УДК 681.5

© 2021 г. Г.Б. Диго,

Н.Б. Диго

(Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ПРОБЛЕМЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Рассматривается проблема схемотехнического проектирования аналоговых технических устройств и систем с учетом случайных процессов изменения их параметров и требований надежности. Для ее решения привлекается функционально-параметрический подход, основанный на компьютерном моделировании процессов функционирования исследуемых систем и изменении их параметров, методы оптимального параметрического синтеза по критериям надежности. Обсуждаются трудности, обусловленные дефицитом информации о закономерностях случайных процессов изменения параметров, отсутствием или недостатком информации о возмущающих воздействиях, влиянием внешних факторов на протекающие в них процессы. Анализируются возможность применения алгоритмов поисковой оптимизации, допускающих распараллеливание вычислительных процессов, и возможность использования эволюционных вычислений при вероятностном характере критерия оптимальности, нелинейности целевой функции и ограничений на нее.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, оптимальный параметрический синтез, многовариантный анализ, условия неопределенности, поисковая оптимизация, технология параллельных вычислений, эволюционные алгоритмы.

DOI: 10.22250/isu.2021.69.75-88

Введение

Одна из основополагающих задач современных систем автоматизированного проектирования (САПР) – проектирование сложных систем, решение которых рассматривается как совокупность положений и принципов, использующих элементы интеллектуализации и основанных на эволюционных

алгоритмах, обеспечивающих структурный и параметрический синтез при неполной информации [1, 2].

Сложные реальные системы, к которым относятся и радиоэлектронные устройства (РЭУ), отличаются неопределенностью или неполной информацией, осложненной влиянием случайных факторов, наличием большого числа параметров, множеством связей между элементами и разнообразными нелинейными ограничениями. Это особенно ощутимо при учете стохастических закономерностей изменения параметров проектируемых устройств и требований надежности, поскольку к необходимости моделирования динамических и часто нелинейных систем добавляются моделирование случайных процессов изменения их параметров, статистическое моделирование и оптимизация, осуществляемая по вероятностным (стохастическим) критериям. В связи с этим при создании и использовании САПР одна из основных проблем заключается в высокой вычислительной трудоемкости задач моделирования, многовариантного анализа и оптимизации. Ее преодолению может способствовать вычислительная поддержка, обеспечивающая достижение максимальной эффективности при решении поставленных задач за счет распараллеливания и планирования вычислений.

Несмотря на постоянное развитие и совершенствование инструментальных средств автоматизированного проектирования РЭУ, практически отсутствуют примеры их успешного использования при проектировании достаточно сложных радиоэлектронных схем, особенно при оптимальном проектировании по критериям надежности. Вместе с тем в последние годы достаточно успешно развивается такой путь повышения эффективности решения задач высокой вычислительной сложности как применение технологии параллельных и распределенных вычислений. На основе этого весьма интересным и перспективным представляются САПР, ориентированные на такую технологию.

В статье рассматриваются задачи, возникающие при разработке модификации САПР РЭУ параллельного (распределенного) типа, и анализируются возможные пути их решения. В качестве проблемной области выбран оптимальный параметрический синтез аналоговых схем РЭУ, учитывающий случайность процессов изменения их параметров и требований надежности.

Основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств

Процесс проектирования РЭУ делится на четыре этапа [3]: системотехническое проектирование, схемотехническое (функциональное) проекти-

рование, техническое проектирование (конструирование), технологическая подготовка производства.

Схемотехническое проектирование, как и остальные этапы, сводится к формированию описаний проектируемого РЭУ и включает отдельные проектные процедуры, реализуемые с помощью пакетов прикладных программ автоматизированного проектирования и заканчивающиеся частным проектным решением. Такими проектными процедурами являются анализ и синтез.

Процедура синтеза состоит в создании проектного решения (описания) по заданным требованиям, свойствам и ограничениям. При этом проектирование рассматривается как последовательное решение двух задач: выбора структурной схемы (структурный синтез) и определения параметров ее элементов, обеспечивающих требуемые характеристики (параметрический синтез).

Процедура анализа состоит в определении свойств заданного описания РЭУ и позволяет оценить степень соответствия проектного решения заданным требованиям и его пригодность.

Основу процесса проектирования составляет последовательность решения задач синтеза, анализа и принятия решений. Он носит итерационный характер и состоит из нескольких этапов: синтезируется исходный вариант, подбирается математическая модель с выбранными исходными параметрами элементов. После этого проводятся расчет выходных параметров и анализ работоспособности выбранного варианта проектируемого объекта. При получении приемлемой степени выполнения условий работоспособности синтезируемый вариант считается на данном этапе проектирования окончательным. Если удовлетворительный вариант не получен, ищут пути дальнейшего улучшения объекта.

Связь между процедурами синтеза и анализа осуществляется проектной процедурой оптимизации, приводящей по определенному критерию к приемлемому или оптимальному проектному решению. Она заключается в многократном анализе при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам. В сущности, оптимизация обеспечивает создание или синтез проектного решения с поэтапным анализом или оценкой характеристик. Это связано с тем, что может потребоваться коррекция принципиальных схем, структуры системы и даже исходных данных. Поэтому процесс проектирования является не только многоэтапным, но и многократно корректируемым по мере его выполнения.

В связи с все возрастающей сложностью РЭУ, повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоемкими, а ко-

личество вариантов, целесообразных для рассмотрения, увеличивается. Это вызывает интенсивное развитие технологии проектирования РЭУ, базирующейся на системном подходе, и совершенствование процессов проектирования, применяющих математические методы и средства вычислительной техники, компьютерное моделирование, эффективные методы многовариантного проектирования и оптимизации.

Во многих ситуациях для улучшения результата проектирования удобно использовать параметрический синтез на базе многовариантного анализа, варьируя значения параметров. При этом задача параметрического синтеза формулируется как определение значений параметров элементов, наилучших с позиций удовлетворения требований технического задания для проектируемого объекта с неизменной структурой, а параметрический синтез становится параметрической оптимизацией. Если параметрический синтез не приводит к успеху, процедура структурного анализа повторяется путем коррекции или уточнения структуры объекта на очередных итерациях.

Для обеспечения требуемой или наибольшей степени выполнения условий работоспособности при заданной структуре объекта решается задача оптимального параметрического синтеза [4].

Особенности проектирования аналоговых радиоэлектронных устройств в условиях неопределенности

Задача синтеза сложных систем – собрать целое из функциональных частей, предварительно подготовленных блоков или модулей разных типов. Одним из направлений исследования таких систем является рассмотрение их как многоуровневых, или систем с иерархической структурой. Для современных САПР при четкой постановке задачи параметрический синтез не вызывает трудностей, а при неполной информации возникают затруднения из-за неопределенности параметров синтеза и необходимости поиска на множестве, не ограниченном четко критериями поиска. Пока нет стройной математической теории для таких систем [1], но есть альтернативные пути развития, среди которых – применение эволюционных методов, не требующих полного математического описания или стройной теории. Для эволюционного процесса при нечеткой постановке задачи достаточно получать более приспособленную систему путем отбора оптимального решения, удовлетворяющего неполным, зачастую противоречивым наборам параметров.

В зависимости от степени формализации в задачах синтеза можно выделить несколько уровней сложности [1]. Первый уровень сложности включает задачи, требующие выполнения только параметрического синтеза, в то

время как структура объекта задана техническим заданием или получена на более ранних этапах проектирования. Ко второму уровню сложности относятся задачи, в которых возможен полный перебор известных решений, т.е. это комбинаторные задачи с выбором элементов в конечных множествах малой мощности. В таких задачах элементы множества структур описываются заданной базой знаний или используется алгоритм, последовательно синтезирующий и анализирующий все возможные элементы множества за допустимое время. Если алгоритмы перебора не находят решения за приемлемое время, задача с трудом поддается четкой формализации или становится многопараметрической, ее относят к третьему уровню сложности.

При отсутствии какой-либо информации об ограничениях на параметры проектирования задачу синтеза приходится относить к четвертому уровню сложности – синтезу при неполной информации. Ее формализация наиболее трудоемка, и один из методов решения заключается в выборе среди многих генерируемых структур одной, удовлетворяющей определенным количественным требованиям. Последующий анализ и доработка выбранной структуры обеспечивают нахождение решения, наиболее соответствующее заданным требованиям.

Выделение нескольких уровней сложности задач синтеза и рассмотрение их как иерархии позволяет формализовать методики решения. К самому низшему уровню применимы методы, использующие алгоритмы перебора и обеспечивающие оценку различных вариантов на основе перебора готовых законченных структур. На среднем уровне применимы методы последовательного синтеза [1]. На высоком уровне это методы синтеза, использующие эволюционные алгоритмы, или методы, обеспечивающие распараллеливание процесса поиска решения, возможность повышения эффективности алгоритмов многовариантного анализа и оптимизации, называемые эволюционным синтезом [1].

Эволюционные алгоритмы способны находить оптимальные решения в областях, сведения о которых недостаточно определены, или в условиях, когда задача не имеет четкой формализации. Эволюционный синтез рассматривает задачу проектирования как итерационный процесс, выполняя на каждой стадии эволюцию множества решений в соответствии с заданным критерием.

При неполной информации эволюционный синтез необходимо рассматривать с позиции применения эволюционных методов или стратегий для последовательного выполнения этапов структурного и параметрического синтеза. Поиск решения начинается с поиска структуры объекта на основе

неполного функционального описания. В отсутствии полноты описания на этапе структурного синтеза на неограниченном множестве параметров или при неточном законе функционирования выполняется поиск множества возможных структур проекта, соответствующих заданному неполному функциональному описанию. Это приводит к необходимости введения ограничений на область поиска решений, выполнению этого поиска на множестве различных трактовок имеющейся неполной информации. В некоторых случаях могут быть получены решения, только частично удовлетворяющие исходной постановке задачи, но не работоспособные за пределами введенных ограничений.

Подтверждением допустимости решения является попадание найденных параметров в область работоспособности. При невыполнении этого требования на основе полученных результатов повторяются процедуры структурного и параметрического синтеза для дальнейшей оптимизации по требуемому параметру или улучшения решения в целом.

Основные положения функционально-параметрического подхода

Для решения проблемы проектирования аналоговых технических устройств и систем с учетом случайных процессов изменения их параметров и требований надежности привлекается функционально-параметрический подход (ФП-подход), основанный на компьютерном моделировании процессов функционирования исследуемых систем и изменении их параметров [4, 5]. Он естественным образом следует из общепринятого определения надежности как свойства объекта сохранять в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. В соответствии с этим математическая модель для расчета надежности должна отражать связь показателей надежности с выполняемыми объектом функциями, условиями и временем эксплуатации.

ФП-подход к задаче обеспечения надежности технических систем основывается на следующих принципах [5]:

- 1) процесс функционирования объекта и его техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров объекта;
- 2) любая техническая система находится во взаимодействии с окружающей средой, человеком, подсистемой управления, компонентами технологического процесса при выполнении определенных функций;
- 3) накопление различных воздействий на систему приводит к измене-

ниям ее параметров и к возможному переходу в иное качественное состояние;

4) технический объект невозможно изолировать от влияния внешней среды, в которой он работает, нельзя остановить процессы, протекающие в нем при осуществлении рабочих функций, исключить последствия технологических процессов, применявшихся при его изготовлении;

5) отказы – следствие отклонений параметров от исходных значений, форма их проявления – выход параметров из области работоспособности;

6) при наблюдаемости, прогнозируемости, управляемости процессов изменения параметров есть возможность предотвращения отказов;

7) в рамках ФП-подхода задачи расчета и обеспечения надежности, возникающие на этапах проектирования, представимы как разновидности задачи управления случайными процессами, решение которых основывается на результатах прогнозирования изменения параметров.

Из перечисленных принципов следует, что при использовании ФП-подхода нужно учитывать возможные отклонения параметров от расчетных значений, предсказывать последствия таких отклонений и разрабатывать комплекс мероприятий, обеспечивающих требуемые характеристики объекта в условиях этих отклонений. Для этого в качестве проблемной области может быть выбран оптимальный параметрический синтез (ОПС).

Оптимальный параметрический синтез в условиях неполной информации

ОПС технических устройств и систем [1, 6] состоит в выборе номинальных значений параметров исследуемого устройства $\mathbf{x}_{ном} = (x_{1ном}, \dots, x_{nном})$, обеспечивающих максимум вероятности безотказной работы в течение заданного времени:

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

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

Исходными являются условия работоспособности, задаваемые обычно в виде допусков на выходные параметры $\mathbf{y}(t) = \{y_j(t)\}_{j=1}^m$, и математическая модель системы $\mathbf{y}(\mathbf{x}(t))$, определяющая зависимость выходных параметров от параметров схемных элементов $\mathbf{x}(t) = \{x_i(t)\}_{i=1}^N$ в виде непрерывных функций

$$y_j(t) = y_j(\mathbf{x}(t)), j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

В большинстве случаев зависимость (2) задается не в явной, а в алго-

ритмической форме, в частности через численные решения систем уравнений (дифференциальных или алгебраических), описывающих функционирование исследуемой системы.

В наиболее общей форме условия работоспособности могут быть представлены как

$$d_{1j} \leq y_j(t) \leq d_{2j}, \forall t \in T, j = \overline{1, m}, \quad (3)$$

или как

$$P(d_{1j} \leq y_j(t) \leq d_{2j}, \forall t \in T) \geq P_{\Pi j}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

где d_{1j}, d_{2j} – границы поля допуска для выходного параметра $y_j(t)$; $P_{\Pi j}$ – заданная вероятность выполнения j -го условия работоспособности.

В традиционном понимании параметрический синтез (1) – (4) сводится к выбору значений параметров, обеспечивающих выполнение условий работоспособности при заданной структуре [4], и включает две процедуры. Это выбор исходных значений внутренних параметров, обычно осуществляемый на основании простых расчетов или опыта и интуиции инженера, и коррекция исходных значений параметров с предварительным их выбором. Найденный на этом этапе синтеза вектор внутренних параметров используется для расчета выходных параметров и оценки работоспособности такого варианта проектируемого устройства. При приемлемой степени выполнения условий работоспособности (3) полученный вариант проектирования может быть принят окончательно, иначе принимается решение о дополнительных этапах для нахождения оптимальных в некотором смысле значений внутренних параметров, обеспечивающих наибольший запас работоспособности или максимальную вероятность выполнения условий (4).

Поскольку при неполной информации проектируемые системы рассматриваются как системы с иерархической структурой, использующие эволюционные методы или стратегии для эволюционного синтеза [1], то должны последовательно выполняться этапы структурного и параметрического синтеза с уточняемыми данными и заданными критериями. Тогда поиск решения начинается с выбора структуры объекта на основе неполного функционального описания, затем ищут множество возможных структур проекта, соответствующих заданному неполному функциональному описанию. Так как структурный синтез осуществляет выбор параметров на неограниченном множестве и по неточному закону функционирования, появляется необходимость введения ограничений на область поиска решений для различных трактовок имеющейся неполной информации. Согласно [4], отправной точкой является выбор набора некоторых исходных значений параметров, де-

лающих систему работоспособной в узком смысле (определение номинальных значений параметров системы без учета вариаций параметров) или в широком смысле (применение некоторой стратегии, управляющей параметрами системы). При этом должны быть решены три взаимосвязанных вопроса: какие параметры выбрать управляемыми; когда осуществлять управление; какие значения выбрать для управляющих параметров.

На начальном этапе вопрос о выборе управляемых параметров не возникает, и в качестве исходных значений параметров выбираются расчетные величины, без учета возможных отклонений. Цель этого этапа – определение номинальных значений всех параметров. Следующим шагом является определение решения, обеспечивающего некоторый запас работоспособности при возможных отклонениях действительных значений параметров от расчетных, т.е. выбор оптимальных значений внутренних параметров без учета производственных и эксплуатационных параметров. Для обеспечения максимальной гарантии работоспособности (максимальной вероятности безотказной работы в течение заданного времени) необходимо производить выбор номинальных значений параметров с учетом закономерностей их производственных и эксплуатационных вариаций [4, 6]. Параметрический синтез на данном уровне соответствует задаче оптимизации при стохастических критериях. Если качество решения, полученное на данном уровне, не соответствует требованиям, приходится использовать настройки некоторых параметров [5, 7]. Это позволяет определить параметры работоспособности системы в некотором диапазоне, но еще необходимо выделить совокупность параметров, наиболее влияющих на настройку управляемых параметров, и определить диапазоны их изменений. Более детально изучить свойства системы и получить характеристики ее работоспособности удастся, используя итерационные процедуры на множестве наборов многократно изменяемых (корректируемых) параметров.

Таким образом, задачу синтеза в условиях неполной информации можно определить как итерационный процесс, состоящий из этапа синтеза структуры объекта с последующим этапом параметрического синтеза для поиска вектора параметров (или множества векторов), удовлетворяющего требованиям работоспособности. Найденные решения анализируются и оцениваются согласно заданному (возможно многокритериальному) алгоритму оценки, принимается решение о выборе конечного результата или синтез повторяется вновь до получения удовлетворяющего поставленным требованиям решения. Такой этап параметрического синтеза включает две процедуры – выбор исходных значений внутренних параметров и коррекцию исходных

значений параметров, при которой может возникнуть вопрос о выборе корректируемых параметров.

Параметрическая коррекция в условиях дефицита информации

В условиях дефицита информации одна из важных и сложных проблем, требующих решения, состоит в априорной неопределенности относительно закономерностей дрейфа параметров объектов, условий эксплуатации, ошибок измерения и контроля. Для этого применима методика параметрической коррекции, включающая набор стратегий, обеспечивающих получение решения при имеющемся объеме информации. Среди них принципы адаптации, минимакса, робастности, переход к детерминированным критериям, не требующим знания полных вероятностных характеристик случайных величин, описывающих математическую модель системы [5, 7, 8].

При анализе возможности коррекции параметров технических систем, обеспечивающих наилучшие или требуемые показатели их надежного и безопасного функционирования, могут быть выявлены ситуации, когда задача не имеет решения в общем виде и приходится рассматривать разные случаи, опираясь лишь на некоторые допущения.

Одной из стратегий оптимальной коррекции параметров в условиях неопределенности является использование набора («веера») методов и алгоритмов, адекватных априорной информации о параметрических возмущениях. При этом в каждой отдельной ситуации оптимальным считается результат, обеспечивающий максимальный гарантированный уровень работоспособности при данном объеме исходной информации.

Оптимальная коррекция значений внутренних параметров системы при замене исходного стохастического критерия оптимальности на детерминированный аналог позволяет получить уточняемое в дальнейшем решение, а выбор оптимальных значений корректируемых параметров, обеспечивающих максимальный запас работоспособности системы, может быть получен методами поисковой оптимизации, основанными на эволюционных вычислениях. Они уточняют неизвестные характеристики, используя накопленную в процессе эволюции информацию, и за приемлемое время находят варианты, близкие к оптимальным решениям, последовательным преобразованием множества решений [9]. При этом представляется целесообразным применение адаптивных версий эволюционных алгоритмов, учитывающих предысторию поиска и проблемно-ориентированную информацию о допустимых оптимальных решениях.

При использовании ФП-подхода из множества эволюционных algo-

ритмов может быть выбран один из первых популяционных методов – алгоритм эволюционной стратегии [10] и его модификации. Он характеризуется простотой реализации, а приспособление особей популяции к окружающей среде происходит на поведенческом уровне (в отличие от генетических алгоритмов), что позволяет отказаться от рекомбинации особей. Для поиска альтернативных решений используется только оператор мутации и применяется естественный отбор с целью оптимизации набора параметров. Эволюционная стратегия заключается в применении математических преобразований, превращающих входной поток информации в выходной, – опираясь на имитацию механизмов эволюционного поиска, статистический подход к оценке возникающих ситуаций и итерационное приближение к искомому решению до момента удовлетворения заданным условиям поиска. При формировании новых наборов параметров вносятся случайные изменения в некоторые из них, и по значениям целевых функций отбирается набор, соответствующий наилучшему результату.

Анализ некоторых подходов к применению методов эволюционных вычислений в задачах оптимальной коррекции параметров технических систем позволяет сделать вывод, что ускорение процесса решения может быть достигнуто за счет гибридизации эволюционных или эволюционных и классических алгоритмов. В реальных условиях гибридные алгоритмы для каждой конкретной задачи обеспечивают подбор последовательности шагов из разных методов, приводящей к наиболее эффективному результату. Одним из вариантов гибридных версий является комбинация эволюционных вычислений с методом локального поиска, учитывающего предположение о недифференцируемости целевой функции. Кроме того, в подобных задачах, в зависимости от степени неопределенности имеющейся информации, при гибридизации могут использоваться одинаковые алгоритмы с разными значениями свободных параметров, компенсируя эффективность одного из них слабость другого. Подробно алгоритмы выбора оптимальных значений корректируемых параметров изложены в [11].

Программная среда решения задач ОПС представлена набором нескольких взаимосвязанных программно-алгоритмических модулей (ввод описания проектируемой системы в вычислительную среду, преобразование описания системы в математическую модель, детерминированный анализ, статистический анализ, оптимизация) [12].

Модуль оптимизации предназначен для выбора наилучших решений с учетом производственных и эксплуатационных отклонений параметров проектируемых систем от их расчетных значений, обеспечения решения задачи

глобальной оптимизации многоэкстремальных многомерных нелинейных целевых функций, в том числе и не имеющих аналитического представления, по стохастическому или детерминированному критерию при нелинейных функциях-ограничениях на управляемые параметры [13]. В условиях неопределенности используются методы поисковой оптимизации, имеющие итерационный характер и требующие лишь значения целевой функции. Их алгоритмы сводятся к нахождению последовательности векторов, обеспечивающей оптимальное значение.

Они могут отличаться способом выбора направления вектора оптимизации и его длины, величины шага поиска, с помощью которых осуществляется выбор направления уменьшения (возрастания) целевой функции для ее приближения к экстремуму. Направление поиска может быть известно заранее (в детерминированных методах) или выбираться случайным образом (при случайном поиске). Переход к последующей точке состоит в выборе направления движения на основе локальной информации о поведении целевой функции в их окрестностях, правил метода и определении шага вдоль выбранного направления; и если в ней не выполнены условия останова, повторяются описанные выше операции. Начальным приближением может быть произвольная точка, но ее удобнее выбирать как можно ближе к оптимуму, опираясь на имеющуюся информацию.

В настоящее время для поисковой оптимизации разработан большой класс стохастических поисковых алгоритмов, называемых в разных источниках поведенческими, интеллектуальными, инспирированными природой, многоагентными, популяционными, эволюционными, роевыми и т.д. [14 – 18]. Некоторые из них включены в модуль оптимизации [13], предназначенный для решения задач глобальной оптимизации многоэкстремальных многомерных нелинейных целевых функций, в том числе и не имеющих аналитического представления. Кроме того, модуль может использоваться при поиске наилучших решений с учетом производственных и эксплуатационных отклонений параметров проектируемых систем от их расчетных значений.

Заключение

Рассмотрена проблема схемотехнического проектирования аналоговых технических устройств и систем с учетом случайных процессов изменения их параметров и требований надежности. Проанализирована возможность привлечения функционально-параметрического подхода для ее решения. Обозначены трудности, обусловленные дефицитом информации о законо-

мерностях случайных процессов изменения параметров, отсутствием или недостатком информации о возмущающих воздействиях, влиянием внешних факторов на протекающие в них процессы. Обоснована возможность применения алгоритмов поисковой оптимизации, допускающих распараллеливание вычислительных процессов и возможность использования эволюционных вычислений при вероятностном характере критерия оптимальности, нелинейности целевой функции и ограничений на нее. В условиях неполной или недостаточной информации об оптимизируемых функциях предложено использовать технологии гибридизации алгоритмов на основе многометодной технологии в виде параллельных итерационных процессов. Такой подход обеспечивает выбор лучшего приближения после выполнения очередной итерации всеми выбранными методами и дает возможность модификации известных алгоритмов с учетом специфики рассматриваемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудилов В.В. Эволюционное проектирование сложных систем // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. – 2011. – №1(3). – С. 3-26.
2. Алмаметов В.Б., Кочегаров И.И. Информационные технологии проектирования. Методология разработки и проектирования РЭС: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013.
3. Антипенский Р.В., Фадин А.Г. Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств. – Москва: Техносфера, 2007.
4. Абрамов О.В. Методы и алгоритмы синтеза стохастических систем // Проблемы управления. – 2006. – № 4. – С. 3-8.
5. Абрамов О.В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С. 64-77.
6. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления // под ред. А.А. Воронова и И.А. Огурка. – М.: Наука, 1984.
7. Абрамов О.В. Выбор параметров настройки технических систем и устройств // Проблемы управления. – 2011. – № 4. – С. 13-19.
8. Абрамов О.В. Проектирование технических систем с элементами настройки // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – №2(6). – С. 51-55.
9. Диго Г.Б., Диго Н.Б. Применение эволюционных вычислений при управлении параметрической надежностью аналоговых технических устройств и систем // Информатика и системы управления. – 2018. – №4(58). – С.70-81.
10. Козов А.В. Сравнение эффективности некоторых модификаций алгоритма эволюционной стратегии // Политехнический молодежный журнал. – 2018. – № 5. <http://ptsj.ru/catalog/math/compmath/309.html> (дата обращения 28.07.2021).
11. Диго Г.Б., Диго Н.Б. Параметрическая коррекция при управлении надежностью технических систем // Вестник ТГТУ. – 2020. – Т. 26, №2. – С.202-210.
12. Абрамов О.В. Использование технологии параллельных и распределенных вычисле-

- ний в системах автоматизированного проектирования // Вестник ДВО РАН. – 2021. – № 4. – С. 110-118.
13. *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.
 14. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
 15. *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.
 16. *Абрамов О.В., Лагунова А.Д.* Об использовании эвристических алгоритмов в задачах оптимального параметрического синтеза // Информатика и системы управления. – 2021. – №2(68). – С.34-46.
 17. *Назаров Д.А.* Использование областей работоспособности для анализа деградиационных изменений параметров систем // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» – 2020. – Т. 1. – С. 130-133.
 18. *Назаров Д.А.* Использование генетического алгоритма с целочисленным кодированием для решения задачи параметрического синтеза // Информатика и системы управления. – 2019. – №3(61). – С.59-69.

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

E-mail:

Диго Галина Борисовна – bernatsky@iacp.dvo.ru;

Диго Наталья Борисовна – digo@iacp.dvo.ru.