

ОТЗЫВ

официального оппонента Скобцова Юрия Александровича
на диссертацию Сопова Евгения Александровича
на тему «Обобщенный метод синтеза гиперэвристических эволюционных
алгоритмов оптимизации сложных систем»
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (космические и информационные технологии)
на соискание учёной степени доктора технических наук

Актуальность темы диссертационной работы связана с необходимостью разработки новых методов оптимизации для сложных систем, которые характеризуются большой сложностью и неполнотой информации о внутреннем строении систем. В этом случае классические методы часто работают плохо или не вообще не применимы. Целевые функции могут не удовлетворять требованиям гладкости, дифференцируемости, выпуклости и т.п. Более того, значения функций могут вычисляться не по аналитическим формулам, а алгоритмически, например, с помощью имитационного моделирования. Для современных задач характерны также высокая размерность, мультимодальность, многокритериальность, которые также требуют развития специальных методов. Особо следует отметить оптимизацию в стационарной среде, когда условия изменяются в процессе оптимизации.

Для указанных случаев в настоящее время применяются различные метаэвристики, например, эволюционные алгоритмы. Но практика показывает, что самыми эффективными являются гибридные методы, которые используют комбинацию нескольких метаэвристик. Как построить такую комбинацию метаэвристик, и какие параметры использовать при этом является чрезвычайно сложной и актуальной проблемой, решению которой и посвящена настоящая диссертация.

Структура работы

Диссертационная работа с приложениями представлена на 325 страницах, основной текст состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во *введении* представлена общая характеристика проблем оптимизации сложных систем и синтеза эволюционных алгоритмов, обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу свойств сложных систем относительно проблем оптимизации. Выполнен анализ современных подходов к решению

задач оптимизации. Приведена общая постановка задачи оптимизации. При этом на вид целевой функции не накладываются никакие ограничения типа линейности, непрерывности и т.п. В общем случае целевая функция может быть представлена алгоритмически в виде модели «черный ящик». Приведена постановка задачи динамической оптимизации в нестационарной среде и мультимодальной оптимизации. Введены понятия эвристики, метаэвристики и гиперэвристики, отмечена зависимость их эффективности от настраиваемых параметров. Приведена постановка задачи синтеза эволюционного алгоритма, как задачи комбинаторной оптимизации более высокого уровня. Выбраны наборы эталонных тестовых задач (benchmarks) для проверки эффективности решения задач оптимизации.

Во *второй главе* исследована проблема разработки гиперэвристик на основе алгоритма генетического программирования (ГП). Предложен новый подход к синтезу операторов селекции на основе ГП с использованием обучающего и тестового множества задач оптимизации. Для апробации этого подхода решена практическая задача проектирования эвристики для эволюционного алгоритма в задаче идентификации компонентов аэрокосмического применения. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность предложенного подхода.

В третьей главе рассматривается проблема разработки и исследования гиперэвристик для решения задач оптимизации в нестационарной среде. Для решения этой проблемы предложен подход на основе объединения метода портфолио алгоритмов из области машинного обучения и идеи метода адаптации вероятностей на уровне популяции, используемой в эволюционных алгоритмах. Экспериментальные исследования предложенной селективной онлайн гиперэвристики синтеза ЭА оптимизации в нестационарной среде показало, что данный подход позволяет синтезировать эффективный ЭА в процессе решения задачи, адаптируясь к типам изменений путем выбора подходящей базовой эвристики. Для апробации предложенного подхода решена практическая задача оптимизации для идентификации параметров боковой динамики движения (тангаж, крен и рыскание в зависимости от положения элеронов, руля высоты, руля направления и рычага управления двигателем) малого беспилотного летательного аппарата с фиксированным крылом в реальном времени. Для этой нестационарной задачи идентификация параметров выполнена с помощью нелинейной авторегрессионной нейронной сети. Применение предложенного подхода для настройки параметров нейросети позволило уменьшить среднее значение идентификации параметров.

Четвертая глава посвящена проблеме разработки и исследования гиперэвристик для решения задач аппроксимации множества экстремумов. Здесь

предложена гиперэвристика, осуществляющая выбор и комбинацию базовых эвристик (подходы первой группы), т.к. они не используют в явном виде какую-либо информацию о свойствах целевой функции и пространства поиска, а значит могут применяться для произвольных задач с алгоритмически заданными целевыми функциями. Множество эвристик включает: обнуление пригодности (Clearing), разделение пригодности (Sharing), анализ кластеров решений (Clustering), ограниченную турнирную селекцию (Restricted Tournament Selection, RTS), детерминированное (Deterministic Crowding) и вероятностное (Probabilistic Crowding) вытеснение. Экспериментальное исследование эффективности метода проводилось, в частности, на двух наборах тестовых задач. Первый набор включает 6 задач псевдобулевой оптимизации, которые являются многоэкстремальными (32 глобальных оптимума) и десептивными («обманчивыми»). Экспериментальное исследование метода 3 показало, что несмотря на изменение эффективности отдельных эвристик от задачи к задаче использование гиперэвристики позволяет адаптивно выбирать (комбинировать) базовые подходы, что существенно повышает эффективность решения задачи. Для практической апробации подхода были решены задачи из области поддержки принятия решений и задача проектирования системы на нечеткой логике для решения задач классификации. Задачи поддержки принятия решений включают задачу формирования оптимальной кредитной политики (кредитный портфель) коммерческого банка и задачу управления инвестициями производственного предприятия ОПК. Одним из преимуществ предложенного подхода является возможность формировать способ коллективного принятия решений по нескольким классификаторам для повышения точности классификации.

В *пятой главе* исследована проблема разработки и исследования гиперэвристик для решения задач глобальной оптимизации большой размерности с алгоритмически заданными целевыми функциями. Для работы с двоичным генетическим алгоритмом, позволяющим решать задачи со смешанными переменными была разработана новая эвристика для группировки переменных на основе вероятностного генетического алгоритма оценки распределений (Estimation Of Distribution, EDA). Эксперименты показали, что предложенная эвристика превосходит в среднем по точности нахождения глобального оптимума некоторые известные эволюционные эвристики решения задач глобальной оптимизации большой размерности с алгоритмически заданными целевыми функциями. Предложена новая эвристика (AVS-RG) для адаптивной группировки в компоненты переменного размера, обобщающая метод DECC-G. Эвристика AVS-RG превосходит в среднем по точности нахождения глобального оптимума некоторые известные эволюционные

эвристики решения задач глобальной оптимизации большой размерности с алгоритмически заданными целевыми функциями, однако, как и в других эвристиках, для задач разного типа требуется подбор числа компонент. Множество базовых эвристик для селективной онлайн гиперэвристики решения задач глобальной оптимизации большой размерности содержит случайную динамическую группировку, дифференциальную группировку и дельта-группировку, а также указанные эвристики EDA-GA и AVS-RG. На этом множестве эвристик предложен параллельный ЭА на основе модели островов, который позволяет эффективно распараллеливать вычисления. Для апробации предложенного подхода решены практические задачи. В задаче повышения энергоэффективности диспетчеризации электроэнергии в распределенных энергетических системах целевая функция и ограничения задаются алгоритмически и являются нелинейными, негладкими и недифференцируемыми. По результатам численных экспериментов предложенный метод превзошел все включенные в него базовые эвристики, алгоритм самоадаптивной дифференциальной эволюции SAMODE, а также результаты, ранее полученные другими известными подходами.

В *шестой главе* обобщены результаты диссертационного исследования и сформулирован новый метод решения сложных задач оптимизации на основе предложенных гиперэвристик. Основная идея обобщенного метода заключается в том, что в зависимости от постановки задач оптимизации, требований и ограничений к решению формируется множество используемых базовых эвристик ЭА и алгоритм управления ими в процессе решения конкретной задачи оптимизации. Если в процессе решения были идентифицированы новые свойства задачи, то множество базовых эвристик и процедуры управления ими дополняются. Если же эффективное решение не может быть получено с имеющимися (известными) эвристиками, необходимо конструировать новые базовые эвристики для исследуемой предметной области или задачи. Выбор типа гиперэвристики (онлайн или офлайн) определяется целями решения (однократное решение частной задачи или многократное решение множества задач) и ограничениями на бюджет вычислений целевой функции. В процессе решения конкретной задачи оптимизации можно выделить разные этапы работы алгоритма: исследование пространства поиска, исследование областей притяжения оптимумов, уточнение (популяция сходится) лучшего найденного решения. Отметим, что на каждом этапе решения задачи оптимизации эффективным будет конкретный специализированный алгоритм, а не единственный алгоритм, который является специализированным для задачи в целом. Применение гиперэвристики решает эту проблему, т.к. новый ЭА синтезируется постоянно на каждом шаге решения задачи оптимизации

В *заключении* сформулированы основные выводы и результаты диссертационного исследования. Дается обоснование, что цель диссертационной работы достигнута путем решения поставленных задач.

В *приложениях* представлены данные о результатах численных экспериментов, а также акты об использовании результатов исследования на практике.

Степень достоверности и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Научные положения и результаты, полученные в работе, обоснованы корректностью математической постановки задачи и используемых методов исследования: системного анализа, статистической обработки и анализа данных с применением эволюционных и мягких вычислений. Достоверность научных положений и выводов обеспечивается исследованием свойств разрабатываемых гибридных моделей, а также результатами проведенных экспериментов алгоритмов оптимизации на репрезентативном множестве эталонных задач оптимизации и результатами решения прикладных задач, что подтверждается соответствующими актами об использовании результатов диссертационного исследования.

Основные положения и результаты диссертационного исследования представлялись и прошли всестороннюю апробацию на всероссийских, международных и зарубежных научных и научно-практических конференциях и семинарах.

По теме исследования опубликовано 60 работ, в том числе 20 статей в российских рецензируемых периодических изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертационных исследований, 39 работ в зарубежных изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus, 26 работ в зарубежных изданиях, включенных в международную базу цитирования Web of Science, опубликована глава в издании *Advances in Swarm Intelligence* (LNSC, Springer). В Роспатенте зарегистрированы 24 программы для ЭВМ. Единолично по теме диссертации опубликовано 12 работ. Все работы достаточно полно отражают научные положения, результаты и выводы по работе. Библиографический список из 370 наименований определяет научную базу, которая была использована диссертантом, и которую можно классифицировать как достаточную.

Научная новизна, ценность результатов и выводов для науки и практики

Автором получены теоретические и практические результаты, обладающие научной новизной:

1. Впервые выполнена систематизация способов синтеза эволюционных алгоритмов решения сложных задач глобальной оптимизации с алгоритмически заданными функциями, на основе которой предложена общая методика применения гиперэвристик для синтеза ЭА для решения подобных задач. Это позволяет адаптивно создавать новые эффективные ЭА в зависимости от целей и требований к решению задачи оптимизации.
2. Предложена новая гиперэвристика для синтеза операторов селекции ЭА на основе алгоритма генетического программирования, которая отличается от известных способом кодирования решений и вариантами оценки фитнеса синтезируемых операторов.
3. Впервые предложена селективная онлайн гиперэвристика синтеза ЭА оптимизации в нестационарной среде на базе объединения методов портфолио и адаптации вероятностей на уровне популяции, что позволяет идентифицировать изменения в среде и адаптировать ЭА путем формирования эффективной комбинации эвристик.
4. Предложена селективная гиперэвристика синтеза ЭА идентификации множества экстремумов, содержащая базовые эвристики без использования в явном виде какой-либо информации о свойствах целевой функции и пространства поиска, что дает возможность адаптивно формировать эффективную комбинацию эвристик поддержки разнообразия в популяции на основе анализа скопления решений в областях притяжения оптимумов.
5. Предложены новые эвристики для группировки переменных на основе алгоритма оценки распределений для применения бинарного вероятностного генетического алгоритма в задаче глобальной оптимизации большой размерности, что позволяет сокращать пространство поиска.
6. Впервые предложена селективная онлайн параллельная гиперэвристика синтеза ЭА для задач глобальной оптимизации большой размерности на основе модели островов, где каждый остров (подпопуляция) реализует свою декомпозицию задачи, что позволяет адаптивно управлять процессом оптимизации путем изменения размеров островов.

Практическая значимость заключается в том, что применение предложенных в работе гиперэвристик позволяет с минимальным вовлечением предметного специалиста формировать новые эвристики и строить комбинации эффективных эвристик для решения конкретных задач.

Замечания

1. Несмотря на, заявленную универсальность предлагаемого подхода (как для задач численной, так и для комбинаторной оптимизации) предложенные методы ориентированы больше на проблемы численной оптимизации.
2. При тестировании эффективности разработанных алгоритмов также используются больше тестовые множества для численной оптимизации (практически нет тестовых задач комбинаторной оптимизации типа задачи коммивояжера, укладки рюкзака и т.п.).
3. Не ясно, как определяется пороговое значение θ в формуле (2.14).
4. Не достаточно полно обоснован выбор базовых эвристик множества для оптимизации в нестационарной среде (стр.103 главы 3).
5. Аналогично не достаточно ясно обоснован выбор множества N базовых эволюционных эвристик для мультимодальных задач (стр.145 главы 4) селекция.
6. Не всегда обоснован выбор автором параметров ЭА и методов реализации отдельных операторов ЭА, таких как селекция родительских особей, операторов рекомбинации и мутации, значений вероятностей реализации операторов кроссинговера и мутации и т.п.
7. Недостаточно раскрыто и обосновано использование инструментальных средств при компьютерной реализации разработанных алгоритмов и проводимых автором вычислительных экспериментов, в том числе касающихся эффективности ЭА.

Вышеуказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертационная работа Сопова Е.А. на соискание ученой степени доктора технических наук представляет собой завершенное научное исследование на актуальную тему, выполненное самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, имеют теоретическую и практическую значимость. Выводы и заключения, сделанные автором, являются обоснованными. Результаты диссертации представлены в более чем 60 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, докладывались на отечественных и международных конференциях, в Роспатенте зарегистрированы 24 программы для ЭВМ.

Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют п.4 паспорта специальности 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации.

Автореферат достаточно полно и корректно отражает основное содержание диссертации. Оформление автореферата и диссертации соответствует требованиям ВАК РФ.

Представленная диссертационная работа отвечает требованиям действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Сопов Евгений Александрович - заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии).

Официальный оппонент, профессор
кафедры компьютерных технологий и программной инженерии
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»,
доктор технических наук, профессор

Юрий Александрович Скобцов

6.07.2027

Адрес организации:

190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения»

тел. +7 (812) 710-65-10

адрес электронной почты: ya_skobtsov@list.ru

