters and reliability requirements, are considered. *Materials and methods.* The main features of optimization problems arising in the process of parametric synthesis are discussed. *Results and conclusions.* The results obtained can be useful in the development of parametric synthesis algorithms based on the technology of parallel computations.

**Keywords:** engineering devices and systems, parametric synthesis, parallel algorithm, parameter, reliability, optimization

**For citation:** Abramov O.V. On the choice of an optimal parametric synthesis strategy in CAD. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:5–12. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-1

### Введение

Быстрое развитие алгоритмических и программных средств САПР сопровождается ускоренным распространением новых электронных форм проектирования, основанных на компьютерном моделировании и анализе. Такое виртуальное проектирование завоевывает все больше позиций у традиционного проектирования, снижая затратность и повышая производительность и качество проектирования [1]. Компьютерные модели и электронные прототипы изделий прочно вошли в практику САПР. Вместе с тем автоматизированное проектирование достигло наибольших успехов в основном в рутинных задачах разработки чертежной документации и в так называемых инженерных расчетах, где требуется высокая производительность стандартных вычислений. Значительно слабее достижения там, где принятие проектных решений связано с необходимостью многовариантного анализа и оптимизации. В частности, это относится к проблеме оптимального проектирования технических систем с учетом параметрических возмущений и требований надежности. Одной из важных задач схемотехнического проектирования является задача оптимального параметрического синтеза.

В общем виде задача оптимального параметрического синтеза технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности (параметрического синтеза в широком смысле) состоит в поиске таких начальных (номинальных) значений параметров элементов системы (внутренних параметров), при которых обеспечивается максимальная вероятность выполнения условий работоспособности в течение заданного времени эксплуатации. При этом предполагается, что структура (топология) проектируемой системы и ее тематическая модель известны [2, 3].

Функции, описывающие проектируемую систему, обычно имеют сложный нелинейный характер, что не позволяет получить оптимальное решение в аналитической форме с помощью классических методов дифференциального и вариационного исчисления. Для решения задачи оптимального параметрического синтеза (ОПС) приходится использовать алгоритмические поисковые методы.

Сложность решения задачи ОПС связана с высокой трудоемкостью алгоритмов ее решения, а также во многих случаях с дефицитом достоверной информации о закономерностях случайных процессов вариации параметров объекта синтеза. В этих условиях хотелось бы по возможности упростить процесс поиска конечного результата путем отказа от мало значимых действий, имеющих сомнительную практическую полезность. Эффективность стратегии решения задачи ОПС во многом будет зависеть от полноты учета специфики решаемой оптимизационной задачи. Остановимся на некоторых особенностях, возникающих в процессе ОПС оптимизационных задач.

### Оптимизация по стохастическим критериям

Общая постановка задачи оптимального параметрического синтеза имеет следующий вид [2–4]. Найти номинальные значения внутренних параметров исследуемой системы  $\mathbf{x}_{\text{ном}} = (x_{1\text{ном}}, \dots, x_{l\text{ном}})$ , обеспечивающие максимум вероятности ее безотказной работы (ВБР) в течение заданного времени:

$$\mathbf{x}_{\text{ном}}^0 = \arg \max P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t)$  – случайный процесс изменения параметров;  $D_x$  – область работоспособности;  $T$  – заданное время эксплуатации системы.

Область допустимых вариаций внутренних параметров  $D_x$ , как правило, неизвестна, а условия работоспособности обычно задаются системой неравенств:

$$a_j \leq y_j(\mathbf{x}) \leq b_j, \dots, j = 1, m, \quad (2)$$

где  $\mathbf{y} = \{y_j\}_{j=1}^m$  – вектор выходных параметров системы, причем  $y_j = F_j(x_1, \dots, x_n)$ , а  $F_j(\bullet)$  – известный оператор, зависящий от топологии исследуемой системы.

В качестве количественного показателя надежности принимается вероятность

$$P(\mathbf{Y}(t) \in D_y, \forall t \in [0, T]), \quad (3)$$

где  $\mathbf{Y}(t)$  – случайный процесс изменения выходных параметров системы, а  $D_y$  – область допустимых изменений выходных параметров, которая чаще всего задается системой неравенств (2), а значит, имеет форму  $m$ -мерного гиперпараллелепипеда.

Таким образом, целевая функция  $P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) = P\{\mathbf{X}(\mathbf{x}_{\text{ном}}, t) \in D_x, \forall t \in [0, T]\}$  как вероятность является функцией непрерывной и ограниченной  $P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \in [0, 1]$ . То же самое можно сказать и о критерии вида (3).

Задачу ОПС в виде (1) можно рассматривать как задачу математического программирования с ограничениями [5]. Ее особенностями являются многомерность, стохастичность, нелинейность и в общем случае невыпуклость.

Часто задача параметрического синтеза состоит не в поиске номиналов параметров, при которых достигается максимум вероятности безотказной работы, а в обеспечении ВБР не ниже требуемой:

$$P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \geq P_{\text{тр}}.$$

В этом случае, прежде всего, возникает вопрос о достижимости необходимого уровня ВБР при выбранной структуре объекта проектирования. Расчет предельных возможностей целесообразно производить, если при этом трудоемкость вычислительного процесса будет существенно меньше трудоемкости решения задачи (1).

Необходимо заметить, что требуемый уровень ВБР обычно достаточно высок (по крайней мере, существенно больше 0,5), а также тот факт, что

$$P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, T) \leq P_0, \quad (4)$$

где  $P_0 = P(\mathbf{x}_{\text{ном}}, 0)$  – вероятность выполнения условий работоспособности в момент времени  $t = 0$ , которую называют обычно серийнопригодностью или выходом годных.

Соотношение (4) следует из того факта, что случайное событие, состоящее в выполнении условий работоспособности в течение интервала времени  $[0, T]$ , является произведением двух событий, первое из которых – нахождение системы в работоспособном состоянии в начальный момент времени  $t = 0$ , а второе – выполнение условий работоспособности непрерывно в течение времени эксплуатации  $T$ . С учетом этого в качестве первого этапа процесса поиска экстремума ВБР целесообразно провести поиск максимума вероятности выполнения условий работоспособности в момент времени  $t = 0$ , что существенно проще решения задачи (1). Действительно, для расчета серийнопригодности приходится оперировать случайными величинами, а не случайными процессами, и, кроме того, при этом иногда удается заменить исходную задачу со стохастическим критерием оптимальности эквивалентной задачей с детерминированным критерием. Так, например, для выпуклых областей работоспособности и симметричной относительно математического ожидания функции распределения плотности вероятности параметров задача сводится к поиску центра тяжести области работоспособности  $D_x$  [6].

Переходить ко второму этапу следует лишь в том случае, если достижимый уровень серийнопригодности будет больше требуемого значения ВБР. В противном случае необходимо вернуться к этапу структурного синтеза. Например, выбрать структуру проектируемого объекта с элементами настройки [7].

### Оптимальный параметрический синтез в условиях неопределенности

Часто необходимая априорная информация о вероятностных свойствах отклонений параметров от расчетных значений отсутствует или является недостаточно полной. Это объясняется тем, что ее получение связано с необходимостью проведения длительных и дорогостоящих испытаний большого числа однотипных элементов, а также быстрым старением этой информации. Возникает необходимость решения задачи ОПС в условиях неполноты и недостаточной достоверности исходной информации, т.е. в условиях неопределенности. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся при этом ситуации:

– Известен только начальный разброс параметров (закон распределения вектора  $\mathbf{X}_0$ ), который определяется технологическими (производственными) факторами. В этом случае задача (1) имеет вид

$$\mathbf{x}_{\text{ном}} = \arg \max P\{\mathbf{X}_0(\mathbf{x}_{\text{ном}}) \in D_x, t = 0\}. \quad (5)$$

Она является частным случаем общей задачи ОПС и носит название задачи оптимизации выхода годных (серийнопригодности).

– Известны только числовые характеристики (моменты распределения) случайных величин, входящих в модели процессов изменения параметров. Обычно это математические ожидания и дисперсии самих параметров, коэффициентов старения, температурных коэффициентов и др.

– Отклонения параметров и коэффициентов выбранной модели отклонения параметров заданы интервально (в виде пределов возможных вариаций).

– Информация о закономерностях изменений параметров элементов системы, а следовательно, и изменениях выходных параметров полностью отсутствует.

Стратегию поиска оптимальных значений номиналов параметров в условиях неопределенности целесообразно строить в виде набора (веера) методов и алгоритмов решения отдельных задач ОПС, адекватных имеющейся априорной информации о параметрических возмущениях. При этом для каждой отдельной ситуации оптимальным можно считать результат, обеспечивающий гарантированный уровень работоспособности, максимальный при имеющемся объеме исходной информации. Другими словами, оптимальность в условиях неопределенности будем понимать в минимаксном смысле, т.е. с точки зрения получения наилучшего результата при наиболее неблагоприятных (из множества допустимых) параметрических возмущениях.

Следует обратить внимание на еще одну особенность решения задачи ОПС. Чтобы получить какую-то информацию о возможных вариациях параметров проектируемой системы, необходимо знать типонамины элементов этой системы (для электрорадиоэлементов это тип элемента, номинальные значения его параметров, класс точности, номинальная мощность или напряжение). Выбор типонаминов может быть осуществлен на основе интуиции и опыта разработчика, по прототипам или в результате каких-то расчетов. При этом необходимо, чтобы при выбранных номиналах параметров выполнялись условия работоспособности (номинальная точка принадлежала области работоспособности  $D_x$ ).

Как отмечалось выше, условия работоспособности задаются обычно требованиями технического задания в виде ограничений (2) на выходные параметры. Любая комбинация параметров элементов (внутренних параметров) однозначно определяет некоторую совокупность значений выходных параметров и таким образом точку в пространстве выходных параметров. Совокупность параметров элементов представляет допустимое решение, если соответствующая точка пространства выходных параметров лежит в многомерном полиэдре, задаваемом ограничениями на выходные параметры.

При поиске допустимого решения необходимо учитывать параметры рабочих условий. Желательно установить номинальные значения параметров элементов так, чтобы допустимое решение получалось при любой комбинации параметров рабочих условий (например, температуры). Поэтому можно считать, что каждый параметр рабочих условий принимает либо свое номинальное значение, либо одно из крайних значений. Система же исследуется в своих рабочих состояниях, образованных всеми возможными комбинациями этих пар.

Определенной характеристикой возможности системы выполнять заданные функции в условиях параметрических возмущений является область работоспособности  $D_x$ , построенная в координатах параметров схемных элементов системы [8]. Совокупность значений внутренних параметров может быть представлена изображающей точкой в  $n$ -мерном пространстве этих параметров. Для обеспечения работоспособности системы эта точка должна находиться внутри области  $D_x$ . При этом расстояние от изображающей точки до границ  $D_x$  можно рассматривать как некоторый запас работоспособности системы.

Запас работоспособности можно рассматривать на уровне внутренних параметров (параметров элементов) или выходных параметров системы.

Запас работоспособности первого типа – на уровне внутренних параметров – позволяет оценить степень удаленности вектора внутренних параметров от границ области работоспособности, а следовательно, пределы возможных вариаций параметров элементов, при которых не нарушаются условия работоспособности. Задача оптимального параметрического синтеза в этом случае сводится к нахождению такой точки внутри области работоспособности  $D_x$  (выбора такого вектора номиналов параметров), которая находится на максимальном в смысле выбранного критерия расстоянии от ее границ [9].

Если область работоспособности  $D_x$  неизвестна, то выполнение условий работоспособности при выбранных внутренних параметрах проверяется в результате вычисления соответствующих выходных параметров и сравнения их с требованиями технического задания (областью допустимых значений выходных параметров  $D_y$ ).

Можно говорить о запасе работоспособности второго типа, представляющем собой меру удаленности вектора выходных параметров  $y = (y_1(\mathbf{x}), y_2(\mathbf{x}), \dots, y_m(\mathbf{x}))$  от заданных требованиями технического задания границ области  $D_y$ .

Поскольку задача параметрического синтеза состоит в выборе номинальных значений внутренних параметров, будем называть выбор значений параметров по критерию запаса работоспособности первого типа прямой задачей, а выбор по критерию запаса работоспособности второго типа – обратной.

Любая комбинация внутренних параметров  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  однозначно определяет некоторую совокупность выходных величин  $y = (y_1(\mathbf{x}), y_2(\mathbf{x}), \dots, y_m(\mathbf{x}))$  и, таким образом, некоторую точку  $y \in R^m$  в  $m$ -мерном пространстве выходных параметров. При этом обратное отображение не всегда является однозначным: одному и тому же набору значений выходных параметров могут соответствовать несколько различных векторов внутренних параметров.

### Технология параллельных вычислений в задачах параметрического синтеза

Стохастический характер критерия оптимальности, многомерность пространства поиска, необходимость решения задачи глобальной оптимизации заставляют искать пути создания эффективных численных методов решения задач ОПС. В целях сокращения вычислительных затрат при решении задач ОПС целесообразно использовать алгоритмы предварительного анализа данных, понижения размерности пространства поиска, ландшафтного анализа целевой функции и др.

Одним из наиболее радикальных путей решения задач высокой вычислительной сложности является распараллеливание процесса поиска решения с использованием вычислительных кластеров, систем на основе графических процессорных устройств, локальных вычислительных сетей и т.д.

Можно предложить несколько вариантов стратегии ОПС с использованием технологии параллельных и распределенных вычислений.

В основе первой из стратегий лежит идея создания параллельных методов расчета целевой функции и методов оптимизации.

Параллельный алгоритм расчета (оценки) ВБР является модификацией метода статистических испытаний (Монте-Карло). С помощью специальной подпрограммы-генератора моделируются реализации случайного процесса изменения параметров исследуемой технической системы. Для каждой из реализаций производится проверка выполнения условий работоспособности в течение заданного времени  $T$ . Число моделируемых реализаций определяется необходимой точностью оценки вероятности безотказной работы [10].

Создание и реализация параллельного аналога метода статистических испытаний не вызывают принципиальных затруднений. Использование параллельных вычислений в этом методе является вполне логичным, поскольку идея параллелизма – повторения некоторого типового процесса с различными наборами данных – заложена в самой структуре метода. Интуитивно понятно, что использование  $k$  независимых процессоров и распределение между ними независимых испытаний уменьшит трудоемкость статистического моделирования почти в  $k$  раз, поскольку затраты на заключительное суммирование и осреднение результатов практически незначительны [10].

Дальнейшее уменьшение времени решения задачи ОПС может быть достигнуто за счет распараллеливания алгоритма поиска экстремума.

Простейшим из прямых методов поиска, обладающих свойством потенциального параллелизма, является метод сканирования.

Сущность метода заключается в том, что область поиска разбивается на элементарные ячейки, в каждой из которых по определенному алгоритму выбирается точка: в центре ячейки, на ребрах или вершинах. В каждой ячейке осуществляется последовательный просмотр значений целевой функции и нахождение среди них экстремального значения. Точность метода, естественно, определяется тем, насколько плотно располагаются выбранные точки в области поиска.

Основным достоинством метода сканирования является то, что при его использовании с достаточно густым расположением точек всегда гарантируется отыскание глобального экстремума. Однако для этого в данном методе требуется значительный объем вычислений, снизить который можно путем распараллеливания алгоритма [11].

В задачах ОПС выборочное множество номиналов в большинстве случаев является само по себе дискретным. Это связано с тем, что номиналы параметров большинства типовых электро-

радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, операционных усилителей и др.) регламентированы техническими условиями или стандартами. Для активных элементов разработчик на основе опыта и интуиции обычно может задать возможные варианты используемых элементов, а следовательно, и номинальные значения их параметров. В тех же довольно редких случаях, когда имеется возможность выбирать номинальные значения параметров из непрерывного диапазона, можно использовать процедуру дискретизации. Таким образом, в большинстве случаев можно считать, что выборочное множество номиналов при решении задач ОПС является дискретным.

В простейшем случае поиск решения сводится к полному перебору элементов множества возможных значений номиналов внутренних параметров  $D_n^{\text{BH}}$ , в каждой точке  $x_n^{\text{BH}}$  которого необходимо найти значение целевой функции.

Учитывая цикличность процедуры вычисления целевой функции, несложно применить параллелизм по данным.

Пусть процесс решения можно осуществить с использованием  $k$  процессоров. Множество  $D_n^{\text{BH}}$  разбивается на непересекающиеся подмножества  $D_n^{\text{BH}} = \bigcup_{i=1}^k \{D_n^{\text{BH}}\}_i$ , при этом каждому  $j$ -му процессору назначается свое подмножество  $D_n^{\text{BH}}\ j$  исходных данных. Таким образом, каждый  $j$ -й процессор осуществляет расчет целевой функции для всех элементов множества  $D_n^{\text{BH}}\ j$  и находит оптимальный вектор номиналов параметров для своей подобласти. Результаты передаются главному процессору, который производит выбор оптимального вектора номиналов по всей области  $D_n^{\text{BH}}$ . Такое разбиение всего множества поиска на непересекающиеся подмножества составляет суть блока диспетчеризации параллельного распределенного процесса.

Для симметричного вычислительного кластера, состоящего из  $k$  равных по мощности вычислительных узлов, общее число точек разбивается на равные количества для каждого из подчиненных процессов. В случае несимметричного кластера необходимо провести предварительную процедуру оценки трудоемкости типовой процедуры метода оптимизации, в качестве которой выступает однократное моделирование работы системы, проверка условий работоспособности и вычисление значений критерия оптимальности. При этом вычислительная нагрузка делится между компонентами комплекса пропорционально их производительности.

По окончании работы программы диспетчеризации вычислительного процесса каждому вычислительному компоненту комплекса рассылаются границы его подмножества  $D_n^{\text{BH}}\ j$  исходных данных. По окончании счета главный процессор получает результаты от подчиненных и проводит формирование окончательных результатов дискретной оптимизации на всем множестве  $D_n^{\text{BH}}$ .

Другая возможная стратегия ОПС основана на построении и использовании области допустимых значений внутренних параметров (области работоспособности)  $D_x$ .

Привлекательность этой стратегии в определенной мере связана с возможностью декомпозиции общей задачи ОПС на две подзадачи.

Первая из них состоит в построении, анализе и аппроксимации области  $D_x$ . Это задача высокой вычислительной трудоемкости, поскольку ее решение связано с необходимостью многократного вычисления значений выходных параметров системы.

Вторая подзадача включает вычисление целевой функции и нахождение оптимальных значений номиналов параметров. Получение решений в этом случае не связано с необходимостью обращения к модели исследуемой системы, что значительно уменьшает трудоемкость параметрического синтеза.

Таким образом, стратегия ОПС в этом случае будет состоять из двух этапов, первый из которых связан с построением области допустимых вариаций параметров  $D_x$ . Для ее решения разработан ориентированный на использование технологии параллельных (распределенных) вычислений программно-алгоритмический комплекс СНИОР [12].

На втором этапе осуществляется поиск оптимальных решений. При известной области работоспособности трудоемкость вычисления значений целевой функции и поиска экстремума существенно уменьшается. Теперь при проведении статистических испытаний нет необходимости вычислять значения выходных параметров проектируемого объекта (обращаться к модулю детерминированного анализа).

Кроме того, существенное сокращение вычислительных затрат может быть достигнуто путем использования области  $D_x$  для параллельных аналогов методов поисковой оптимизации. Таким образом, при использовании стратегии ОПС, основанной на построении областей работоспособности, решение поставленной задачи осуществляется в два этапа, первый из которых можно считать подготовительным (построение области  $D_x$ ), а второй – основным.

Заметим, что метод сканирования требует не всегда оправданно высоких вычислительных затрат. К числу методов, обладающих свойством потенциального параллелизма и зачастую более эффективных, можно отнести методы случайного поиска и эвристические методы роевого интеллекта [13].

### Заключение

В данной статье рассмотрены некоторые методологические проблемы принятия проектных решений, возникающие в процессе оптимального параметрического синтеза аналоговых технических устройств и систем с учетом стохастических закономерностей изменения их параметров и требований надежности.

Показано, что начинать решение задачи параметрического синтеза сразу в общем виде (1) не целесообразно, даже если имеется вся необходимая для этого информация. Прежде всего, необходимо убедиться, что множество значений внутренних параметров  $D_x$ , при которых выполняются условия работоспособности (2), заданные техническим заданием, не пусто.

Может оказаться, что область работоспособности  $D_x$  очень мала вследствие неудачно выбранной структуры системы. В этой связи было бы полезно оценить размеры области  $D_x$ , а точнее определить пределы возможных вариаций параметров, при которых сохраняется работоспособность системы.

Возникает задача оценки запаса работоспособности по каждому из внутренних параметров и выбора таких значений номиналов параметров, при которых обеспечивается максимальный запас работоспособности по «наихудшему» из внутренних параметров.

На следующем этапе целесообразно оценить предельные возможности выбранной структуры системы с точки зрения выполнения условий работоспособности при учете закономерностей стохастических вариаций параметров. Если вероятность выполнения условий работоспособности в начальный момент времени оказывается достаточно высокой (приемлемой), можно приступить к решению наиболее трудоемкой задачи оптимального параметрического синтеза вида (1). Такая последовательность решения различных модификаций задач ОПС по принципу «от простого к сложному» является, на наш взгляд, наиболее продуктивной и оправданной.

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН (<https://cc.dvo.ru>).

### Список литературы

1. Макаров И. М., Ахрем А. А., Рахманкулов В. З. Виртуальное проектирование и принятие проектных решений // Академик И. М. Макаров и его научная школа. М. : Наука, 2007. С. 240–258.
2. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Е. Баумана, 2002. 336 с.
3. Абрамов О. В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем // Проблемы управления. 2006. № 4. С. 3–8.
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability Design in Gradual Failures: A Functional-Parametric Approach // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, no. 4. P. 39–48.
5. Абрамов О. В. Параметрическая надежность: расчет и оптимизация // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2008. Т. I. С. 23–26.
6. Васильев Б. В., Козлов Б. А., Ткаченко Л. Г. Надежность и эффективность радиоэлектронных устройств. М. : Советское радио, 1964.
7. Абрамов О. В. Проектирование технических систем с элементами настройки // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 51–55.
8. Abramov O., Nazarov D. Regions of Acceptability Approximation in Reliability Design // Reliability: Theory & Applications. 2012. Vol. 7, no. 3. P. 43–49.
9. Абрамов О. В. Алгоритм оценки и прогнозирования остаточного ресурса сложных технических систем // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. I. С. 5–6.

10. Абрамов О. В. Эффективный метод статистического моделирования в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. 2008. № 1. С. 12–16.
11. Абрамов О. В., Катueva Я. В. Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации параметрической надежности // Надежность. 2005. № 4. С. 19–26.
12. 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.
13. Абрамов О. В., Лагунова А. Д. Об использовании эвристических алгоритмов в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. 2021. № 2. С. 34–46.

### References

1. Makarov I.M., Akhrem A.A., Rakhmankulov V.Z. Virtual design and project decision-making. *Akademik I.M. Makarov i ego nauchnaya shkola = Academician I. M. Makarov and his scientific school*. Moscow: Nauka, 2007:240–258. (In Russ.)
2. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya = Fundamentals of computer-aided design*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2002:336. (In Russ.)
3. Abramov O.V. Methods and algorithms of parametric synthesis of stochastic systems. *Problemy upravleniya = Management problems*. 2006;(4):3–8. (In Russ.)
4. Abramov O., Dimitrov B. Reliability Design in Gradual Failures: A Functional-Parametric Approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
5. Abramov O.V. Parametric reliability: calculation and optimization. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2008;I:23–26. (In Russ.)
6. Vasil'ev B.V., Kozlov B.A., Tkachenko L.G. *Nadezhnost' i effektivnost' radioelektronnykh ustroystv = Reliability and efficiency of radio-electronic devices*. Moscow: Sovetskoe radio, 1964. (In Russ.)
7. Abramov O.V. Design of technical systems with configuration elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):51–55. (In Russ.)
8. Abramov O., Nazarov D. Regions of Acceptability Approximation in Reliability Design. *Reliability: Theory & Applications*. 2012;7(3):43–49.
9. Abramov O.V. Algorithm for estimating and predicting the remaining resource of complex technical systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013;I:5–6. (In Russ.)
10. Abramov O.V. An effective method of statistical modeling in optimal parametric synthesis problems. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer Science and control systems*. 2008;(1):12–16. (In Russ.)
11. Abramov O.V., Katueva Ya.V. Parallel algorithms for analysis and optimization of parametric reliability. *Nadezhnost' = Reliability*. 2005;(4):19–26. (In Russ.)
12. Abramov O.V., Nazarov D.A. Software and algorithmic complex for the construction, analysis and use of performance areas. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy = Information technologies and computer systems*. 2015;(2):3–13. (In Russ.)
13. Abramov O.V., Lagunova A.D. On the use of heuristic algorithms in optimal parametric synthesis problems. *Informatika i sistemy upravleniya = Computer science and control systems*. 2021;(2):34–46. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий лабораторией управления  
надежностью сложных систем,  
Институт автоматизации и процессов управления  
Дальневосточного отделения  
Российской академии наук  
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)  
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

#### Oleg V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,  
honored scientist of the Russian Federation,  
head of the laboratory reliability of complex systems,  
Institute for Automation and Control processes,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 11.03.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 30.03.2021**

**Принята к публикации/Accepted 31.03.2021**