

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора Института проблем

управления РАН,

доктор технических наук

А.О. Калашников

«31» марта 2021 г.



Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Рябикова Андрея Игоревича
«Численные методы аппроксимации границы Парето в задачах оптимизации
правил управления динамическими системами с разрывными
многоэкстремальными критериями», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 –
«Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ»

Актуальность. Диссертация А.И. Рябикова посвящена применению методов многокритериальной оптимизации, основанных на аппроксимации и анализе границы Парето, в сложных задачах управления водными ресурсами. Методы, основанные на анализе границы Парето, предназначены для поддержки принятия решений при помощи изучения объективных характеристик изучаемой задачи. При этом в анализе задачи могут принимать участие различные заинтересованные лица с различными предпочтениями. Аппроксимация и анализ границы Парето получили распространение в последние годы, особенно в эколого-экономических проблемах, в которых в принятии решения обычно участвуют многочисленные группы влияния, имеющие различные интересы.

Фундаментальный вклад в развитие этого направления исследований внес научный руководитель аспиранта профессор А.В.Лотов.

Трудность аппроксимации границы Парето зависит от типа математической модели ситуации и от числа и типа критериев, используемых при принятии решения. В диссертации А.И. Рябикова рассматривается задача поиска решения в ситуации, описываемой нелинейной многошаговой моделью, содержащей правило управления, т.е. зависимость управления от состояния системы. При этом структура правила управления задана, а задача

состоит в выборе параметров правила. В качестве одного критерия берется величина обеспеченности выполнения некоторого заданного требования к системе, под которой понимается доля шагов по времени, на которых требование не выполняются (или не выполняется). Совокупность требований порождает совокупность критериев задачи. Такая многокритериальная многошаговая задача принятия решения является обобщением прикладной задачи оптимизации управления каскадом водохранилищ. При этом использование критериев типа обеспеченности определяется указаниями Минприроды РФ, поэтому разработка методов поддержки принятия решений для задач с такими критериями имеет большое народнохозяйственное значение. Как показано в диссертационной работе, зависимость критериев обеспеченности от параметров правила управления характеризуется разрывностью и многоэкстремальностью. До проведения работы, описываемой в диссертации, методы аппроксимации границы Парето для такой задачи не существовали. Этим определяется актуальность данной диссертационной работы.

Содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, всего 195 стр.

Во Введении описаны особенности используемого в диссертации подхода к решению задач многокритериальной оптимизации. В рамках этого подхода вместо решения задачи аппроксимации границы Парето решается задача аппроксимации оболочки Эджворта-Парето, которая представляет собой множество, содержащее не только достижимые критериальные векторы, но и все векторы пространства критериев, доминируемые границей Парето. Построенная аппроксимация оболочки Эджворта-Парето используется для визуализации границы Парето в виде наборов двумерных сечений оболочки Эджворта-Парето. Поскольку основным результатом диссертации являются численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето, дается обзор существующих методов аппроксимации границы Парето и оболочки Эджворта-Парето в нелинейных невыпуклых задачах и обсуждается возможность их использования для решения прикладной задачи, рассматриваемой в диссертации.

Описанию нелинейной многошаговой математической модели, используемой при многокритериальном анализе каскада водохранилищ реки Ангара, являющейся прикладной задачей, рассматриваемой в диссертации, посвящена гл. 1. При этом формулируются правила управления водохранилищами и критерии, используемые при принятии решения о параметрах правил. Проводится исследование проблем, возникающих при

вариантом расчете значений критериев для заданных значений параметров правила. Главная из них – проблема выбора таких начальных объемов воды в водохранилищах, чтобы начальные и конечные объемы воды в водохранилищах оказались близки. Для решения этой задачи автором предлагается рассмотреть итеративный процесс поиска неподвижной точки отображения, задаваемого вариантным расчетом по модели каскада. Для этого процесса находятся и обосновываются достаточные условия сходимости. В конце главы формулируется общая задача многокритериальной оптимизации правил управления многошаговой системой, заданной черным ящиком, с критериями типа обеспеченности. В математической модели эти критерии представляются в виде суммы большого числа функций Хэвисайда. Устанавливаются некоторые свойства рассматриваемой задачи, в том числе достаточное условие устойчивости множества достижимых критериальных векторов и его оболочки Эджворта-Парето.

В главе 2 автор изучает возможность применения градиентных методов оптимизации для аппроксимации оболочки Эджворта-Парето в задаче оптимизации правил управления каскадом водохранилищ. Обычно градиентные методы используются при поиске Парето-оптимальных критериальных точек путем решения задач глобальной оптимизации сверток критериев. Для применения градиентных методов автор заменяет исходные разрывные критерии на непрерывные вспомогательные функции, которые он предлагает строить путем замены функций Хэвисайда на степенные функции. Автор находит такие показатели степени этих функций, при которых глобальные экстремумы отдельных критериев удается найти достаточно точно. В то же время, многочисленные эксперименты с различными свертками критериев не помогли автору найти свертки, с помощью численной оптимизации которых можно построить точки, оптимальные по Парето. По-видимому, это связано с огромным числом локальных экстремумов сверток.

Проведенные эксперименты позволили автору обнаружить, что при правильном подборе исходных точек процесса локальной оптимизации и сверток критериев локальная оптимизация сверток позволяет качественно улучшить решение, а в некоторых случаях и найти решение, порождающее критериальную точку, близкую к границе Парето. На этой основе автор сформулировал итеративную человеко-машинную процедуру «Метод наследуемого решения», в рамках которой вместо общепринятого нахождения глобального оптимума свертки критериев на каждой итерации решается некоторое число задач локальной оптимизации свертки. При этом

стартовые точки процесса локальной оптимизации берутся в малой окрестности решения, полученного на предыдущей итерации. Применяя этот метод, автор смог найти некоторое решение задачи оптимизации правил управления каскадом реки Ангара, превосходящее по качеству ранее известные решения. Это решение удовлетворило эксперта, участвовавшего в диалоговой процедуре.

В третьей главе описываются предлагаемые автором численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето для многошаговых систем с критериями типа обеспеченности. При этом требуется разработать комплекс методов, обеспечивающих аппроксимацию оболочки Эджворта-Парето с точностью в 1%, затратив при этом в случае каскада водохранилищ Ангары не более 15 миллионов расчетов вектора критериев. Прежде всего, надо подчеркнуть, что задачи такой размерности (около 300 переменных) для многоэкстремальных критериев раньше не решались. Для таких задач можно попытаться применить подходы, основанные либо на оптимизации сверток критериев с помощью метода мультистарта, либо на эволюционных (в частности, генетических) методах аппроксимации границы Парето. И тот, и другой подход являются эвристическими, поэтому результат их применения можно оценить на основе сравнения полученных аппроксимаций. Автор теоретически и экспериментально изучает предложенные им методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето (различные варианты метода стартовой площадки), основанные на интеграции градиентных и генетических методов, и экспериментально показывает, что предложенные им методы в целом решают поставленную задачу. Автор также анализирует порядок скорости сходимости к нулю расстояния от аппроксимации до найденной во второй главе достижимой критериальной точки. Автор показывает, что предложенные методы имеют больший порядок скорости сходимости, чем генетический метод. Представляет интерес вариант метода стартовой площадки, основанный на использовании множества эффективных решений задачи, полученного для другого набора критериев.

Достоинством диссертации является то, что в конце каждой главы приводится описание программного обеспечения, реализующего предложенные в ней методы и модели. Текст диссертации написан ясным языком, содержит четкую постановку задачи и обширную библиографию.

Научная новизна исследования и полученных результатов. В работе А.И.Рябикова предложены, изучены и реализованы в виде программ для персональных компьютеров новые численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето для случая многошаговых систем с нелинейными

критериями, которые представляют собой сумму большого числа функций Хэвисайда и являются разрывными функциями с большим числом локальных экстремумов. Предложен и экспериментально изучен новый метод построения вспомогательных функций для оптимизации разрывных многоэкстремальных критериев, на основе чего предложена новая диалоговая итеративная процедура многокритериальной оптимизации, в рамках которой не требуется решать задачи глобальной оптимизации свертки критериев. Найдены достаточные условия сходимости итерационного процесса поиска начальных объемов воды в водохранилищах, которые подходят для расчета значений критериев. На основе разработанных методов реализована новая методика многокритериальной оптимизации управления многошаговой системой с критериями типа уровня обеспеченности.

Достоверность полученных результатов. Научные результаты диссертации, выносимые на защиту, обоснованы строгими математическими доказательствами и вычислительными экспериментами, описанными в работе. Достоверность полученных результатов подтверждается публикацией основных результатов диссертации, а также использованием результатов диссертации в работах, проводившихся в рамках проектов РФФИ. Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

Значимость полученных результатов состоит в том, что в диссертационной работе созданы модели и вычислительная основа для решения задач многокритериальной оптимизации правил управления каскадами водохранилищ. Эти модели и разработанное программное обеспечение использовались при оптимизации правил управления каскадом водохранилищ реки Ангара.

Апробация полученных результатов диссертации. Основные результаты диссертации содержатся в 24 публикациях, в том числе в 10 публикациях в журналах из списка ВАК. Семь публикаций входят в международные базы данных. Получено свидетельство о регистрации программы для электронных вычислительных машин. Результаты работы докладывались на 13 конференциях, в том числе на 9 международных. Результаты использованы в работах, проводившихся при поддержке четырех проектов РФФИ.

Рекомендации по использованию результатов. Методика и численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето, разработанные в диссертации и использованные при оптимизации правил управления

каскадом водохранилищ реки Ангара и уровнем озера Байкал, могут быть использованы в процессе дальнейшего совершенствования правил управления этим объектом в соответствии с получаемой информацией об изменении климата, а также при оптимизации других водохозяйственных объектов, функционирование которых оценивается на основе критериев типа обеспеченности.

Рассматриваемая работа не лишена недостатков.

1. При оптимизации первого критерия (годовая обеспеченность ограничений на уровень Байкала) было бы интересно найти вероятностную интервальную оценку глобального минимума критерия, построенную по найденным локальным минимумам (подобно тому, как это было сделано в разделе 2.2.2).
2. Сравнение метода инъекции оптимумов с генетическим методом производится по качеству аппроксимации оболочки Эджворта-Парето. В то же время, оба этих метода используются как средство построения стартовой площадки. Однако их сравнение по качеству построенной стартовой площадки, т.е. по ее влиянию на окончательную аппроксимацию, не производится;
3. В методе инъекции оптимумов представляется разумным включать в популяцию не только сами оптимумы, но и их допустимые выпуклые комбинации.
4. При анализе правил управления предполагается, что приточность на ближайший интервал времени, т.е. на месяц или декаду в половодье, известна точно. Было бы важно изучить влияние возмущения этого параметра на функционирование системы.

Указанные недостатки не имеют принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Выводы. Кандидатская диссертация Рябикова Андрея Игоревича «Численные методы аппроксимации границы Парето в задачах оптимизации правил управления динамическими системами с разрывными многоэкстремальными критериями» является завершенным научным исследованием, содержащим научно-обоснованные численные методы аппроксимации оболочки Эджворта-Парето в сложных многошаговых задачах многокритериальной оптимизации, а также методику их использования при построении правил управления каскадом водохранилищ. Диссертация представляет собой самостоятельно выполненную автором

научно-квалификационную работу, она содержит новые научные результаты и имеет практическую значимость в виде реализованного комплекса программ и найденных эффективных правил управления ангарским каскадом водохранилищ. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» для физико-математических наук по направлениям «1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», «3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» и «4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Диссертация по избранной теме, по степени обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в работе, по их достоверности и новизне соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней (пункты 9–14), утвержденного постановлением правительства РФ. Диссертационная работа «Численные методы аппроксимации границы Парето в задачах оптимизации правил управления динамическими системами с разрывными многоэкстремальными критериями» отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Рябиков А.И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18– «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден и утвержден на семинаре лаборатории «Теории выбора и анализа решений им. М.А. Айзермана» ИПУ РАН, протокол № 1 от 3 марта 2021 г.

Заведующий лабораторией
«Теории выбора и анализа решений
им. М.А. Айзермана» ИПУ РАН, д.т.н.

Ф.Т.Алескеров

«30» марта 2021 г.