

Шварц (Мухлисуллина) Динара Тагировна

**ИНТЕРАКТИВНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ФУНКЦИИ ПРЕДПОЧТЕНИЙ  
ЛИЦА, ПРИНИМАЮЩЕГО РЕШЕНИЕ, В ЗАДАЧЕ  
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации (по отраслям)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре систем автоматизированного проектирования.

Научный руководитель:

**Карпенко Анатолий Павлович**

доктор физико-математических наук,  
доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

**Воронов Евгений Михайлович**

доктор технических наук, профессор,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Серов Владимир Александрович**

кандидат технических наук, доцент,  
Московский государственный университет  
приборостроения и информатики

Ведущая организация:

**ФГБУН ВЦ им. А.А. Дородницына РАН**

Защита диссертации состоится « 1 » октября 2013 г. в 14 час. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д.10, ауд. 613м.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба выслать по указанному адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.02. Т 263-67-53.

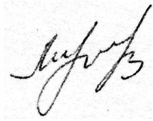
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



И.В. Муратов



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Большинство современных задач принятия проектных решений являются многокритериальными. К таким задачам можно отнести задачи определения оптимальных параметров различных механических, электрических, гидравлических и других подсистем современных высокоразмерных объектов проектирования. При проектировании таких объектов лицо, принимающее решение (ЛПР), не способно самостоятельно выполнить подбор большого числа параметров объектов и оценить противоречивые критерии качества, предъявляемые к ним. В этой связи, в таких компаниях, как НПО «Сатурн», ОКБ «Сухой», ООО «Ладуга», Canop, BMW, Boeing, процесс проектирования технических объектов и систем неразрывно связан с применением методов решения задачи многокритериальной оптимизации (МКО-задачи). Решение таких задач невозможно без использования систем многокритериальной оптимизации (МКО-системы).

Наиболее развитыми отечественными МКО-системами являются MOV1, PFV и IOSO NM. Среди зарубежных МКО-систем выделяем такие системы, как Web-NIPRE, ExpertChoice, MULTIDECISION, IRIS и NIMBUS.

Можно выделить работы в области многокритериальной оптимизации таких авторов, как Л.А. Растринин, О.И. Ларичев, В.В. Подиновский, В.Д. Ногин, И.М. Соболев, Р.Б. Статников, Ю.Г. Евтушенко, А.В. Лотов, И.Н. Егоров, И.Г. Черноруцкий, Е.М. Воронов, Р.Л. Кини, Дж. фон Нейман, Х. Райфа, Т.Л. Саати, Р.Е. Штойер, Д.С. Дайер, А.М. Джоофрион, Ю. Валлениус, С. Зайонц, К. Шитковский, К. Миеттинен, В. Василева и др.

В общем случае, решением МКО-задачи является множество компромиссных решений, называемое множеством Парето. Это множество составляют решения, которые нельзя улучшить одновременно по всем критериям. Выбор окончательного решения на этом множестве осуществляет ЛПР. В этой связи, наиболее перспективными методами решения МКО-задачи являются интерактивные методы. Данные методы позволяют ЛПР в процессе диалога с МКО-системой уточнить постановку решаемой МКО-задачи (наложить ограничения на входные и выходные параметры, переопределить критерии оптимальности), исследовать множество и фронт Парето и осуществить выбор более предпочтительного решения.

Для ЛПР среди известных форм задания предпочтений наиболее простыми и удобными являются бальная оценка решений и их парное сравнение. В диссертации рассматриваются интерактивные методы, использующие именно эти формы задания предпочтений.

На практике интерактивные методы многокритериальной оптимизации используются все еще недостаточно широко. В основном это связано с тем, что

существующие методы требуют от ЛПР большого числа итераций диалога с МКО-системой, что приводит к большим вычислительным затратам и затратам ЛПР на решение МКО-задачи. Диссертация направлена на устранение указанных недостатков методов многокритериальной оптимизации.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью работы является повышение эффективности существующих и разработка нового интерактивного метода многокритериальной оптимизации проектных решений на основе аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решение. Для достижения этой цели в диссертации были поставлены и решены следующие задачи.

1) Выполнить обзор известных методов решения МКО-задачи, выявить достоинства и недостатки этих методов.

2) Разработать методы и алгоритмы решения МКО-задачи, повышающие эффективность процедуры принятия решения и устраняющие недостатки известных методов решения этой задачи.

3) Выполнить программную реализацию предложенных методов и алгоритмов.

4) Исследовать эффективность разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения на тестовых наборах задач многокритериальной оптимизации.

5) Решить прикладные задачи многокритериальной оптимизации с использованием разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения и оценить их эффективность.

**Объектом исследования** являются методы синтеза и анализа проектных решений.

**Предметом исследования** являются интерактивные методы многокритериальной оптимизации на основе аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решение.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы методы многокритериальной оптимизации, эволюционных вычислений, приближенного построения множества Парето, а также методы теории нейронных сетей, нечеткой логики и машины опорных векторов. При решении прикладных МКО-задач были применены методы моделирования систем с распределенными и сосредоточенными параметрами. Реализация программного обеспечения выполнена с использованием методов структурного и объектно-ориентированного программирования.

**Научная новизна работы.** В рамках диссертации получены следующие основные научные результаты.

1) Предложен интерактивный метод многокритериальной оптимизации PREF (PREFeRence) на основе оценок функции предпочтений ЛПР с использованием нейронных сетей.

2) Предложено использование аппарата нечеткой логики и нейро-нечеткой системы для аппроксимации функции предпочтений ЛПП в интерактивном методе PREF.

3) Предложена модификация интерактивного метода многокритериальной оптимизации ВС-ЕМО (Brain-Computer Evolutionary Multiobjective Optimization) на основе эволюционного алгоритма MOEA/D (MutliObjective Evolutionary Algorithm based on Decomposition).

4) Предложена модификация метода ВС-ЕМО на основе кластеризации решений для оценки их ЛПП.

#### **Практическая ценность и внедрение.**

1) Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее интерактивный метод многокритериальной оптимизации PREF. Разработанное программное обеспечение позволяет решать прикладные задачи многокритериальной оптимизации технических объектов, модели которых реализованы в программных комплексах PRADIS, ПА9, SolidWorks.

2) Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, реализующее модифицированный интерактивный метод многокритериальной оптимизации ВС-ЕМО. Разработанное программное обеспечение имеет средства интеграции с программным комплексом ПА9.

3) С помощью разработанного алгоритмического и программного обеспечения решены следующие прикладные задачи:

- двумерная двухкритериальная задача оптимизации механической подсистемы двигателя внутреннего сгорания;
- трехмерная трехкритериальная задача оптимизации геометрии шелевого фильтра;
- восьмимерная трехкритериальная задача оптимизации исполнительного механизма пресса.

Результаты диссертационной работы внедрены в инжиниринговой компании ООО «Ладуга» (г. Москва), а также используются в учебном процессе на кафедре систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н.Э. Баумана.

#### **Связь темы исследования с научными программами.**

Работа выполнена на кафедре систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках следующих проектов:

- «Разработка научных основ построения мехатронных технологических машин на базе многосекционных манипуляторов типа «Хобот» № 2.1.2/10517 (задание Министерства Образования и Науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы, 2009–2011 годы»);

- «Исследование и разработка методов и алгоритмов моделирования динамических процессов в технических системах и объектах, модели которых описываются системами дифференциально-алгебраических уравнений общего вида» (государственное задание НИР № 8.4657.2011).

**Положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие результаты.

1) Интерактивный метод многокритериальной оптимизации PREF на основе оценок функции предпочтений ЛПР.

2) Алгоритмы аппроксимации функции предпочтений ЛПР с использованием нейронных сетей, аппарата нечеткой логики и нейро-нечеткой системы.

3) Модификация интерактивного метода многокритериальной оптимизации ВС-ЕМО на основе эволюционного алгоритма MOEA/D.

4) Модификация метода ВС-ЕМО на основе кластеризации Парето-оптимальных решений ЛПР для оценки их ЛПР.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность выносимых на защиту результатов обосновывается тем, что в теоретических построениях использовались законы и подходы, справедливость которых общепризнанна, а также известный и корректный математический аппарат. Достоверность теоретических положений и выводов подтверждается результатами применения разработанных методов и модификаций при решении прикладных задач многокритериальной оптимизации.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, получены лично соискателем в процессе научных исследований и экспериментов. Из совместных публикаций в диссертацию включен только тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

- 11-ая Молодежная Международная Научно-Техническая Конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2009», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;

- 12-ая Всероссийская Научно-Техническая Конференция «Нейроинформатика – 2010», НИЯУ МИФИ, Москва;

- 12-ая Молодежная Международная Научно-Техническая Конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2010», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва;

- 9-ый Международный Симпозиум «Интеллектуальные системы» (INTELS'2010), 2010, МГТУ им. Н.Э.Баумана и Владимирский государственный университет, Владимир;

- 12-ая Национальная Конференция по Искусственному Интеллекту с международным участием КИИ-2010, Тверь;

- 13-ая Всероссийская Научно-Техническая Конференция «Нейроинформатика – 2011», НИЯУ МИФИ, Москва;

- 13-ая Молодежная Международная Научно-Техническая Конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы 2011», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва.

Основные результаты диссертации представлены в 16 публикациях, в том числе в семи тезисах докладов и в семи статьях, опубликованных в журналах из Перечня ВАК ведущих периодических изданий. Из семи вышеуказанных статей две статьи опубликованы в зарубежных журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов по работе и списка литературы из 82 наименований. Объем работы составляет 123 страницы, включая 44 рисунка и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, указана достоверность и обоснованность, а также практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации является обзорной. В ней приведены определения основных понятий, сформулирована постановка задачи многокритериальной оптимизации.

В самом общем виде, задача проектирования технического объекта сводится к выбору таких входных параметров объекта проектирования  $X$ , которые обеспечат наилучшие значения критериев оптимальности  $\Phi$ , сформированных на основе выходных параметров объекта проектирования  $Y$ . Предполагаем, что математическая модель объекта, определяющая взаимосвязь выходных параметров от входных, известна (рисунок 1). На значения входных и выходных параметров, а также на значения критериев оптимальности накладываются ограничения:  $X \in D_X, Y \in D_Y, \Phi \in \hat{D}_\Phi$ . Здесь  $D_X, D_Y, \hat{D}_\Phi$  – области допустимых значений векторов  $X, Y, \Phi$  соответственно.

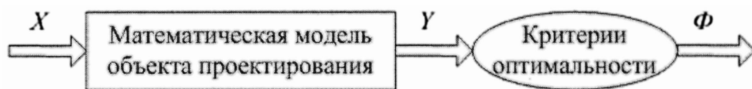


Рисунок 1. Задача проектирования технического объекта в общем виде

Более строго, в МКО-задаче полагаем заданным векторный критерий оптимальности  $\Phi(X) = (\phi_1(X), \dots, \phi_m(X))$  и ЛПР стремится минимизировать каждый их частных (локальных) критериев оптимальности:

$$\min_{X \in D_X \subset R^n} \Phi(X) = \Phi(X^*). \quad (1)$$

Проиллюстрируем постановку МКО-задачи на задаче проектирования исполнительного механизма кривошипного пресса, схема которого представлена на рисунке 2.

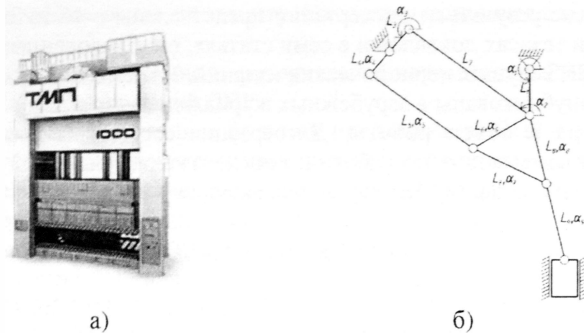


Рисунок 2. Листоштамповочный пресс простого действия модель K4040:  
а – фотография пресса; б – схема исполнительного механизма

Проектировщику необходимо определить такие параметры звеньев механизма (длины  $L$  и начальные угловые положения  $\alpha$  звеньев), чтобы значения критериев оптимальности ( $\phi_1$  – скорость инструмента на рабочем ходе, м/с;  $\phi_2$  – вариация скорости инструмента на рабочем ходе, м/с;  $\phi_3$  – размер определяющий габариты механизма, м) были бы минимальны. Математическая модель, описывающая механизм, состоит из 194-х ОДУ, вектор варьируемых входных параметров состоит из восьми компонентов, векторный критерий оптимальности состоит из трех частных критериев.

Все методы решения МКО-задачи разделены в работе на методы, не учитывающие предпочтения ЛПП, апостериорные методы, априорные методы, интерактивные методы. Проанализированы достоинства и недостатки этих методов. На основании выполненного обзора установлено, что наиболее перспективным классом являются интерактивные методы, в которых ЛПП выполняет оценку предлагаемых МКО-системой альтернатив.

**Во второй главе** предложен и разработан интерактивный метод, основанный на оценках функции предпочтений ЛПП, названный нами метод PREF, а также предложены модификации известного метода ВС-ЕМО, основанного на парном сравнении решений.

**Метод PREF.** В основе метода лежит операция скалярной свертки частных критериев оптимальности  $\varphi(X, \Lambda)$ , где  $\Lambda \in D_\Lambda \subset R^m$  – вектор весовых множителей,  $D_\Lambda = \left\{ \Lambda \mid \lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \right\}$  – множество допустимых значений этого вектора. Способ свертки не фиксируется – это может быть аддитивная свертка, мультипликативная свертка и другие.

При каждом фиксированном векторе  $\Lambda$  метод скалярной свертки сводит решение многокритериальной задачи (1) к решению однокритериальной задачи глобальной условной оптимизации (ОКО-задачи)

$$\min_{X \in D_X} \varphi(X, \Lambda) = \varphi(X^*, \Lambda). \quad (2)$$

В силу ограниченности и замкнутости множества  $D_X$  решение задачи (2) существует.

Если при каждом  $\Lambda \in D_\Lambda$  решение задачи (2) единственно, то условие (2) ставит в соответствие каждому из допустимых векторов  $\Lambda$  единственный вектор  $X^*$  и соответствующие значения частных критериев оптимальности  $\phi_1(X^*), \dots, \phi_m(X^*)$ . Это обстоятельство позволяет нам полагать, что функция предпочтений ЛПР  $\psi(X) \in R^1$  определена не на множестве  $D_X$ , а на множестве  $D_\Lambda$ .

Основная идея метода PREF заключается в построении аппроксимации функции предпочтений ЛПР  $\tilde{\psi}(\Lambda)$  на множестве  $D_\Lambda$  и поиске вектора  $\Lambda^* \in D_\Lambda$ , который максимизирует эту функцию. Более строго, вектор  $\Lambda^* \in D_\Lambda$  находим в результате решения ОКО-задачи

$$\max_{\Lambda \in D_\Lambda} \tilde{\psi}(\Lambda) = \tilde{\psi}(\Lambda^*).$$

Переход из пространства варьируемых параметров  $R^n$ , в пространство весовых множителей  $R^m$ , позволяет упростить поиск наилучшего с точки зрения ЛПР решения, поскольку, как правило  $m \ll n$ .

Ключевой процедурой в методе PREF является аппроксимация функции предпочтений. В результате выполненного в диссертации анализа способов аппроксимации для аппроксимации функции предпочтений выбраны нейронные сети, аппарат нечеткой логики и нейро-нечеткие системы.

Общую схему метода PREF иллюстрируют рисунки 3 и 4.

Метод ВС-ЕМО был разработан профессорами Р. Баттити и А. Пассерини в Университете Тренто (г.Тренто, Италия) в 2009 г. Оригинальный метод ВС-ЕМО позволяет аппроксимировать произвольную функцию предпочтений, не фиксируя заранее ее вид. Также этот метод позволяет учитывать противоречивые и неточные оценки ЛПР. Авторы метода исследовали его эффективность на широком круге задач многокритериальной оптимизации. В рамках диссертации этот метод исследован на другом более современном наборе тестовых задач многокритериальной оптимизации СЕС2009. Основной особенностью этих задач является сложная топология множества Парето.

Наше исследование выявило, что основным недостатком метода ВС-ЕМО является преждевременная стагнация процесса вычислений. В рамках диссертации в результате широкого исследования были установлены причины такого поведения метода ВС-ЕМО.

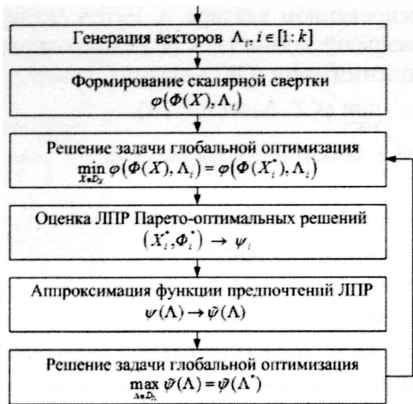


Рисунок 3. Блок-схема метода PREF

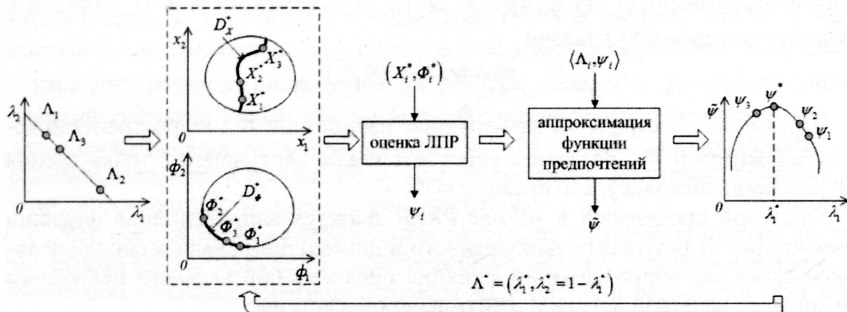


Рисунок 4. Схема метода PREF на примере двумерной двухкритериальной задачи оптимизации:  $k=3$

Первой причиной является отсутствие в генетическом алгоритме NSGA-II механизмов поддержания разнообразия популяции, что приводит к неравномерной аппроксимации фронта Парето. Данный алгоритм используется методом ВС-ЕМО для построения дискретной аппроксимации фронта Парето.

Вторая причина связана с недостатками используемой методом ВС-ЕМО стратегии выбора решений для оценки их ЛПР. Это приводит к тому, что решения, которые оценивает ЛПР, оказываются слишком близко расположенными друг к другу в пространстве критериев, что влечет за собой некорректное построение аппроксимации функции предпочтений ЛПР.

В рамках диссертации предложены две модификации, которые призваны устранить указанные недостатки метода ВС-ЕМО.

- Модификация 1. В диссертации обосновано использование алгоритма MOEA/D вместо генетического алгоритма NSGA-II для построения Парето-аппроксимации. Алгоритм MOEA/D основан на декомпозиции многокритериальной задачи (1) на  $N$  однокритериальных задач

$$\varphi^j(X, \Lambda^j, z^*) = \min_{i \in [1:m]} \{ \lambda_i^j | \phi_i(X) - z_i^* | \},$$

$$\Lambda^j \in D_\Lambda, \quad j \in [1:N], \quad z_i^* = \min_{X \in D_X} \phi_i(X),$$

где  $N$  – размер популяции. Алгоритм MOEA/D использует несколько механизмов поддержания разнообразия популяций и позволяет получить более равномерную аппроксимацию фронта Парето.

В этой же модификации с целью учёта предпочтений ЛППР было предложено использовать функцию приспособленности особей вида

$$\mu^j(X) = (1 - \alpha)\tilde{\psi}(X) + \alpha\varphi^j(X), \quad j \in [1:N], \quad 0 \leq \alpha \leq 1.$$

- Модификация 2. Суть второй модификации заключается в использовании кластеризации решений для оценки их ЛППР. Если в оригинальном методе на первой итерации диалога с ЛППР предоставляемые ему для оценки Парето-оптимальные решения выбираются случайным образом, то в данной модификации выполняется кластеризация всего множества Парето-оптимальных решений и для оценки ЛППР предлагаются центры  $k$  кластеров. На последующих итерациях выбираются  $K$  ( $k < K < N$ ) решений с наилучшим значением функции приспособленности особей, выполняется кластеризация этого множества и ЛППР предлагается оценить центры  $k$  кластеров.

В третьей главе диссертации рассматривается алгоритмическая и программная реализация разработанного метода PREF на языке программирования MATLAB и модифицированного метода BC-ЕМО на языке программирования C++ (рисунки 5 и 6).

С использованием разработанного алгоритмического и программного обеспечения выполнено исследование эффективности предложенного метода и модификаций. В диссертации используется общепринятая методика исследования эффективности методов многокритериальной оптимизации, которая подразумевает два подхода.

В первом подходе в качестве ЛППР выступает эксперт. Эксперт оценивает методы по следующим индикаторам эффективности: простота использования метода; удовлетворенность найденным решением; полезность информации, которую предоставляет метод и другие.

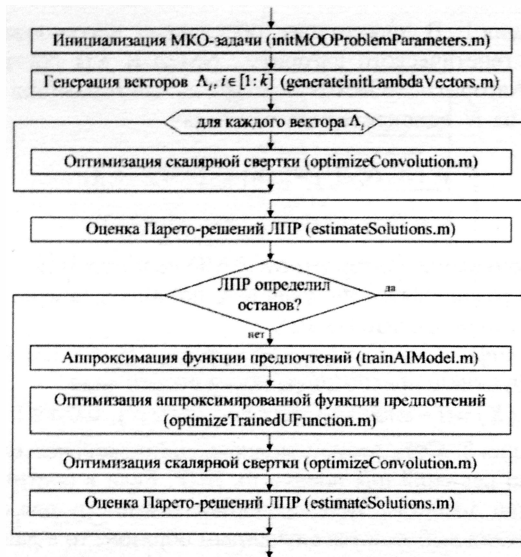


Рисунок 5. Структура алгоритмического и программного обеспечения, реализующего метод PREF

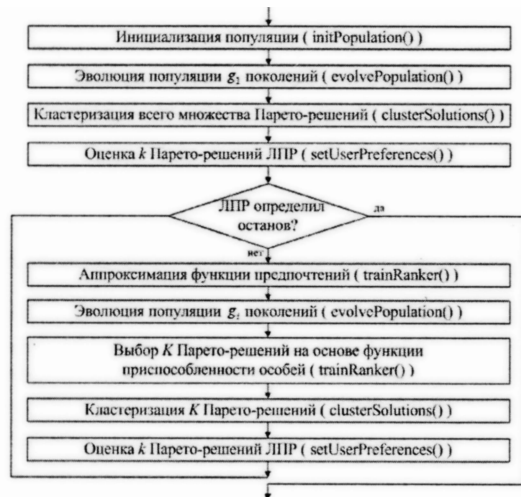


Рисунок 6. Структура алгоритмического и программного обеспечения, реализующего модифицированный метод BC-ЕМО

Второй подход предусматривает использование так называемой истинной функции предпочтений  $V(\Phi)$ , имитирующей ответы ЛПР. Экстремум данной функции называют истинным решением  $\Phi^*$ . В рамках данного подхода в диссертации использованы следующие индикаторы эффективности ( $I_{\sigma}$ ):  $\bar{\varepsilon}_n$  – медианное значение погрешности найденного решения  $\varepsilon_n = \|\tilde{\Phi} - \Phi^*\|$ , где  $\tilde{\Phi}$  – решение, найденное с помощью рассматриваемого метода;  $N_n$  – число итераций диалога с ЛПР;  $N_{\sigma}$  – число вычислений векторного критерия оптимальности  $\Phi$ .

**Первое исследование**, выполненное в диссертации, имеет целью устранение недостатков оригинальной версии ВС-ЕМО и исследование эффективности его модифицированной версии ВС-ЕМО<sup>m</sup>. Исследование метода ВС-ЕМО выполнено на двух тридцатимерных трехкритериальных задачах оптимизации UF8 и UF9 со сложным множеством Парето из современного набора задач многокритериальной оптимизации CEC2009. Для диагностики и выявления причин преждевременной стагнации метода ВС-ЕМО было выполнено четыре эксперимента.

В первом и втором экспериментах были исследованы оригинальный метод ВС-ЕМО (обозначим эту версию как ВС-ЕМО+NSGA-II) и Модификация 1 этого метода (ВС-ЕМО+MOEA/D). Оба эксперимента выполнены без этапа аппроксимации функции предпочтений.

Первый эксперимент продемонстрировал, что при использовании версии ВС-ЕМО+NSGA-II наблюдается преждевременная стагнация процесса вычислений, которая приводит к тому, что окончательное решение оказывается вдали от окрестности истинного решения  $\Phi^*$ . Второй эксперимент продемонстрировал, что версия ВС-ЕМО+MOEA/D позволила значительно сократить погрешность найденного решения в обеих задачах и получить решение в окрестности истинного решения.

В третьем и четвертом экспериментах исследовались версия ВС-ЕМО+MOEA/D и Модификация 2 (ВС-ЕМО<sup>m</sup>) с этапом аппроксимации функции предпочтений.

Третий эксперимент продемонстрировал, что как и следовало ожидать, использование процедуры аппроксимации функции предпочтений приводит к увеличению погрешности найденного решения по сравнению с результатами второго эксперимента. Эксперимент позволил выявить вторую причину стагнации процесса вычислений методов ВС-ЕМО+NSGA-II и ВС-ЕМО+MOEA/D, связанную с недостатками стратегии выбора решений для оценки их ЛПР.

Четвертый эксперимент продемонстрировал, что итоговая версия ВС-ЕМО<sup>m</sup> позволяет сократить погрешность найденного решения в задаче UF8 в четыре раза, в задаче UF9 – в 17 раз. Требуемое число итераций диалога с ЛПР в задаче UF8 сократилось на 18%, в задаче UF9 – на 38%.

**Второе исследование** посвящено сравнению эффективности разработанного метода PREF и метода ВС-ЕМО<sup>m</sup>. Метод PREF использован со следую-

шими средствами аппроксимации функции предпочтений: многослойный персептрон (MLP); нейронная сеть с радиально базисными функциями (RBF); аппарат нечеткой логики (Fuzzy); нейро-нечеткая система (Anfis).

Некоторые результаты исследования сведены в таблицу 1. В таблице приняты следующие обозначения: (а) – двумерная двухкритериальная задача с выпуклым фронтом Парето; (б) – двумерная двухкритериальная задача с разрывным фронтом Парето; (в) – трехмерная трехкритериальная задача с выпуклым фронтом Парето.

Таблица 1.

Результаты сравнения эффективности методов PREF и BC-ЕМО<sup>м</sup>

|     | $I_{\Phi}$                 | PREF      |           |            |            | BC- ЕМО <sup>м</sup> |
|-----|----------------------------|-----------|-----------|------------|------------|----------------------|
|     |                            | MLP       | RBF       | Fuzzy      | Anfis      |                      |
| (а) | $\tilde{\epsilon}_a / N_u$ | 0,017 / 6 | 0,001 / 5 | 0,010 / 35 | 0,002 / 10 | 0,001 / 5            |
|     | $N_{\Phi}$                 | 6600      | 6000      | 24000      | 9000       | 24000                |
| (б) | $\tilde{\epsilon}_a / N_u$ | 0,001 / 5 | 0,001 / 9 | 0,153 / 6  | 0,001 / 5  | 0,001 / 5            |
|     | $N_{\Phi}$                 | 15853     | 24997     | 22412      | 18990      | 24000                |
| (в) | $\tilde{\epsilon}_a / N_u$ | 0,038 / 3 | 0,003 / 4 | 0,025 / 51 | 0,024 / 5  | 0,001 / 8            |
|     | $N_{\Phi}$                 | 8000      | 9000      | 55000      | 10000      | 27000                |

Исследование показало, что при решении задач (а) и (б) метод PREF обеспечивает медианную погрешность найденного решения сопоставимую с методом BC-ЕМО<sup>м</sup>. При использовании метода PREF требуется совершить тоже число итераций диалога с ЛПР, что и в методе BC-ЕМО<sup>м</sup>, но меньшее число вычислений векторного критерия оптимальности  $\Phi$ . При решении задачи (в) метод BC-ЕМО<sup>м</sup> обеспечивает меньшую погрешность найденного решения, по сравнению с методом PREF, но требует большего числа вычислений векторного критерия оптимальности.

**Третье исследование** посвящено сравнительной оценке эффективности метода BC-ЕМО<sup>м</sup> и другого известного современного интерактивного метода многокритериальной оптимизации PI-ЕМО-VF, который также основан на парном сравнении решений.

Исследование выполнено на двух тестовых задачах многокритериальной оптимизации: 12-ти мерная трехкритериальная задача DTLZ23; 14-ти мерная пятикритериальная задача DTLZ25.

Исследование показало, что метод BC-ЕМО<sup>м</sup> по сравнению с методом PI-ЕМО-VF требует меньшего числа вычислений векторного критерия оптимальности  $\Phi$  в задаче DTLZ23 – на 40%, а в задаче DTLZ25 – на 54%. В задаче DTLZ25 метод BC-ЕМО<sup>м</sup>, в сравнении с методом PI-ЕМО-VF, позволяет сократить требуемое число итераций диалога с ЛПР на 55%.

**Четвертая глава** диссертации посвящена практической реализации разработанных методов и модификаций.

- С помощью метода PREF решена двумерная двухкритериальная задача оптимизации механической подсистемы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Для этой цели была разработана модель механической системы ДВС в программном комплексе PRADIS, предназначенном для анализа динамики систем различной физической природы. Разработанная математическая модель представляет собой систему из 185-ти ОДУ. Данная работа выполнена при сотрудничестве с ООО «Ладуга». В качестве ЛПР выступал эксперт в области ДВС. ЛПР потребовалось выполнить семь итераций для нахождения параметров модели, которые по значениям заданных критериев оптимальности наилучшим образом удовлетворяют его предпочтениям.

- Совместно с кафедрой инструментальной техники и технологий (МТ2) МГТУ им.Н.Э. Баумана решена трехмерная трехкритериальная задача оптимизации геометрии щелевого фильтра для очистки жидкостей. Для этой цели была разработана трехмерная параметризованная модель фильтра в программном комплексе SolidWorks. Работа выполнена под руководством д.т.н., проф. Н.Н. Зубкова. Задача была решена методом PREF за девять итераций.

- Совместно с кафедрой технологий обработки металлов давлением (МТ6) МГТУ им. Н.Э. Баумана решена восьмимерная трехкритериальная задача оптимизации исполнительного механизма пресса (рисунок 2). Разработка модели исполнительного механизма пресса в программном комплексе ПА9, предназначенном для моделирования динамики технических систем различной физической природы, выполнена д.т.н., проф. Е.Н. Складчиковым, под руководством которого и выполнена эта работа. Разработанная модель представляет собой систему из 194-х ОДУ. Задача была решена методом ВС-ЕМО<sup>м</sup> за семь итераций. На рисунке 7 в проекции на плоскость  $O\phi_1\phi_2$ , представлены решения, предлагаемые ЛПР для оценки. Стрелки на этом рисунке условно демонстрируют навигацию ЛПР по фронту Парето.

Все эксперты, выступавшие в роли ЛПР, отметили удобство методов PREF и ВС-ЕМО<sup>м</sup>, способность этих методов находить удовлетворительное решение за малое число итераций. Важно, что методы дополнительно позволяют ЛПР исследовать фронт и множество Парето решаемой МКО-задачи.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1) Выполнен сравнительный анализ известных методов решения задачи многокритериальной оптимизации, выявлены их достоинства и недостатки, а также определены области их применимости.

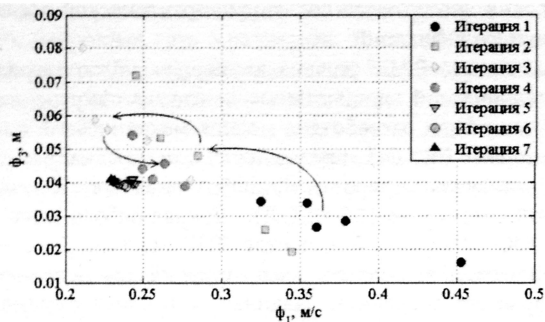


Рисунок 7. Решения, предлагаемые ЛПР для оценки в задаче оптимизации исполнительного механизма пресса

2) Разработан интерактивный метод PREF, основанный на оценках функции предпочтений ЛПР с использованием нейронных сетей, аппарата нечеткой логики и нейро-нечеткой системы. Метод предусматривает простую и удобную форму диалога ЛПР с МКО-системой.

3) Предложены модификации известного интерактивного метода ВС-ЕМО, основанного на парном сравнении проектных решений: модификация на основе эволюционного алгоритма MOEA/D; модификация на основе кластеризации решений для оценки их ЛПР. Предложенные модификации получили объединяющее название ВС-ЕМО<sup>м</sup>.

4) Выполнена алгоритмическая и программные реализации разработанного метода PREF на языках программирования MATLAB, Python, C++. Реализации дополнительно имеют средства интеграции с программными комплексами ПА9, PRADIS и SolidWorks соответственно.

5) Выполнена алгоритмическая и программная реализация метода ВС-ЕМО<sup>м</sup> на языке программирования C++. Разработанное программное обеспечение имеет средства интеграции с программным комплексом ПА9.

6) Продемонстрирована эффективность разработанного методического, алгоритмического и программного обеспечения при решении тестовых задач многокритериальной оптимизации.

7) Продемонстрирована эффективность разработанного методического, алгоритмического и программного обеспечения при решении двумерной двухкритериальной задачи оптимизации механической подсистемы ДВС, трехмерной трехкритериальной задачи оптимизации геометрии щелевого фильтра, восьмимерной трехкритериальной задачи оптимизации исполнительного механизма пресса.

Результаты исследования показывают высокую эффективность предложенных и разработанных в диссертации методов, модификаций, алгоритмов и программного обеспечения для решения сложных современных МКО-задач.

Важной особенностью предложенных методов является малое число итераций диалога ЛПП с МКО-системой.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Шварц Д.Т. Интерактивные методы решения задачи многокритериальной оптимизации. Обзор // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2013. №4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/547747.html> (дата обращения: 10.05.2013).
2. Карпенко А. П., Мухлисуллина Д. Т., Цветков А. А. Многокритериальная оптимизация геометрии щелевого фильтра для очистки жидкостей. // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2013. №2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/539055.html> (дата обращения: 10.03.2013).
3. Karpenko A.P., Moor D.A., Mukhlisullina D.T. Multicriteria Optimization Based on Neural Network, Fuzzy and Neuro-Fuzzy Approximation of Decision Maker's Utility Function // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2012. Vol. 21, no. 1. P. 1-10.
4. Карпенко А.П., Мухлисуллина Д.Т., Овчинников В.А. Нейросетевая аппроксимация функции предпочтений лица, принимающего решения, в задаче многокритериальной оптимизации // Информационные технологии. 2010. №10. С. 2-9.
5. Карпенко А.П., Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе нейро-нечеткой аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решения // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2010. №6. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/143964.html> (дата обращения 02.07.2012).
6. Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Анализ эффективности различных сверток критериев оптимальности в задачах многокритериальной оптимизации // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2010. №4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/141623.html> (дата обращения 02.07.2012).
7. Karpenko A.P., Mukhlisullina D.T., Ovchinnikov V.A. Multicriteria Optimization Based on Neural Network Approximation of Decision Maker's Utility Function // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. Vol. 19, no. 3. P. 227-236.
8. Мухлисуллина Д.Т. Исследование погрешности нейросетевой аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решения, в задаче многокритериальной оптимизации // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2010. №3. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/138398.html> (дата обращения 02.07.2012).
9. Карпенко А.П., Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе нечеткой аппроксимации функции предпочтений лица,

принимающего решения // Наука и образование: электронное научное издание. Инженерное образование. 2010. №1. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/135375.html> (дата обращения 02.07.2012).

10. Карпенко А.П., Моор Д.Т., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе аппроксимации функции предпочтения лица, принимающего решение // Научные технологии и интеллектуальные системы 2011: Тез. докл. 13-ой Молодежной Научно-Технической Конференции. М., 2011. С. 58-61.

11. Карпенко А.П., Моор Д.Т., Мухлисуллина Д.Т. Нейросетевая, нечеткая и нейро-нечеткая аппроксимация в задаче многокритериальной оптимизации // Нейроинформатика-2011: Тез. докл. 13-ой Всероссийской Научно-Технической Конференции. М., 2011. Ч.1. С. 60-69.

12. Карпенко А.П., Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе нейросетевой, нечеткой и нейро-нечеткой аппроксимации функции предпочтения лица, принимающего решение // Конференция по Искусственному Интеллекту КИИ-2010: Тез. докл. 12-ой национальной конференции. 20.09-24.09 2010 г., г. Тверь. М., 2010. Том 1. С. 113-121.

13. Карпенко А.П., Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решение, с помощью нейронных сетей и аппарата нечеткой логики // Интеллектуальные системы (INTELS'2010): Тез. докл. 9-ого международного симпозиума. 28.06-02.07 2010 г., г. Владимир. М., 2010. С. 465-468.

14. Карпенко А.П., Моор Д.А., Мухлисуллина Д.Т. Многокритериальная оптимизация на основе нечеткой аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решения // Научные технологии и интеллектуальные системы 2010: Тез. докл. 12-ой Молодежной Международной Научно-Технической Конференции. М., 2010. С. 94-98.

15. Карпенко А.П., Мухлисуллина Д.Т., Овчинников В.А. Многокритериальная оптимизация на основе нейросетевой аппроксимации функции предпочтений лица, принимающего решение // Нейроинформатика – 2010: Тез. докл. 12-ой Всероссийской научно-технической конференции. М., 2010. Ч. 1. С. 147-156.

16. Карпенко А.П., Мухлисуллина Д.Т., Овчинников В.А. Разработка математической модели двигателя внутреннего сгорания с использованием программного комплекса PRADIS // Научные технологии и интеллектуальные системы 2009: Тез. докл. 11-ой Молодежной Международной Научно-Технической Конференции. М., 2009. С. 49-52.