



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и
инновациям ФГАОУ ВО НИ
ИИИ, д.т.н., профессор

А.Н. Дьяченко

«05» декабря 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на диссертационную работу Рыжикова Ивана Сергеевича «Эволюционные алгоритмы решения задач управления и идентификации для динамических систем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и космические технологии)

Актуальность темы диссертации

С ростом сложности решаемых задач управления сложными динамическими системами все чаще исходные постановки сводятся к поиску оптимума некоторой целевой функции, такой, что точка оптимума является решением исходной задачи. Качество найденного решения для поставленной задачи во многом будет зависеть от способа представления решения и интерпретации исходной задачи в виде экстремальной, т.е. пары: целевая функция, множество допустимых решений. Стохастические методы оптимизации, основанные на модели эволюции или поведения группы индивидов, порождают классы эффективных алгоритмов прямого поиска точки глобального оптимума сложных многоэкстремальных задач и называются популяционными алгоритмами.

Таким образом, исследование и совершенствование алгоритмов стохастического популяционного поиска глобального экстремума, в

соответствии с особенностями целевой функции, и формирование подходов к решению сложных задач моделирования и управления, является **актуальной научно-технической задачей**.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, рассмотрены вопросы научной новизны и практической ценности проведенных исследований и перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматривается общая концепция популяционных методов, основанных на теории эволюции. Представлен стандартный алгоритм эволюционных стратегий, приведены операторы поиска, предложены схемы операторов селекции, рекомбинации и мутации. Оператор мутации, который является основным оператором поиска, был модифицирован. Эволюционный алгоритм оптимизации был совмещен с алгоритмом случайного покоординатного спуска так, что первым оператором локального улучшения является случайный выбор одной из множества альтернатив – популяции на текущем цикле эволюционного алгоритма. Операторы эволюционного алгоритма и случайного спуска удовлетворяют принципу максимума энтропии. В главе описаны все операторы и их изменения, которые соответствуют гибриднему модифицированному алгоритму эволюционных стратегий. Предложенный алгоритм обобщен на класс экстремальных задач с количественными и качественными переменными. Рассмотрены основные элементы поиска для других известных алгоритмов.

Во второй главе диссертации исследуется задача идентификации линейных динамических систем по данным наблюдений. Приводятся основные методы идентификации линейной динамики. Постановка задачи идентификации выборочных данных с линейным дифференциальным уравнением, рассматриваемая в данной работе, сравнивается с другими постановками, отличаясь: возможностью построения моделей в условиях малой выборки, одновременным подбором структуры и параметров, возможностью вычисления выхода модели вне интервала наблюдений. Подход для решения задачи в данной постановке, основанный на представлении дифференциального уравнения в виде вектора приводит к экстремальной задаче на пространстве вещественных векторов ограниченной

длины. Произведено изменение гибридного модифицированного алгоритма эволюционных стратегий с учетом особенностей представления решения. Рассмотрены различные схемы модифицированных алгоритмов, определена наиболее эффективная в среднем схема и выбраны настройки алгоритма для набора тестовых задач. Предложен критерий определения эффективности: оценка вероятности нахождения истинного решения для объекта, переходный процесс которого полностью наблюдается на интервале наблюдения. Алгоритм апробирован на решении задачи моделирования процесса изменения концентрации гексадекана. Найденная модель – дифференциальное уравнение первого порядка, что согласуется с законом химической кинетики, при этом решение искалось для уравнений до 10-ого порядка. Рассмотрена постановка задачи идентификации параметров системы с несколькими выходами, которая была апробирована на решении задачи моделирования процессов изменения концентрации продуктов реакции распада гексадекана.

Третья глава посвящена решению терминальной задачи управления для динамических систем с исполнительным механизмом в виде многоуровневого реле. Такому виду исполнительного механизма соответствует кусочно-постоянная функция управления. В главе рассматривается подход решения задачи терминального управления для класса кусочно-постоянных функций, в котором двухточечная задача управления сводится к прямому методу поиска решения. Прямой метод основывается на представлении функции управления тремя множествами: точек переключений, допустимых значений управления, элементов соответствия каждого интервала одному из значений допустимого множества. Таким образом, поиск управления сводится к экстремальной задаче на пространстве вещественных и номинальных переменных, для решения которой используется обобщенный гибридный модифицированный алгоритм эволюционных стратегий. Особенность подхода и представления решения таковы, что возможно решение задач управления в различных постановках. Число точек переключений настраивается косвенно и во многом зависит от способа определения множества точек переключений. Алгоритм проверен на решении 24 тестовых задач, определены наиболее эффективные в среднем настройки алгоритма.

Четвертая глава посвящена экстремальной задаче непрямого метода решения задачи оптимального управления. Приводится суть метода и основные особенности целевой функции, к поиску экстремума на которой приводится задача оптимального управления. Для 20 задач оптимального управления исследовались эффективности различных популяционных алгоритмов поиска экстремума при различных настройках. Было показано, что гибридный модифицированный алгоритм эволюционных стратегий является более эффективным в среднем по значению критерию невязки. Представлен критерий, определяющий эффективность оптимизационного алгоритма по оценке вероятности нахождения глобального оптимума. В результате сравнения алгоритмов по данному критерию было найдено, что предложенный алгоритм является более эффективным, чем остальные. Выявлены факторы, влияющие на частоту нахождения глобального оптимума, с учетом которых предложен поисковый оператор, позволяющий снизить негативный эффект влияния этих факторов. Гибридный модифицированный алгоритм с включением представленного оператора поиска позволяет находить глобальный оптимум с приемлемой точностью при любых настройках оператора для данной задачи. Оценка вероятности нахождения глобального решения алгоритмом без предложенного оператора составила 0.65. Таким образом, разработанный алгоритм является более эффективным инструментом нахождения решения экстремальных задач численно-аналитического прямого метода оптимального управления.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы.

Научная новизна полученных результатов

Предложен подход к решению задач терминального управления в виде кусочно-постоянных функций, который отличается от существующих универсальностью представления решения для различных постановок задачи управления и применимостью для нелинейных динамических систем.

Предложен подход к решению задач идентификации линейных динамических систем по данным наблюдений, который отличается от существующих возможностью подбора структуры и коэффициентов

дифференциального уравнения одновременно и возможностью нахождения решений в условиях малой выборки.

Разработаны модификации алгоритма эволюционных стратегий, которые отличаются от других существующих методов оптимизации высокой эффективностью решения задач идентификации линейных динамических систем, терминального управления для класса кусочно-постоянных функций и экстремальной задачи непрямого метода поиска оптимального управления.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации

Выдвигаемые научные положения основаны на корректном применении современного математического аппарата и обоснованы с использованием методов математической статистики, теории оптимизации, системного анализа, теории оптимального управления.

Работоспособность и эффективность разработанных в диссертации подходов и алгоритмов подтверждена результатами решения наборов тестовых задач и реальных или близких к реальным задач.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию и получили положительные отзывы на российских и международных научных конференциях, а также при их обсуждении на научных семинарах.

Значимость для науки и практики

В диссертации предложены подходы к решению задач идентификации, терминального и оптимального управления для динамических систем, которые сводят исходные задачи к поиску экстремума на некотором пространстве альтернатив, которые, в свою очередь, определяются представлением решения. Каждый из подходов порождает отдельный класс экстремальных задач, для которых разработаны алгоритмы, значительно превосходящие по эффективности стандартные алгоритмы различной природы, или, как в случае задачи терминального управления, алгоритм позволяет впервые решать задачу в данной постановке. Разработанные алгоритмы эволюционного поиска превосходят стандартные популяционные

алгоритмы не только по среднему значению невязки, но и по оценкам вероятностей нахождения истинного решения.

Исследуемые в работе подходы и алгоритмы идентификации и терминального управления реализованы в виде 4 различных программных систем и прошли государственную регистрацию в Российском реестре компьютерных программ. Программа идентификации линейных динамических систем использована при решении реальной практической задачи для моделирования процесса изменения концентрации гексадекана. Реализовано множество модулей на языке MATLAB, позволяющих автоматически находить решения для представленных в работе задач, в частности построена модель процесса изменения концентраций продуктов распада гексадекана.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Полученные в диссертации результаты могут использоваться при анализе и моделировании динамических систем, которые возникают в различных сферах деятельности: экономике, металлургии, химической промышленности, робототехнике и т.п., а также при проведении научных исследований при разработке методов идентификации стохастических дифференциальных уравнений или уравнений с дробными производными, которые лежат в основе современных систем поддержки принятия решений и управления нелинейными динамическими системами. Алгоритмы терминального и оптимального управления могут найти применение в исследованиях систем, которые работают в определенных режимах. Подход к решению задачи терминального управления, может быть применим для решения задач управления космическим аппаратом.

Замечания по работе

1. Представляет интерес рассмотрение других схем реализации алгоритма эволюционных стратегий, включающих правило $1/5$ и воспроизведение большего числа альтернатив, чем объем популяции.
2. Автору не следовало ограничиваться только рекомендованными настройками для алгоритма CMA-ES, т.к. метод имеет большое число настроек (стр. 120).

3. Набор тестовых задач, используемых для сравнения оптимизационных алгоритмов решения экстремальной задачи численно-аналитического метода, следовало составить таким образом, чтобы было больше различных систем и функционалов (таблицы 4.1-4.3).
4. В работе не указан вид нормы, которая используется в формулах вычисления невязок.
5. В обзоре литературы недостаточно ссылок на другие эволюционные алгоритмы решения экстремальной задачи численно-аналитического метода нахождения оптимального управления.
6. Текст содержит грамматические ошибки и опечатки.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Оценка диссертационной работы в целом

В целом диссертация И.С. Рыжикова выполнена на высоком научном уровне и представляет собой целостную законченную научно-квалификационную работу. Работа имеет важное научное и практическое значение, во-первых, ввиду развития алгоритмов решения сложных задач поиска экстремума, а во-вторых, ввиду развития методов моделирования динамических систем, а также прямых и косвенных методов решения задач оптимального управления динамическими системами.

Основные результаты работы опубликованы в открытой печати, в том числе – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, докладывались на общероссийских и международных конференциях (в том числе 8 докладов на международных конференциях за рубежом), обсуждались на научных семинарах.

В автореферате представлены в достаточном объеме основные этапы работы, полученные результаты и сформулированные выводы. Автореферат и 25 публикаций автора (в том числе, 9 из списка ВАК) отражают основное содержание диссертации.

Оформление диссертации и автореферата удовлетворяет требованиям соответствующих нормативно-методических документов.

Диссертация полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям по техническим наукам, а её автор – Рыжиков Иван Сергеевич – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации».

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании научного семинара кафедры информационных систем и технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета. Присутствовало на семинаре 31 человек. Результаты голосования: «за» – 31 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет, (протокол № 1 от 1 декабря 2016 г.).

Отзыв составили:

Д.т.н., профессор, Спицын Владимир Григорьевич,
634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, НИ ТПУ,
Телефон: 8 (3822) 70-16-09, e-mail: spvg@tpu.ru,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
профессор кафедры информационных систем
и технологий Института кибернетики

В.Г. Спицын

05.12.2016

К.т.н., Болотова Юлия Александровна,
634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30, НИ ТПУ,
Телефон: 8 (3822) 70-16-09, e-mail: jbolotova@tpu.ru,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доцент кафедры информационных систем
и технологий Института кибернетики

Ю.А. Болотова

05.12.2016