

Судаков Владимир Анатольевич

**МЕТОДОЛОГИЯ УНИФИЦИРОВАННОЙ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ВЫСОКОРАЗМЕРНЫХ
ЗАДАЧ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(информатика, управление и вычислительная техника)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук

Москва — 2014 год

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы обработки информации и управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

- Научный консультант — доктор технических наук, профессор
Хахулин Геннадий Федорович
- Официальные оппоненты — доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
Москатов Генрих Карлович
научный консультант, ФГУП «ЦНИИ Центр»
- доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Щербинин Виктор Викторович,
начальник научно-технического отделения,
заместитель главного конструктора ОАО «ЦНИИАГ»
- доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ,
Пушкарёв Юрий Александрович,
профессор кафедры, Филиал Военной академии РВСН им.
Петра Великого (г. Серпухов)
- Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Защита состоится « 10 » ноября 2014 года в 10 часов на заседании Диссертационного Совета Д 212.125.11 Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, Ученый совет МАИ

Автореферат разослан _____

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, Ученый совет МАИ

Учёный секретарь

Диссертационного Совета Д 212.125.11

к.т.н., доцент

_____ Горбачев Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в наиболее наукоемкой отрасли производства - *ракетно-космической отрасли (РКО)* существует ряд актуальных задач, требующих применения *систем поддержки принятия решений (СППР)*. Более того, новые задачи такого рода возникают постоянно. Задачи, решаемые в РКО с помощью СППР, характеризуются *рядом особенностей*:

- *Во-первых*, разнородностью объектов для которых ставятся эти задачи и разноплановостью возникающих при этом алгоритмов их решения. Это и процесс проектирования с выбором лучших вариантов разрабатываемой системы; и процесс планирования программ выполнения комплекса работ с выбором наиболее перспективных из них; и очередность их выполнения; и применение сложных организационно-технических систем с задачами оценки эффективности функционирования составных частей и принятием решений по повышению этой эффективности; и задачи оперативного управления сложными техническими объектами с выбором рациональных вариантов решений.
- *Во-вторых*, разнородностью математического аппарата, применяемого при решении поставленных задач. Это математические модели: оптимального планирования, управления сложными динамическими объектами, многокритериальной оценки эффективности технических и организационных решений.
- *В-третьих*, особенностью коллектива людей во главе с лицом, принимающим решения (ЛПР), обладающим определенным опытом, учет которого необходим в создаваемой СППР.

Перечисленные выше особенности приводят, в конечном итоге, к необходимости создания *специализированной СППР*, ориентированной на решение данной задачи.

Несмотря на разнообразие рассматриваемых в работе задач ракетно-космической отрасли, в целом они имеют следующие *общие черты*:

- наличие ряда альтернативных вариантов возможных решений, из которых необходимо произвести выбор;
- векторный характер критерия оценки эффективности решений с высокой размерностью этого вектора (в некоторых задачах – десятки, а иногда и сотни компонентов);
- разнородность шкал отдельных компонентов векторного критерия, часть из которых имеет количественный, а часть - лексический (качественный) характер;
- реализация решений является, как правило, ресурсоемкой (в том числе, то такому важному ресурсу, как время) и принятие неэффективных решений связано с большими потерями;
- *создание самой специализированной СППР* в свою очередь требует значительных ресурсов и привлечения высококвалифицированных разработчиков.

Существует развитая теория принятия решений с многочисленными методами и методиками,

обладающими спектром достоинств и недостатков в определенных условиях применения. Есть достаточно много работ, связанных с методами многокритериальной оценки альтернатив. Это работы О.И. Ларичева, А.Б. Петровского, В.Д. Ногина, В.В. Подиновского, А.В. Лотова, Б.Г. Литвака, Р.Б. Статникова, В.В. Бомаса, В.Н. Козлова, С.А. Пиявского, Т. Саати, Р. Кини, Х. Райфа, Ю.Б. Гермейера и других авторов в России и за рубежом. Компьютерная поддержка решений на базе субъективного подхода активно развивается в ИПУ РАН Э.А. Трахтенгерцем и его учениками.

Попытки создания полностью универсальной СППР оказались неэффективными. Разработанные и реализованные СППР, во-первых, не опираются на весь спектр имеющихся методов и методик, во-вторых, не позволяют учесть опыт коллектива, осуществляющего решение задачи.

Не является продуктивным и создание специализированной СППР для каждой возникающей задачи, так сказать «с нуля». Это, как уже говорилось, с одной стороны, требует значительных затрат ресурсов и времени, привлечения квалифицированного коллектива разработчиков. С другой стороны, создание СППР должно опережать процесс решения самой задачи, для которой она разрабатывается, иначе ее использование может оказаться как минимум неэффективным, а то и вовсе бесполезным.

Решение данной проблемы может лежать в плоскости *создания методологии унифицированной разработки специализированной СППР и поддерживающих ее инструментальных средств*. Такая методология должна:

- основываться на всем спектре имеющихся методов теории принятия решений;
- позволить учесть опыт конкретного коллектива экспертов и ЛПР, ответственных за решение конкретной задачи;
- базироваться на развитых инструментальных средствах поддержки процесса создания СППР.

Таким образом, актуальной научно-технической проблемой является создание методологии унифицированной разработки систем поддержки многокритериальных решений и поддерживающих ее инструментальных средств, позволяющих объединить в создаваемых СППР комплекс существующих методов, эффективно (быстро и с меньшими затратами ресурсов) настраивать их на решение разнообразных конкретных высокоразмерных многокритериальных задач ракетно-космической отрасли.

Объектом исследования является процесс разработки систем поддержки принятия решений в многокритериальных высокоразмерных задачах оценки, ранжирования, выбора и оптимизации.

Предмет исследования – это унификация процесса разработки систем поддержки принятия решений, позволяющих учитывать предпочтения пользователя и работающих с векторным

критерием высокой размерности.

Цели и задачи работы. Целью диссертации является создание методологии унифицированной разработки систем поддержки принятия многокритериальных решений в высокоразмерных задачах ракетно-космической отрасли и инструментальных средств поддержки этой методологии.

Для достижения выбранной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Проанализировать и обобщить имеющийся опыт по созданию универсальных, а также специализированных СППР для нужд ракетно-космической отрасли, в том числе:
 - 1.1. провести анализ возможностей универсальных СППР, представленных на коммерческом рынке;
 - 1.2. выполнить мониторинг иерархических структур при целевом развитии глобальной навигационной системы, в частности, многокритериальную оценку и ранжирование навигационных приемников;
 - 1.3. провести контроль сил и средств космических войск с учетом их иерархической структуры и сформировать предложения по управляющим воздействиям, улучшающим значения целевых показателей войсковых подразделений.
2. На основе опыта и анализа решения задач, указанных выше, необходимо было:
 - 2.1. разработать новый гибридный метод построения функции предпочтений (ФП), позволяющий выявлять систему ценностей ЛППР с учетом зависимостей по предпочтениям между компонентами векторного критерия и при высокой размерности векторного критерия. В том числе, и метод минимизации информационных потерь при дискретизации шкал критериев;
 - 2.2. создать методологию унифицированной разработки специализированных СППР и инструментальные средства ее поддержки, в том числе:
 - 2.2.1. создать принципы проектирования СППР, позволяющие работать с векторным критерием высокой размерности, объединяющие различные методы теории принятия решений;
 - 2.2.2. разработать унифицированную концептуальную модель реляционной базы данных СППР, инвариантную по отношению к предметной области, позволяющую проводить настройку на конкретную задачу без изменения структуры базы данных;
 - 2.2.3. разработать каркасный подход к трехуровневой архитектуре программного обеспечения СППР, позволяющий проводить быструю и эффективную адаптацию оболочки СППР к решаемой задаче с учетом предпочтений ЛППР, а также проводить быстрое внедрение СППР с интеграцией в информационную среду предприятий ракетно-космической отрасли;

2.2.4. создать набор рекомендаций, обеспечивающих получение качественного программного обеспечения СППР при решении конкретных задач;

2.2.5. разработать инструментальные средства поддержки процесса управления разработкой СППР, в том числе имитационную модель для получения вероятностно-временных оценок производительности сотрудников занятых в разработке ПО СППР.

3. Для достижения выбранной цели, наряду с перечисленным в п.п. 1-2, необходимо так же на примере СППР «КОСМОС» показать *эффективность применения созданной методологии* унифицированной разработки СППР. Методологии, решающей актуальную многокритериальную задачу ракетно-космической отрасли по формированию программ космических экспериментов, проводимых на российском сегменте Международной Космической Станции.

Научная новизна. Интеграция множества методов теории принятия решений в единую СППР определяет следующие новые теоретические результаты:

- Создана методология унифицированной разработки систем поддержки принятия многокритериальных решений в высокоразмерных задачах ракетно-космической отрасли и инструментальные средства поддержки этой методологии, в том числе: принципы проектирования СППР, унифицированная концептуальная модель БД СППР, каркасный подход к трехуровневой архитектуре программного обеспечения СППР, набор рекомендаций по созданию ПО СППР. Данная методология позволяет эффективно (быстро, с минимальными затратами ресурсов и качественно) создавать прикладные СППР.
- Создан новый гибридный метод формирования функций предпочтений, являющийся частью общей методологии, существенно развивающий метод функций предпочтений в СППР DSS/UTES, и позволяющий выявлять систему ценностей ЛПР по компонентам высокоразмерного векторного критерия с учетом зависимостей по предпочтениям между этими компонентами, новизна которого заключается в двухэтапной процедуре оценки альтернатив во всех точках пространства критериев:
 - 1) декомпозиция всего критериального пространства на подобласти и определение отношения доминирования между ними качественными методами теории принятия решений (Парето-оптимальность, качественный учет важностей Подиновского, UTES, ЗАПРОС);
 - 2) применение количественных методов скаляризации векторного критерия внутри сформированных подобластей.

В составе гибридного метода разработана процедура дискретизации шкал критериев путем минимизации информационных потерь.

Эффект от использования метода заключается в:

- 1) расширении возможностей работы с векторным критерием высокой размерности,
- 2) сокращении времени формирования функции предпочтений ЛПР,
- 3) возможности учета зависимости по предпочтениям,
- 4) отсутствии необходимости оцифровки качественных показателей,
- 5) уменьшении информационных потерь при многоуровневом агрегировании критериев.

- На основе методологии унифицированной разработки СППР создана СППР «Космос», с помощью которой решена актуальная задача автоматизации планирования научно-прикладных исследований (НПИ) в пилотируемой космонавтике. В составе СППР «Космос» разработан метод формирования и оптимизации планов НПИ на базе локальной стратегии поиска.

Практическая значимость работы. Методология унифицированной разработки позволяет достичь высокой эффективности процесса создания СППР, обеспечивая при относительно небольших затратах ресурсов и времени своевременную поддержку принятия многокритериальных решений.

Созданные автором СППР, опыт разработки которых использовался для формирования методологии, имеют самостоятельное практическое значение:

1. Разработка СППР «Космос», внедренная в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), используемая для ранжирования космических экспериментов и формирования программ НПИ.
2. Разработка СППР «ГЛОНАСС», созданная по заказу ОАО «Российские космические системы», позволяющая производить мониторинг и оценку управленческих решений при комплексном целевом развитии ГЛОНАСС.
3. Разработка «Автоматизированной системы контроля состояния сил и средств и поддержки управляющих решений (АСКУ)», созданная в интересах Главного испытательного центра испытаний и управления космическими средствами (ГИЦИУ КС). АСКУ использовалась для оценки войсковых подразделений космических войск.
4. Разработка СППР DSS/UTES, инвариантной по отношению к предметной области, которая решала задачи выбора полевых позиционных районов размещения ракет, систем спутниковой связи, навигационных приемников и используется при проведении лабораторных, курсовых и дипломных работ кафедры 302 «Автоматизированные системы обработки информации и управления» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

5. Разработка Автоматизированной системы мониторинга муниципальных образований (АСМ МО), которая эксплуатировалась в Министерстве по делам федераций, национальной и миграционной политики Российской Федерации, а также в ряде городов: Иваново, Псков, Печоры, Дзержинский. АСМ МО использовалась для мониторинга и комплексной оценки эффективности развития муниципальных образований на региональном, областном и федеральном уровнях.

Методы исследования. В диссертации используются современные методы теории принятия решений, в частности методы многокритериального анализа решений: взвешенная сумма, мультипликативная свертка, идеальная точка, метод ЗАПРОС академика О.И. Ларичева, Парето-оптимальность, качественный учет важностей критериев В.В. Подиновского. Эти методы позволили создать методику выявления системы ценностей ЛПР с учетом зависимостей по предпочтениям между компонентами векторного критерия. Кроме того, использован метод дискретной оптимизации на базе локальной стратегии поиска изложенный в работах Г.Ф.Хахулина. Созданный каркасный подход к разработке СППР базируется на принципах расширяемого программного обеспечения М.М. Горбунова-Посадова.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методология унифицированной разработки СППР и инструментальные средства ее поддержки включая: принципы проектирования СППР, унифицированную концептуальную модель БД, каркасный подход к 3-х уровневой архитектуре программного обеспечения СППР, набор рекомендаций по обеспечению качества программирования СППР. Предложенная методология унифицированной разработки СППР позволяет повысить скорость адаптации СППР под требования пользователя, снижает затраты на внедрение и сопровождение СППР, облегчает интеграцию СППР с другими информационными системами.
2. Гибридный метод построения функций предпочтений, позволяющий интегрировать качественные и количественные методы на едином критериальном пространстве. Метод позволяет задавать предпочтения в высокоразмерном пространстве критериев, при этом сохраняется зависимость по предпочтениям между компонентами векторного критерия и учитывается влияние небольших изменений по непрерывным показателям на итоговую предпочтительность альтернатив. Метод позволяет определить предпочтения во всех точках критериального пространства и в дальнейшем проводить оценку произвольного количества альтернатив в автоматическом режиме. Частью гибридного метода является процедура дискретизации шкал критериев, минимизирующая информационные потери. Для этого проведена формализация задачи максимизации энтропии обобщенных оценок альтернатив, разработан алгоритм решения оптимизационной задачи методом динамического

программирования.

3. Результаты применения созданной методологии унифицированной разработки СППР в задаче формирования программ космических экспериментов (КЭ) проводимых на российском сегменте Международной Космической Станции. На основе методологии была создана СППР «КОСМОС». Она размещена в сети интернет по адресу <http://knts.tsniimash.ru/DSS/>. Открытые исходные тексты СППР «КОСМОС» опубликованы на сайте <https://code.google.com/p/microgravity/>. С помощью гибридного метода была проведена оценка критерия «Значимость КЭ», информационные потери для критерия «Прикладной эффект КЭ» были снижены на 11%. Разработка СППР «Космос» заняла около года. Применение методологии унифицированной разработки позволило сократить сроки создания СППР «Космос» примерно в 3 раза.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на научных семинарах: «Фундаментальные и прикладные космические исследования» ИКИ РАН (Москва, 2012); 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (Мюнхен, 2013); третья конференция «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России» (Саров, 2014); семинар «Казначейская система исполнения бюджета и её модели» (Москва, 2002); заседание Координационного научно-технического совета Федерального космического агентства по программам научно-прикладных исследований и экспериментов на пилотируемых космических комплексах (Королев, 2012); семинар по искусственному интеллекту кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления» МАИ (Москва, 2000 г.). Материалы диссертации представлялись на следующих конференциях: «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 1999, 2002, 2008, 2011); конференция студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (Таганрог, 2000); межвузовская научно-техническая конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (Москва, 2001); молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва, 2012); Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2012); Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2013), Международная конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2013).

Работа поддержана Грантом Президента Российской Федерации № МК-5232.2007.9, грантом РФФИ № 3-01-00895 А, Госконтрактом № (105-1313-2011)-1313/140-2012-1 (№ гос. регистрации У92182), НИР «Комплекс – МАИ», НИР «ПРОСТОР-Р».

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 2-х монографиях, 10-ти научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК. В РОСПАТЕНТе

зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Помимо этого, результаты опубликованы в других журналах, сборниках статей и трудах конференций на русском и английском языках, общее число научных публикаций — 34.

Личный вклад. Все основные результаты, изложенные в диссертации, включая постановки задач и их алгоритмические решения и созданное программное обеспечение, получены автором лично или выполнены под его научным руководством и при непосредственном участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, пять глав, заключение и список используемой литературы. Работа состоит из 300 страниц, из них основной текст 249 страниц, включая 131 рисунок, 21 таблицу и список литературы, содержащий 187 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности выбранной автором темы диссертации, сформулирована цель работы, аргументирована ее научная новизна и практическая ценность, а также в сжатом виде изложено содержание глав диссертации.

В первой главе рассмотрены основные методы многокритериального анализа альтернатив и СППР, созданные по принципу оболочек. Исследуются их достоинства и недостатки. В том числе, исследованы методы: взвешенная сумма, мультипликативная свертка, свертка Гермейера, метод идеальной точки, медиана Кемени, метод последовательных уступок, оптимальность по Парето, качественный учет важностей критериев В.В.Поддиновского, Метод Анализа Иерархий, Метод ЗАПРОС, функции полезности, функции предпочтений в DSS/UTES, ПРИНН.

Проанализированы простота и трудоемкость ввода и редактирования системы ценностей ЛПР, выявлены границы применимости методов. Рассмотренные методы можно разбить на 2 группы. Первая группа – это качественные методы, которые позволяют работать с лексическими критериями без оцифровки, но они не позволяют работать с высокоразмерным критерием. Вторая группа – это количественные методы, требующие оцифровки лексических критериев и не имеющие возможности учесть зависимости критериев по предпочтениям.

Для работы с высокоразмерным критерием подходит только Метод Анализа Иерархий. Однако в работах В.В. Поддиновского показано, что в некоторых задачах он может давать некорректный результат.

Остальные методы в теории не ограничивают размерность критериального пространства, но на практике обычно не применимы более чем к 7 ± 2 критериям. Как показано в работах Г. Саймона - это обусловлено особенностями человеческого мозга по анализу больших информационных массивов. В качественных методах, например, при Парето-оптимальности, на практике, при большом количестве критериев недоминируемых альтернатив оказывается достаточно много.

Разработчики СППР не должны настаивать на выборе какого - либо одного метода. Главное, чтобы программная реализация СППР содержала инструментарий для быстрой

интеграции методов, которые необходимы ЛПР.

Среди СППР, созданных по принципу оболочек, можно выделить следующие системы, которые представлены на коммерческом рынке и успешно эксплуатируются:

- Expert Choice – система, созданная при участии видного американского ученого Т.Саати, автора метода анализа иерархий, и получившая широкое распространение. Expert Choice работает по методу анализа иерархий. Для попарного сравнения критериев широко используются диаграммы в виде кругов и столбцов. В СППР Expert Choice 2000 существует возможность присоединения источника ODBC для доступа к реляционной БД.
- Super Decisions - в основе системы лежит метод аналитических сетей (МАС) – обобщение метода анализа иерархий.
- Criterium Decision Plus – американская СППР. Позволяет работать как по методу анализа иерархий, так и с использованием многомерной теории полезности. Интерфейс программы во многом похож на интерфейс Expert Choice.
- Decision Lens - в основе системы лежит метод анализа иерархий.
- ИАС “ОЦЕНКА и ВЫБОР” – разработка отечественных ученых Д.А. Абдрахимова, А.И. Иоффина, применяет метод взвешенной суммы и идеальную точку, позволяет строить иерархию показателей и визуализировать оцениваемые решения.
- «Быстрый прототип» - работает только в среде MS Excel, позволяет учитывать мнение нескольких экспертов. Проводит ранжирование альтернатив с помощью метода анализа иерархий. Открытость СППР «Быстрый прототип» достигается за счет доступности всего исходного текста, написанного на Visual Basic for Application.
- DASS – отечественная разработка, использующая метод качественного учета важностей по отдельным компонентам векторного критерия В.В. Подиновского.
- FEASIBLE GOALS – программное обеспечение решения линейных многокритериальных задач оптимизации, использует метод А.В. Лотова для визуализации границы Парето.
- ПК MOVI – программный комплекс, используемый для постановки и решения задач многокритериальной оптимизации в интерактивном режиме, использует методику Р.Б. Статникова.
- Web-HIPRE – система, предназначенная для решения многокритериальных задач методами анализа иерархий и теории полезности, разработана в Финляндии, ориентирована на работу в сети Интернет.

Как показал проведенный анализ, автоматизированная поддержка решений в многокритериальных задачах разрабатывается достаточно активно. Однако можно указать на ряд общих, характерных для многих систем, недостатков.

Большинство СППР реализует какой-либо один метод свертки векторного критерия из

множества известных и, как правило, это метод взвешенного суммирования. Большинство СППР не может работать с лексическими показателями. Для них требуется предварительная оцифровка, т.е. перевод в количественную шкалу. Однако для ЛПР затруднительно высказывать количественные суждения о лексических переменных. Большинство СППР не позволяют учитывать зависимость показателей по предпочтениям.

Большинство СППР не являются открытыми (их исходные тексты не опубликованы в открытых источниках и не могут использоваться и дорабатываться сторонними разработчиками), не имеют специфицированной структуры базы данных, что затрудняет интеграцию их с внешними приложениями для получения и ввода данных об оцениваемых альтернативах и выгрузки результатов поиска рационального решения.

Достаточно редко встречаются СППР, ориентированные на Web технологии. СППР в рассматриваемых задачах ракетно-космической отрасли, является многопользовательской системой (эксплуатируется коллективом операторов, экспертов, аналитиков, администраторов, ЛПР). Большинство новых разработок в области многопользовательских систем сейчас ориентированы на Web технологии. Они позволяют минимизировать затраты на настройку и сопровождение рабочих станций, лучше масштабируются при увеличении вычислительной нагрузки, упрощается организация прав доступа.

Альтернативные технологии толстый клиент – сервер БД, все еще достаточно распространены, однако число программистов, владеющих такими технологиями, неуклонно сокращается, поэтому велики риски в ближайшем будущем не найти специалистов по ним.

Рассмотрим оболочку СППР DSS-UTES, идеология которой создана коллективом сотрудников МАИ под руководством проф. В.В. Бомасом, а программное, алгоритмическое и информационное обеспечение разработано автором.

СППР DSS-UTES предназначена для поддержки многокритериальных решений в сложной информационной среде. Оригинальность системы заключается в процедуре выявления предпочтений ЛПР. При этом предполагается, что, рассматривая значения двух совокупностей показателей, пользователь всегда может сказать, какая из них, с его точки зрения, предпочтительнее, или же они равноценны. Весьма существенно, что эта процедура не требует от него количественных оценок степени предпочтений, что всегда затруднительно, достаточно лишь их сопоставления. В системе DSS-UTES такие сопоставления выполняются на плоских (двумерных) сечениях функции предпочтений. Это делается следующим образом.

Из множества введенных показателей ЛПР выбирает любые два (например, 1 и 2), которые условимся называть активными. Желательно, но не обязательно, чтобы они обладали наибольшим числом градаций или же представлялись ЛПР наиболее важными. Оставшиеся N-2 показателей - пассивные.

Активные показатели образуют решетку, содержащую $q_1 * q_2$ клеток. Каждая клетка отражает определенную комбинацию значений активных показателей. Пользователь должен расставить свои предпочтения на этой решетке. Для этого ему надо раскрасить клетки в различные оттенки одного цвета, который он может выбрать по своему вкусу. В системе по умолчанию принята черно-белая цветовая шкала. Принято также, что клетка, имеющая более светлый оттенок, предпочтительнее, чем та, что темнее. Перед раскрашиванием плоскости активных критериев пользователь должен назначить значения всех пассивных показателей, при которых он будет производить раскраску. По окончании раскрашивания пользователь изменяет значение одного из пассивных показателей и производит раскраску снова. И такая процедура должна повторяться до тех пор, пока не будут определены предпочтения на всех двумерных сечениях, соответствующих всем возможным комбинациям значений пассивных показателей. Эта процедура позволяет учесть зависимость показателей по предпочтениям. Однако с возрастанием размерности увеличивается информационная нагрузка на ЛПП. Уже для 4 критериев с 5 градациями нужно раскрасить $5^4=625$ ячеек.

Данная процедура требует дискретизации шкал непрерывных критериев, что приводит к нечувствительности изменений в пределах одной градации, кроме того количество оттенков серого цвета, которые может различать ЛПП ограничено, что не позволяет раскрашивать в разные цвета все комбинации значений критериев и ведет к снижению точности оценки. На практике, в одну градацию альтернативы попадают достаточно часто.

К достоинствам СППР DSS/UTES следует отнести то, что после ввода предпочтений система оценивает и ранжирует альтернативы без участия ЛПП практически мгновенно.

Основные модули СППР DSS/UTES написаны на языке C++ и реализованы как COM компоненты. COM допускает реализацию нескольких объектов с одинаковыми интерфейсами. Эта особенность COM позволяет реализовать ряд компонентов, применяемых для свертки векторного критерия различными способами и управляемых через типизированный интерфейс. Например, метод парных сравнений критериев был написан на Delphi и подключен через COM интерфейс. Ввод альтернатив и вывод результатов ранжирования альтернатив реализован на Visual Basic for Application в среде MS Excel через интерфейс OLE-автоматизации.

В резюме первой главы сделаны следующие выводы:

Существует большое число методов решения многокритериальных задач. Они различаются:

- подходами, с помощью которых задача сводится к однокритериальной (скаляризация векторного критерия) или определяется отношение доминирования альтернатив;
- различной степенью участия ЛПП в их применении и возможностями адекватного учета его предпочтений;

- различными возможностями работы с разнородными компонентами векторного критерия (числовыми и лексическими);
- различными возможностями применения и вычислительной сложностью при возрастании размерности векторного критерия;
- достоинствами и недостатками, зависящими от условий применения метода.

Все методы имеют право на жизнь и выбор метода зависит от предпочтений ЛПР. Но, как показал анализ, наибольшими возможностями в адекватном учете мнения ЛПР и эффективности его применения, является метод основанный на функции предпочтений (ФП) по сечениям. Он так же является наиболее эффективным по скорости оценки и ранжирования альтернатив, когда ФП уже построена. Серьезным недостатком этого метода является большой объем необходимой аналитической работы ЛПР в процессе построения ФП.

С точки зрения построения методологии унифицированной разработки СППР наибольший интерес представляют СППР построенные по принципу оболочек. Но многие имеющиеся образцы таких СППР обладают целым рядом недостатков:

- они, как правило, реализуют какой-либо один метод и в них отсутствует возможность применения различных методов;
- возможность их настройки на решение какой-либо конкретной многокритериальной задачи связана с большими дополнительными работами по созданию математического, алгоритмического и информационного обеспечения, реализующего такую настройку.

Наибольшими возможностями, которые могут быть использованы при создании методологии унифицированной разработки, обладает СППР DSS/UTES: возможностями использования различных методов, возможностями работы с разнородными показателями, возможностями использования наиболее адекватного учета мнения ЛПР в виде ФП, возможностями интеграции модулей для реализации новых методов и подключения источников с альтернативами.

Однако и DSS/UTES свойственные следующие недостатки:

- трудоемкая процедура построения ФП по сечениям,
- средства реализации возможностей расширения на базе COM-компонент ориентированы только на платформу Windows.

Во второй главе рассмотрен, имеющийся у автора, практический опыт создания конкретных специализированных СППР, применявшихся, например, в высокоразмерных задачах ракетно-космической отрасли. Анализ требований к конкретным СППР, систематизация проектных решений по их архитектуре, обобщение практического опыта алгоритмизации и программирования СППР, позволил в дальнейшем, в главе 4 сформулировать методологию унифицированной разработки специализированной СППР для решения высокоразмерных задач

ракетно-космической отрасли. В главе рассматриваются, 3 специализированные СППР созданные при непосредственном участии автора.

На базе СППР DSS/UTES создана «Автоматизированная система мониторинга муниципальных образований (АСМ МО)», которая позволяет осуществлять мониторинг муниципальных образований по большой иерархии показателей. Общее количество исходных показателей превышало 200. АСМ МО создавалась по заказу Министерства по делам федераций, национальной и миграционной политики Российской Федерации в рамках федеральной программы «Совершенствование управления сферой социально-экономического развития муниципальных образований на основе разработки и внедрения современных информационных технологий».

Последовательное многоуровневое агрегирование вначале исходных, а затем и обобщенных показателей, сводит оценку деятельности муниципального образования (МО) к вычислению значений четырех обобщенных показателей: ресурсы МО, муниципальное хозяйство, уровень жизни населения, социально-экономическое состояние и развитие МО.

Серверная часть АСМ МО реализована в СУБД MS SQL Server. Для написания программного обеспечения АСМ МО была выбрана среда быстрой разработки приложений PowerBuilder. АСМ МО была принята к эксплуатации в ряде городов: Иваново, Псков, Печоры, Дзержинский.

В интересах Главного испытательного центра испытаний и управления космическими средствами (ГИЦИУ КС) была разработана «Автоматизированная система контроля и управления (АСКУ)». АСКУ предназначена для мониторинга состояния иерархических систем по многим показателям, имеющим древовидную структуру.

Древовидный характер структуры показателей, с одной стороны, определяется иерархической структурой системы, а, с другой стороны, древовидным характером показателей для каждого объекта системы. Объекты на одном уровне иерархии могут быть разнотипными, т.е. дерево показателей для них может быть своё. Общее количество исходных показателей для оценки структурных подразделений космических войск было порядка 100. Таким образом, задачи, решаемые АСКУ, были высокоразмерными.

Пользователи помимо древовидной структуры показателей определяют правило вычисления обобщенных показателей на основе значений подчиненных показателей. Для определения этих правил в АСКУ могут использоваться возможности системы DSS/UTES. Кроме того можно использовать продукционные правила ЕСЛИ...ТО. В качестве правил вычисления обобщенных показателей можно использовать математические формулы с суммированием, вычислением минимумов и максимумов агрегируемых показателей. Кроме того, реализован модуль позволяющий установить, что нужно делать, чтобы улучшить значение обобщённого показателя.

При сопоставительном анализе оценок для различных временных срезов АСКУ позволяет выявлять причины изменения обобщенных показателей отдельных объектов и системы в целом. АСКУ позволяет проводить ранжирование однотипных по составу показателей объектов иерархической структуры по заданному показателю.

Программное обеспечение АСКУ функционирует в многопользовательском режиме, для этого задействован сервер под управлением ORACLE. К клиентским машинам не предъявляются повышенные требования по аппаратному обеспечению. При разработке ПО использовалось средство быстрой разработки приложений PowerBuilder. Были также решены задачи интеграции программного обеспечения системы с СППР DSS/UTES. Организовано хранение информации о предпочтениях в СУБД ORACLE.

Далее в главе рассмотрена СППР «ГЛОНАСС». Сложность структуры самой системы ГЛОНАСС, многообразие возможных направлений ее развития, многокритериальный характер оценки эффективности ее компонент и системы в целом, ограниченность выделяемых на развитие и эксплуатацию системы ресурсов определяет актуальность разработки СППР, позволяющей осуществить сравнение альтернативных вариантов развития и выбор наилучших.

Возможностей СППР DSS/UTES по хранению и обработке больших информационных массивов для работы с системой ГЛОНАСС в комплексе уже недостаточно. Поэтому стала задача разработки новой СППР на базе современных информационных технологий.

СППР «ГЛОНАСС» предназначена для поддержки решений на всех этапах развития и целевого использования глобальной навигационной системы ГЛОНАСС.

Если учесть, что подсистема космических аппаратов включает в себя не только сами космические аппараты, но и комплекс предприятий по их производству, испытаниям, отладке и запуску, то, анализируя укрупненную структуру системы ГЛОНАСС, можно отметить, что каждая подсистема состоит из совокупности достаточно самостоятельных предприятий, имеющих кроме корпоративных и свои собственные цели и интересы. Систему ГЛОНАСС в целом можно рассматривать как многоуровневую иерархическую систему с несколькими центрами управления, с не всегда однозначно определенными связями между ними. На каждом уровне иерархии приходится иметь дело с большим количеством показателей для каждого из объектов, поэтому задача мониторинга и оценки управленческих решений в такой структуре является высокоразмерной.

Следует отметить, что в силу тесного переплетения деятельности государства и отдельных предприятий, система ГЛОНАСС представляет собой сложную, слабоструктурированную систему, обладающую рядом таких свойств, как уникальность, трудность формализации, высокая степень неопределенности, динамичность, невозможность полного описания и др. С учетом отмеченных особенностей исследование процессов функционирования и управления такой

системой целесообразно проводить на основе использования методов компьютерной поддержки решений.

Возможности СППР «ГЛОНАСС» были продемонстрированы на примере задачи оценки навигационных приемников. На рис. 1 приведена экранная форма, соответствующая этапу формирования функции предпочтений. Показаны раскрашенное двумерное сечение ФП, перечень пассивных показателей с указанием "замороженных" значений и палитра полутонов.

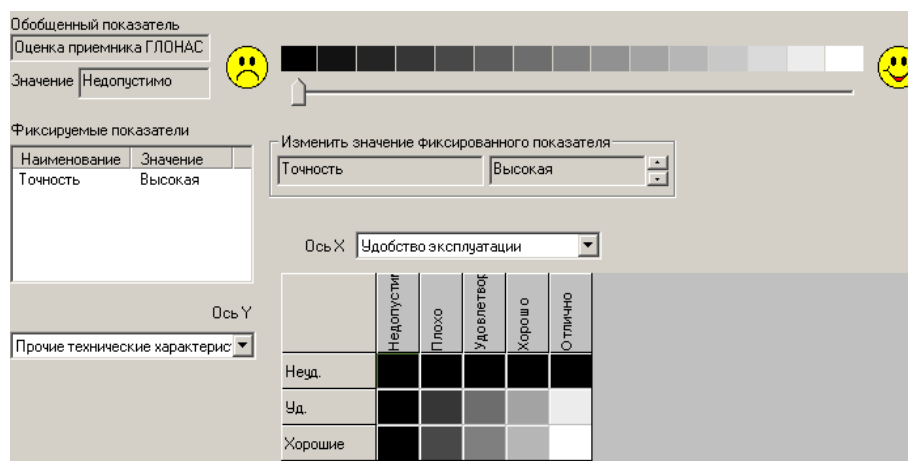


Рис. 1. Построение функции предпочтений

Программное обеспечение СППР «ГЛОНАСС» создавалось с использованием свободного системного программного обеспечения (ПО). Применительно к отечественным разработкам в космической отрасли использование свободного системного ПО позволяет минимизировать риски:

- Риск наличия в программе вредоносного и «шпионского» кода. Подобный код в свободном ПО легко обнаружить.
- Риск прекращения поддержки и развития системы. Систему всегда можно дорабатывать самим.

Поэтому СППР для нужд космической отрасли целесообразно создавать на базе свободного системного ПО. Причем оно может быть как отечественным, так и зарубежным, что не принципиально. Главное, чтобы оно обладало всеми свободами, указанными в определении свободного ПО, и, чтобы в России были специалисты, которые могли бы его поддерживать и дорабатывать.

В качестве СУБД для СППР «ГЛОНАСС» использовался PostgreSQL. Сильными сторонами PostgreSQL считаются: поддержка БД практически неограниченного размера, мощные и надёжные механизмы транзакций и репликации, наследование, легкая расширяемость.

Для разработки СППР «ГЛОНАСС» использовался язык программирования Ruby и набор базовых классов Rails. Ruby обладает простым и лаконичным синтаксисом. К достоинствам Ruby и Rails следует отнести наличие их реализации в открытых исходных кодах и возможность

свободно модифицировать эти исходные коды. Таким образом, обеспечивается независимость от зарубежных производителей системного ПО. Все исходные тексты хранятся в открытом SVN репозитории по адресу <https://sourceforge.net/p/dss-utes/code>.

В резюме по второй главе сделаны следующие выводы:

- Рассмотренные задачи ракетно-космической отрасли являются ресурсоемкими и высокоразмерными. Для их решения требуется применение развитого математического, алгоритмического и информационного обеспечения, позволяющего решать многокритериальные задачи, осуществлять многоуровневую декомпозицию векторного критерия, для систем, имеющих иерархическую структуру. Требуется открытый характер программного обеспечения.
- Существенные трудозатраты при создании рассмотренных систем связаны с разработкой индивидуального информационного обеспечения. Поэтому важной задачей является разработка универсальной структуры такого обеспечения.
- Настройки на конкретные задачи поддержки решений ракетно-космической отрасли позволяет осуществлять СППР DSS/UTES. Существенным недостатком СППР DSS/UTES является высокая трудоемкость построения ФП. Поэтому актуальной задачей является разработка более совершенного метода построения ФП.

Третья глава посвящена разработке новых методов решения многокритериальных задач с высокой размерностью векторного критерия. Решаемые в работе практические задачи из ракетно-космической отрасли характеризуются десятками критериев, имеют зависимости по предпочтениям между критериями, содержат лексические критерии, оцифровка которых связана со значительными трудностями.

Функция предпочтений (ФП) в СППР DSS/UTES:

- позволяет учесть зависимости по предпочтениям,
- проста и легко понимается ЛПР,
- позволяет практически мгновенно ранжировать произвольное количество альтернатив, после того как предпочтения заданы.

Однако методу ФП в СППР DSS/UTES присущи следующие недостатки:

- трудоемкость формирования ФП,
- неразличимость вариантов внутри ячейки, образованной градациями,
- актуальность проблемы по разбиению шкалы на градации,
- невозможность строить ФП более чем для 5 критериев.

Исходя из сказанного выше, видна актуальность задачи разработки нового гибридного метода построения ФП. Метод создан с целью решения следующих задач:

- обеспечить ЛПР инструментарием для качественных суждений о предпочтительности альтернатив в задачах с высокой размерностью векторного критерия (под качественными

понимаются суждения в порядковой шкале, когда ЛПР может сказать, что одно решение лучше другого, ЛПР может указать, что один критерий важнее другого, но при этом затруднительно получить числовые оценки степени превосходства);

- выявить предпочтения ЛПР во всем критериальном пространстве, чтобы дальнейшая оценка конкретных альтернатив проходила в автоматическом режиме (таким образом, процесс выбора и ранжирования альтернатив происходит быстро и появляется возможность проводить процедуру поиска решений без привлечения ЛПР, но с учетом его предпочтений);
- учесть зависимости между компонентами векторного критерия по предпочтениям (в результате можно устранить ситуации, когда альтернативы с неприемлемыми для ЛПР оценками по одному критерию, получают высокую интегральную оценку за счет других критериев);
- обеспечить различимость альтернатив в случае, когда значения критериев подвергаются искусственной дискретизации с целью замены непрерывных шкал на бальные оценки.

Метод носит названия гибридного, так как сочетает элементы качественных методов (функции предпочтений, качественные важности критериев, метод ЗАПРОС) и количественных методов (взвешенная сумма, идеальная точка) выявления суждений ЛПР. Дадим описание сути предлагаемого гибридного метода в общем виде.

Допустим, пространство критериев имеет размерность n , равную размерности векторного критерия оптимальности. Оси координат соответствуют частным критериям оптимальности. Далее, каждой точке этого пространства ставится в соответствие значение некоторой функции предпочтений, отражающей систему ценностей ЛПР о том, какие решения лучше, а какие хуже.

ЛПР выделяет в пространстве критериев непересекающиеся области. Практика показывает, что ЛПР, исходя из своих знаний и опыта, легко выделяет области неудовлетворительных решений, области удовлетворительных решений, области хороших решений для достаточно небольшого (5-16) количества областей. Для применения метода необходимы знания об области допустимых значений каждого из критериев, но не требуется, чтобы все точки критериального пространства были допустимыми, знания о предпочтениях в недопустимых точках просто не используются. Для построения областей ось каждого критерия разбивается на интервалы, в результате критериальное пространство разбивается на отдельные ячейки прямоугольной формы. Пользователь указывает одну или несколько таких ячеек и сообщает СППР, что в этой области уровень предпочтений имеет некоторое значение в заданной лексической шкале: хорошо, удовлетворительно, неудовлетворительно и т.д. Уровень предпочтений позволяет определить, что решения в одной области лучше решений в другой области, но не говорит, на сколько лучше. Таким образом, уровень предпочтений выражается в порядковой шкале. При этом должна соблюдаться транзитивность предпочтений. Проверка транзитивности суждений ЛПР выполняется СППР автоматически.

В практических задачах ранжирования альтернатив часто несколько недоминируемых альтернатив попадают в одну область. Возникает вопрос об их сопоставлении. В этом случае предлагается воспользоваться формальным (количественным) методом сопоставления альтернатив внутри заданной области. Такими формальными методами могут быть: взвешенная сумма, мультипликативная свертка, идеальная точка, свертка Гермейера, расстояние Чебышева. Применение формальных методов в локальной области основано на следующем эвристическом соображении: зависимости по предпочтениям и существенные нелинейности проявляются только при больших изменениях значений критериев. Под большими изменениями мы понимаем такие, которые приводят к переходу из одной области предпочтений в другую. В небольшой области недостатки формальных методов, такие как взаимная компенсация критериев, влияние масштабирующих коэффициентов проявляют себя несущественно для пользователя.

Для математической формализации метода, дадим следующие обозначения:

i – номер критерия,

$i=1..n$, где n – число критериев.

С целью удобства задания областей, которые будем упорядочивать по предпочтениям, разобьем значения критериев на градации:

t_{ij} - j -я градация i -го критерия.

Число градаций у критериев может быть различным:

$j=1..q_i$, где q_i – число градаций i -го критерия.

Для лексических критериев в качестве таких градаций выступают слова (термы). Для числовых критериев градация - это интервал значений. Интервал указывается в виде правой и левой границы.

По каждому критерию предпочтения должны быть монотонны или иметь один экстремум (идеальное значение – например, комфортная температура в помещении). Градации должны быть отсортированы в порядке увеличения предпочтительности:

$$\forall i, j: t_{ij+1} \succ t_{ij} .$$

Полное пространство всех возможных комбинаций значений градаций критериев задается как декартово произведение:

$$A = \{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1q_1}\} \otimes \{t_{21}, t_{22}, \dots, t_{2q_2}\} \otimes \dots \otimes \{t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{nq_n}\} .$$

Мощность этого множества вычисляется по формуле:

$$Q = |A| = \prod_{i=1}^n q_i .$$

В большинстве практических задач значение Q велико, например, для 7 критериев с 5 градациями: $Q=5^7=78125$. Задавать уровни предпочтения для всех элементов A на практике

сложно. Поэтому в качестве области, для которой определяется уровень предпочтения, будем рассматривать объединение некоторых элементов множества A .

Определим множества M_k , где $k=1..K$. Множество M_k представляет собой множество точек критериального пространства в определенной пользователем прямоугольной области. Для каждого M_k по каждому из критериев определяются градации, которые в него входят:

m_{ik} – множество номеров градаций i -го критерия, которые входят в k -е множество M_k .

Множества M_k – это подмножества множества A .

Рассмотрим произвольную точку пространства критериев: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где x_i – значение i -го критерия, которое обязательно попадает в одну из градаций $\exists j(x_i \in t_{ij})$. Принадлежность X к множеству M_k определяется предикатом:

$$W(X, k) = \bigwedge_{i=1}^n \left(\bigvee_{j \in m_{ik}} (x_i \in t_{ij}) \right).$$

Для каждого уровня предпочтений P определяются входящие в него области с заданным уровнем предпочтений $P(M_k)$. Множество значений P – это целые числа, чем больше число, тем предпочтительнее соответствующий аргумент функции. Над значениями функции $P(\dots)$ нельзя производить арифметических операций сложения, вычитания и прочих, допустимы только операции сравнения. На рисунке 2 в нотации UML показано, как ЛПР вводит и редактирует множества M_k .

СППР проверяет, что все определенные пользователем множества M_k с различным уровнем предпочтений должны отличаться хотя бы по одному критерию. Для этого, после появлении новой области или изменении существующей области автоматически проверяется выполнение выражения:

$$\forall k_1, k_2 (P(M_{k_1}) \neq P(M_{k_2})) \rightarrow (\exists i (m_{ik_1} \cap m_{ik_2} = \emptyset))$$

Если выражение не выполняется, то пользователь должен скорректировать свои назначения предпочтений или границы множеств M_k . Если множества M_k имеют равный уровень предпочтений, то допустимо их пересечение.

Для алгоритма показанного на рисунке 2 в качестве входа выступают критерии и списки градаций для каждого критерия. Пользователь задает лексическую шкалу уровней предпочтений и для каждого из уровней предпочтений определяет одно или несколько множеств M_k , указывая градации по критериям. После ввода каждого множества, проверяется что оно не пересекается с остальными. На выходе получается совокупность множеств M_k заданных через $\{m_{ik}\}$, для каждого из которых задан уровень предпочтений $P(M_k)$. При сообщении о пересечении должна выдаваться подсказка ЛПР: необходимо, чтобы хотя бы по одному из критериев градации не было общих градаций.

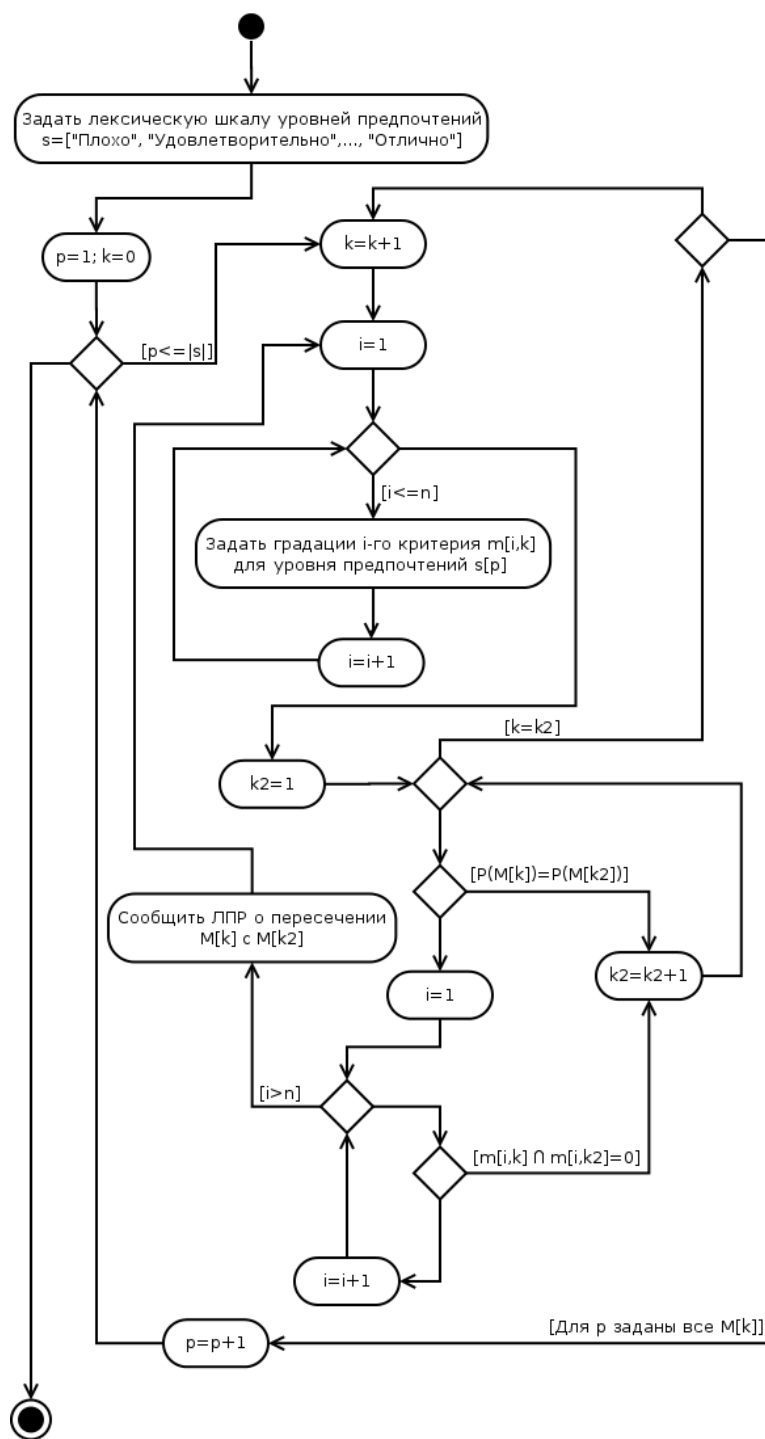


Рис. 2. Алгоритм ввода и редактирования M_k и уровней предпочтений

Так как объединение всех множеств M_k в общем случае не составляет всего множества A , то необходимо обеспечить возможность определения уровня предпочтений, для любой комбинации значений градаций, которые не попали ни в одно из M_k . Назовем такие комбинации градаций **ячейками** и обозначим их как

$$T_l = \{t_{1g_{1l}}, t_{2g_{2l}}, \dots, t_{ng_{nl}}\},$$

где g_{il} – номер градации i -го критерия для l -й ячейки, $l=1..L$.

Нужно найти все комбинации градаций, которые не попадают ни в одно из множеств M_k .
Условие непопадания во все множества M_k запишется как:

$$\forall \forall k \exists i (g_{il} \notin m_{ik}).$$

Обозначим общее количество таких ячеек - L .

Учитывая, что градации отсортированы в порядке увеличения предпочтительности, применим к ячейкам T_l и множествам M_k условие оптимальности по Парето. В результате возникают отношения предпочтения одних ячеек над другими:

$$(\forall i (g_{il_1} \geq g_{il_2}) \& \exists i (g_{il_1} > g_{il_2})) \rightarrow T_{l_1} \succ T_{l_2}.$$

А также отношения предпочтения ячеек над множествами:

$$\forall i (g_{il} \geq \max_{j \in m_{ik}} j) \& \exists i (g_{il} > \max_{j \in m_{ik}} j) \rightarrow T_l \succ M_k.$$

и отношения предпочтения множеств над ячейками:

$$\forall i (\min_{j \in m_{ik}} j \geq g_{il}) \& \exists i (\min_{j \in m_{ik}} j > g_{il}) \rightarrow M_k \succ T_l.$$

Кроме того, существует отношение доминирования между всеми множествами M_k . Оно определяется уровнями предпочтений, заданными пользователем:

$$\forall k_1 \forall k_2 (P(M_{k_1}) > P(M_{k_2})) \rightarrow M_{k_1} \succ M_{k_2}.$$

Для некоторых ячеек можно определить предпочтения между ячейками методом качественного учета важностей Подиновского, если выполняются следующие условия:

1. для критериев установлено отношение предпочтения, например, критерий i важнее критерия $i+1$, при этом не утверждается на сколько важнее,
2. критерии являются однородными, то есть для них используется одна и та же шкала, например, пятибалльная шкала экспертных оценок от 1 до 5.

Между ячейками, которые получаются друг из друга перестановкой номеров градаций по двум критериям в случае их однородности, получается отношение предпочтения по правилу Подиновского:

$$\begin{aligned} & \exists i_1 \exists i_2 (i_1 < i_2) \& (\forall i (i \neq i_1 \& i \neq i_2) \rightarrow (g_{il_1} = g_{il_2})) \& (g_{i_1 l_1} > g_{i_1 l_2}) \& \\ & \& (g_{i_2 l_1} < g_{i_2 l_2}) \& (g_{i_1 l_1} = g_{i_2 l_2}) \& (g_{i_2 l_1} = g_{i_1 l_2}) \rightarrow T_{l_1} \succ T_{l_2} \end{aligned}$$

Применяя указанные правила доминирования ко всем ячейкам и множествам, можно построить ориентированный граф доминирования ячеек T_l и множеств M_k . Вершины этого графа будут соответствовать ячейкам и множествам, а направленные дуги будут говорить об отношении доминирования. Граф нужно проверить на наличие циклов. И если таковые будут найдены, то следует указать на это ЛПР. Цикл в графе говорит о наличии нетранзитивности в суждениях ЛПР. Необходимо для каждого цикла определить множества M_k , которые в него входят, и сообщить

пользователю, что необходимо ввести корректировки уровней предпочтений или изменить сами множества.

После того как будет установлено отсутствие циклов, следует использовать алгоритм анализа графа, который академик Ларичев назвал «разборка» графа. В этом алгоритме определяются значения уровней предпочтений для M_k и T_l :

- 1) $p = L+K$ – это максимальный уровень предпочтений, который возможен в случае, если все M_k и T_l различимы по предпочтительности;
- 2) определить множество недоминируемых вершин M_k и T_l ;
- 3) присвоить им уровень предпочтений p ;
- 4) исключить из графа недоминируемые вершины;
- 6) если граф пуст, то завершение алгоритма;
- 5) $p = p - 1$;
- 7) переход на шаг 2.

Обычно градация или множество включает более одного возможного значения критерия. Для возможности сопоставления различных векторов пространства критериев, входящих в одно множество или в одну ячейку, необходимо добиться изменения итоговой оценки альтернативы при изменении критерия в рамках одного уровня предпочтений. Для этого предлагается вычислять итоговое значение предпочтений по формуле:

$$Y(X) = p(X) + D(X), \text{ где}$$

$p(X)$ – целочисленный уровень предпочтений, советующей области M_k или ячейки T_l , в которую попало значение X , определенный вышеописанным алгоритмом разбора графа;

$D(X)$ – оценка, полученная количественным методом свертки векторного критерия, вычисленная в рамках той области (множества или ячейки), куда попало значение вектора X и нормированная в пределах от 0 до 1.

Функцию $Y(X)$, вычисляющую итоговое значение предпочтений, назовем *гибридной функцией предпочтений* (ГФП).

На рисунке 3 показан общий алгоритм гибридного метода формирования функции предпочтений. Данный гибридный метод, с одной стороны, позволяет существенно упростить процедуру построения функции предпочтений, задавая ее подробно не на всем критериальном пространстве. С другой стороны, использовать преимущества, представляемые количественными методами свертки векторных критериев и требующие, как правило, меньшего объема информации при их использовании, для более детального сопоставления альтернатив, находящихся в одной области решений, одинаковой по предпочтению с точки зрения ЛПР.

В работе показан результат построения ГФП в задаче оценки значимости космических экспериментов проводимых на борту МКС. Циклов не возникло (сходимость за одну итерацию). В

задаче предпочтения задавались для 6 критериев, СППР DSS/UTES нельзя задать функцию предпочтений на таком пространстве и пришлось бы прибегнуть к агрегированию показателей. В СППР DSS/UTES задание предпочтений заняло около 4 часов. ГФП была построена за 1 час. Все альтернативы с уникальными комбинациями значений критериев получили уникальные ранги при ранжировании.

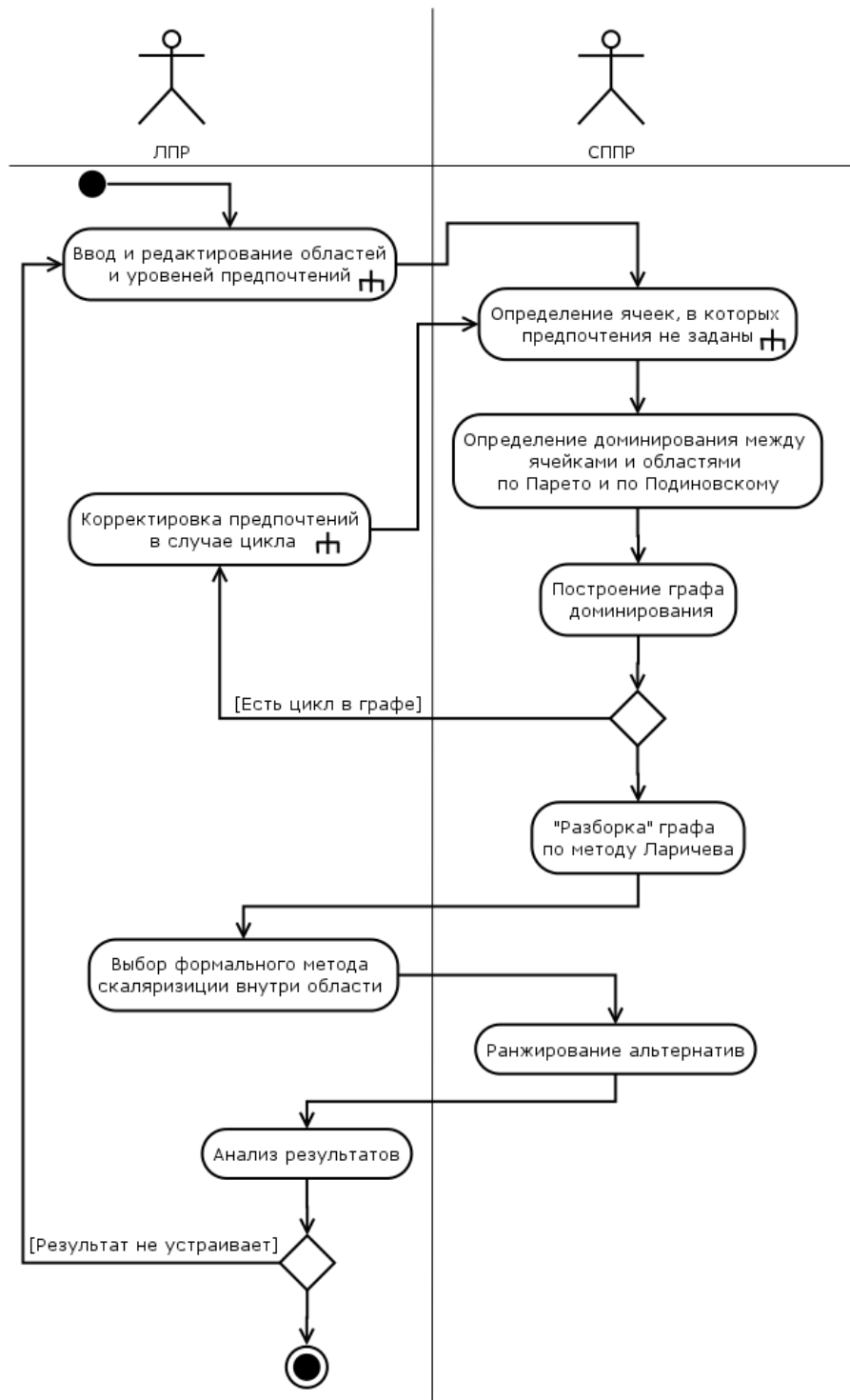


Рис. 3. Алгоритм формирования гибридной функции предпочтений

Во второй части третьей главы рассматривается задача построения многоуровневого дерева критериев. При этом подходе показатели объединяются в группы, и каждая из них

характеризуется своим показателем называемым *обобщенным*. Формирование групп должно происходить с участием или под контролем ЛПР. Для каждого обобщенного показателя задается правило его вычисления (решающее правило). В качестве решающего правила может выступать формальный метод свертки или процедура свертки по предпочтениям, в результате которой вычисляется «промежуточная ФП». Процедуру объединения показателей в группы назовем агрегированием. Оно выполняется по смысловому признаку, т.е. агрегированные показатели несут обобщенную информацию о каком-либо аспекте решаемой задачи, детально определяемом показателями, вошедшими в его состав. В результате агрегирования происходит переход к векторному критерию меньшей размерности. Процедура агрегирования может повторяться многократно. В итоге можно получить дерево показателей, в корне которого находится один обобщенный показатель.

Дерево агрегирования во многом напоминает иерархию из метода анализа иерархий. Отличие заключается в том, что для свертки показателей, которые могут быть как числовыми, так и лексическими, в первую очередь, используется свертка по предпочтениям.

При агрегировании показателей, мы получаем высокую размерность шкал обобщенных показателей. Например, даны 4 показателя и каждый из них характеризуется 5 градациями, чтобы различать все комбинации их значений требуется шкала с $5^4=625$ градациями. Назначение предпочтений на таких шкалах затруднительно, поэтому в работе предложена процедура дискретизации шкал обобщенных показателей. Она содержит две подзадачи. Первая - выбор числа градаций, и вторая - разбиение шкалы на градации. Шкалу полученную в результате такой процедуры назовем «загрубленной». При решении первой подзадачи пользователь, на основе содержательных соображений, сам назначает требуемую точность оценки. Для решения второй подзадачи предлагаются три способа:

1. Разбиение на равные интервалы. В информационном плане, как будет показано далее, этот метод не всегда целесообразен.

2. Предоставление пользователю возможности самому формировать интервалы разбиения на основе содержательного анализа. Неудобство заключается в том что, пользователю системы придется тратить достаточно много времени на разбиение и согласование шкал.

3. Разбиение шкалы обобщенного показателя на основе минимизации информационных потерь или максимизации энтропии показателя.

Очевидно, что дискретизация шкал приводит к потерям информации. Наиболее полная информация о векторном критерии содержится на уровне исходных показателей. Потери возрастают от листвы к корню дерева агрегирования. Оценить потери информации, возникающие в процессе агрегирования показателей, можно с помощью энтропии. Как известно, количество информации измеряется разностью энтропий до и после получения сообщения. В нашем случае

энтропия показателя после получения сообщения равна нулю и количество информации в сообщении определяется энтропией показателя до его получения. Поэтому осуществлять разбиение шкалы обобщенного показателя на градации желательно так, чтобы энтропия показателя была максимальной. А это приводит к идее разбиения на такие интервалы, в которых сообщения появлялись бы с одинаковыми вероятностями. Такой подход известен и применялся для оцифровки непрерывных шкал измерений приборов.

В рассматриваемой задаче имеется исходная порядковая шкала уровней предпочтений с большим количеством градаций и из нее нужно получить шкалу предпочтений с меньшим количеством градаций с минимальными информационными потерями. Это приводит к оптимизационной задаче, которая решается для каждого обобщенного показателя независимо от уровня агрегирования.

Ее формальная постановка имеет вид:

$$\max_{u_1, u_2, \dots, u_{m^*}} I^* = - \sum_{r=1}^{m^*} \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^{r-1} u_l + 1}^{\sum_{l=1}^r u_l} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^{r-1} u_l + 1}^{\sum_{l=1}^r u_l} p_k \right),$$

при ограничениях:

$$\sum_{r=1}^{m^*} u_r = m,$$

$$u_r > 0, r=1..m^*, \text{ где}$$

u_r – оптимизационные переменные, которые показывают, сколько градаций исходной шкалы включается в r -ю градацию «загрубленной» шкалы,

p_k – вероятность k -го состояния в исходной шкале (ниже приведены соображения по получению этих величин),

m^* – число градаций в «загрубленной» шкале (может варьироваться, некоторые соображения по выбору этого числа приведены ниже),

m – число градаций в исходной шкале (задается ЛПР),

$r=1..m^*$ – номер градации в «загрубленной» шкале,

$k=1..m$ – номер градации в исходной шкале,

$\sum_{l=1}^{r-1} u_l + 1$ – индекс первой градации исходной шкалы, включенной в r -ю градацию

«загрубленной» шкалы,

$\sum_{l=1}^r u_l$ – индекс последней градации исходной шкалы, включенной в r -ю градацию

«загрубленной» шкалы.

«Узким местом» такой постановки задачи является необходимость знания p_k . В процессе эксплуатации СППР оценки p_k могут быть вычислены на основе статистических наблюдений:

$p_k = m/n$, где m – число альтернатив у которых значение показателя попадало в k -ю градацию, n – общее число оцениваемых альтернатив.

Если система только начинает функционировать, то можно обратиться к субъективным вероятностям, основанным на опросе экспертов с применением, например, метода эталонных потерей.

Поставленная оптимизационная задача относится к классу задач дискретного динамического программирования. Для её решения необходимо составить функцию состояния (функцию Беллмана) $\Lambda_r(\xi)$. Она представляет собой максимальную энтропию r первых градаций «загрубленной» шкалы, вычисленных при условии, что ξ градаций исходной шкалы объединяются в r первых градаций «загрубленной» шкалы:

$$\Lambda_r(\xi) = \max_{u_1, \dots, u_r} \left(- \sum_{j=1}^r \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^j u_l}^{\sum_{l=1}^{j+1} u_l} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\sum_{l=1}^r u_l}^{\sum_{l=1}^r u_l} p_k \right) \right),$$

$$\sum_{j=1}^r u_j \leq \xi,$$

$$r \leq \xi, \xi = 1, 2, \dots, m.$$

Для вычисления функции Беллмана получено рекуррентное соотношение:

$$\Lambda_r(\xi) = \max_{1 \leq u_r \leq \xi} \left\{ - \left(\sum_{k=\xi-u_r+1}^{\xi} p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=\xi-u_r+1}^{\xi} p_k \right) + \Lambda_{r-1}(\xi - u_r) \right\}.$$

Значение функции Беллмана для всей шкалы, т.е. при $\xi=m$ и $r=m^*$ даст, оптимальное значение целевой функции:

$$\Lambda_{m^*}(m) = \max_{1 \leq u_{m^*} \leq m} \left\{ - \left(\sum_{k=m-u_{m^*}+1}^m p_k \right) \log_2 \left(\sum_{k=m-u_{m^*}+1}^m p_k \right) + \Lambda_{m-1}(m - u_{m^*}) \right\}.$$

В работе проведен расчет выигрыша от оптимального разбиения, на примере задачи оценки прикладного эффекта космического эксперимента (КЭ) планируемого для поведения на российском сегменте МКС. Прикладной эффект КЭ – востребованность (хотя бы потенциальная) эксперимента министерствами, ведомствами, частными организациями и т.п. Прикладной эффект КЭ определяется на основе 8 показателей, каждый из которых оценивается по 3-х бальной шкале. Для определения p_k использовались данные по оценкам прикладного эффекта по 93 космическим экспериментам.

На рисунке 4 показана зависимость энтропии I^* от числа градаций m^* . По нему видно, что в данном примере не целесообразно использовать больше 36 градаций, так как энтропия перестает

возрастать. Однако при большом числе градаций строить функцию предпочтений затруднительно, так как требуется задать предпочтения для большого количества областей. Разбиение на 16 градаций позволяет достичь 83% от максимума, что является хорошим компромиссом между информационными потерями и сокращением шкалы в 16 раз от исходной. Для 16 градаций информационные потери при равномерном разбиении шкалы критерия составляют 28 %, в то время как потери в оптимизированной шкале составили 17 % .

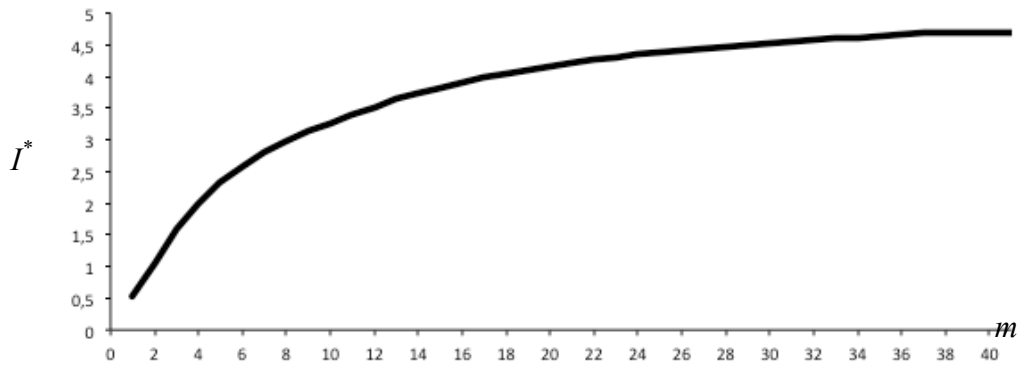


Рис. 4. Зависимость энтропии I^* от числа градаций m^*

В резюме по третьей главе сделаны следующие выводы:

1. Предложенный метод построения гибридной функции предпочтений содержит алгоритмы ввода и редактирования системы ценностей ЛПР для высокоразмерного критерия, позволяет учитывать зависимости по предпочтениям.

2. Разработан алгоритм поиска ячеек пространства критериев с целью определения предпочтений на полном множестве альтернатив. Предложен набор правил определения отношения доминирования между областями критериального пространства. Разработан алгоритм анализа графа для определения уровней предпочтений отдельных точек критериального пространства.

3. Гибридный метод является инвариантным по отношению к предметной области, позволяет решать широкий круг задач ракетно-космической отрасли, связанных с многокритериальной оценкой по высокоразмерному критерию, включающему в свой состав как качественные, так и количественны компоненты.

4. Построение многоуровневого дерева агрегирования, в случае большой размерности векторного критерия, приводит к информационным потерям. Разработан метод минимизации информационных потерь при дискретизации шкал обобщенных показателей. Задача рационального разбиения шкалы обобщенного показателя поставлена и решена как задача динамического программирования.

5. Применение метода дискретизации шкал обобщенных показателей в задаче оценки прикладного эффекта космического эксперимента (КЭ), планируемого для поведения на российском сегменте МКС, позволило снизить информационные потери с 28% до 17%.

В четвертой главе рассматриваются принципы унифицированного подхода к разработке СППР. По мнению автора, основная потребность в унификации связана со стремлением сделать максимально широким и доступным весь набор информационных и аналитических ресурсов и сервисов для ЛПР. Современные методы системного и информационного моделирования бизнес-процессов, методы проектирования и системной интеграции информационно-аналитических систем дают возможность формализовать с использованием унифицированных подходов основные процедуры выработки и обоснования решений, предложить решение по программной реализации ресурсов и сервисов СППР.

Обобщенная схема принятия решений, представленная в работах Э.А. Трахтенгерца, включает следующие этапы:

1. Выявление предпочтений ЛПР в формировании критериев.
2. Использование субъективных предпочтений ЛПР в оценке ситуации (анализе результатов мониторинга).
3. Формирование альтернативных управленческих решений.
4. Оценка альтернатив управленческих решений с учетом предпочтений ЛПР.
5. Учет предпочтений ЛПР в прогнозе результатов принимаемых решений.
6. Выбор лучшего, с точки зрения ЛПР, варианта решения.

Анализ данной схемы принятия решений позволил сформулировать некоторые принципы, соблюдение которых должно лежать в основе формирования унифицированных требований к программным средствам информационно-аналитической поддержки принятия решений, обеспечивающих приоритет интересов ЛПР.

Унифицированный подход к разработке программного обеспечения СППР состоит из:

- совокупности принципов проектирования,
- каркасного подхода к разработке архитектуры программного обеспечения,
- шаблона правил качественного кодирования,
- набора характеристик оценки качества программного обеспечения СППР,
- программных средств поддержки унифицированного обхода, в том числе средства поддержки процесса управления разработкой ПО СППР.

Унификация заключается в том, что все эти методические рекомендации применимы к широкому спектру многокритериальных, высокоразмерных задач, связанных с поддержкой решений. Конечно, некоторые задачи могут потребовать специфичных проектных решений, но они не противостоят предложенному унифицированному подходу, а лишь дополняют его.

При проектировании и сборке программного обеспечения СППР используются следующие принципы:

Принцип свободы от субъективизма разработчиков. Система должна быть максимально гибкой и подстраиваться под нужды и потребности ЛПР. При этом настройка решающих правил должна выполняться в интерфейсе системы пользователем, без необходимости изменения исходных текстов программного обеспечения.

Принцип инвариантности по отношению к предметной области. Программное обеспечение СППР должно включать реализацию широкого набора методов работы с векторным критерием, методов оптимизации, содержать инструменты выявления предпочтений пользователя. Программная реализация этих методов достаточно трудоемка, при этом сами методы не привязаны к конкретной предметной области. Поэтому целесообразно разрабатывать унифицированную архитектуру СППР, которая способна работать с произвольной предметной задачей.

Принцип множественности методов. Существует множество методов принятия решений. СППР должна обеспечивать легкую и прозрачную интеграцию требуемых методов, советовать пользователю, какой метод в данном случае лучше применим и почему, но не настаивать на нем.

Принцип учета субъективизма лица, принимающего решения (ЛПР). ЛПР наделен полномочиями и несет ответственность за принимаемые решения. Решения, которые предлагает СППР, должны отражать опыт, квалификацию и предпочтения ЛПР. После первоначальной настройки, результаты работы СППР часто не устраивают ЛПР, и нужно предусмотреть процедуру обратного вывода, которая сможет объяснить, какие предпочтения привели к полученному результату и что нужно изменить, чтобы результат работы выглядел иначе.

Принцип дружелюбности к ЛПР. Для работы с СППР не следует требовать от ЛПР специальных знаний теории принятия решений. Интерфейс системы должен наглядно показывать ЛПР все настройки и предпочтения на минимальном количестве экранных форм. СППР должна содержать механизм выявления противоречий в суждениях ЛПР и указывать на них.

Данные принципы в достаточной мере определяют особенности разработки СППР. Архитектура СППР, реализующая указанные принципы, строится на основе каркасного подхода, который заключается в создании:

- каркаса СППР, отвечающего за базовое функционирование СППР (в том числе, описание пространства критериев и параметров модели предметной области, контроль доступа и информационный обмен);

- множества вариативных модулей СППР (в том числе, формирование альтернатив, ввод и редактирование предпочтений ЛПР разными способами, описание модели предметной области и системы ограничений, многокритериальная оценка и оптимизация решений различными методами), которые подключаются через так называемые точки расширения каркаса СППР (точка

расширения описывается как спецификация интерфейса взаимодействия каркаса с множеством модулей, которые к нему подключаются).

Каркас СППР обладает следующими функциями:

- реализует механизм описания пространства критериев и многоуровневого дерева их агрегирования, параметров модели предметной области в единой информационной среде;
- позволяет пользователю выбирать методы поддержки решений и организует информационный обмен между ними;
- обеспечивает хранение, отображение и редактирование справочника атрибутов альтернатив;
- обеспечивает контроль доступа.

Контроль доступа должен быть организован как к отдельным функциям СППР, так и к отдельным критериям и к отдельным альтернативам.

Остальные функции СППР реализуются через следующие точки расширения (гнезда) каркаса:

- Ввод и редактирование предпочтений ЛПР. Возможно применение различных методов теории принятия решений для ввода системы ценностей ЛПР, поэтому это поведение выделено в вариативное.
- Формирование альтернатив.
- Описание системы ограничений для параметров модели предметной области, с целью определения множества допустимых решений.
- Описание модели предметной области, в том числе связей между параметрами модели предметной области и критериями эффективности найденных решений.
- Многокритериальная оценка или кластеризация альтернатив с учетом введенных предпочтений.
- Поиск допустимых решений выбранным методом оптимизации.
- Экспорт и импорт данных.

При настройке соответствующего модуля в точке расширения указывается, для какого подмножества альтернатив и критериев он будет использоваться. На рисунке 5 приведена схема унифицированной трехуровневой архитектуры СППР созданной на основе данных принципов.

Нижний уровень – это ПО под управлением СУБД, отвечает за хранение всей информации в единой базе данных, реализует алгоритмы многокритериальной оценки альтернатив и хранимые процедуры оптимизации модели предметной области. На этом уровне допускается динамическое подключение новых хранимых процедур для новых методов многокритериальной оценки, для новых моделей предметных областей и новых методов оптимизации.

Промежуточный уровень – это ПО, отвечающее за обработку введенной пользователем информации и подготовку необходимых форм ввода-вывода данных. На промежуточном уровне реализуются шаблоны новых форм ввода и редактирования предпочтений ЛПР и шаблоны форм ввода альтернатив.

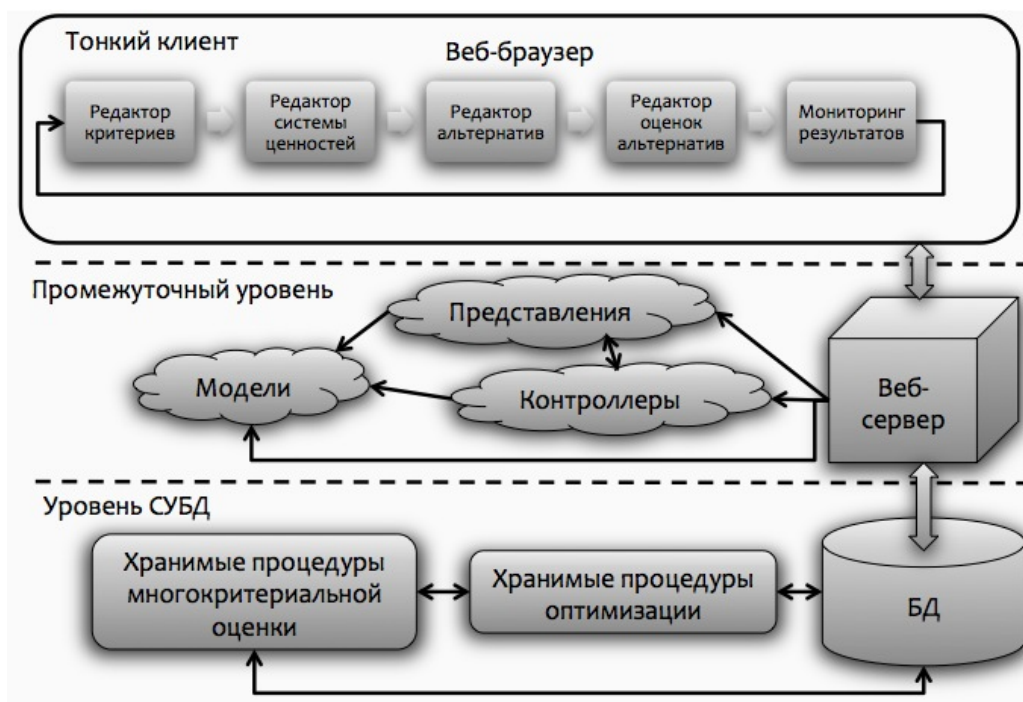


Рис. 5. Схема унифицированной архитектуры СППР

Верхний уровень (тонкий клиент) – это готовое ПО браузера, в котором отображаются все веб-формы, подготовленные на промежуточном уровне и происходит отправка введенных пользователями СППР данных. Именно на верхнем уровне с СППР взаимодействует ЛПР.

Разработка программного обеспечения должна базироваться на принципах открытости по отношению к новым методам свертки векторного критерия и новым методам оптимизации. Все исходные тексты должны быть помещены в открытом репозитории на базе одной из систем управления версиями: GIT, SVN, Fossil.

Структура базы данных должна быть разработана так, чтобы систему можно было настраивать на решение задач из различных предметных областей в единой информационной среде. Таким образом, при разработке СППР обеспечивается свойство инвариантности использования по отношению к предметной области. На рис. 6 показан фрагмент унифицированной концептуальной модели реляционной базы данных (БД) СППР, описывающий пространство критериев и оцениваемые альтернативы. Указанная модель соответствует 3-й нормальной форме. Схема составлена согласно стандарту IDEF1X, который учитывает такие требования, как простота изучения и возможность автоматизации.

Сущность task отвечает за представление отдельных задач решаемых СППР. Каждая задача (task) характеризуется своим множеством альтернатив, которые на рис. 6 представлены

сущностью *alternative*. Задача (*task*) с векторным критерием, компоненты которого хранятся в сущности *criteria*. Отдельные критерии могут быть организованы в многоуровневое дерево, для этого используется атрибут *parent_crit_id* у сущности *criteria*, который указывает на «родительский» критерий. Доступные методы агрегирования компонент векторного критерия указываются в сущности *method*.

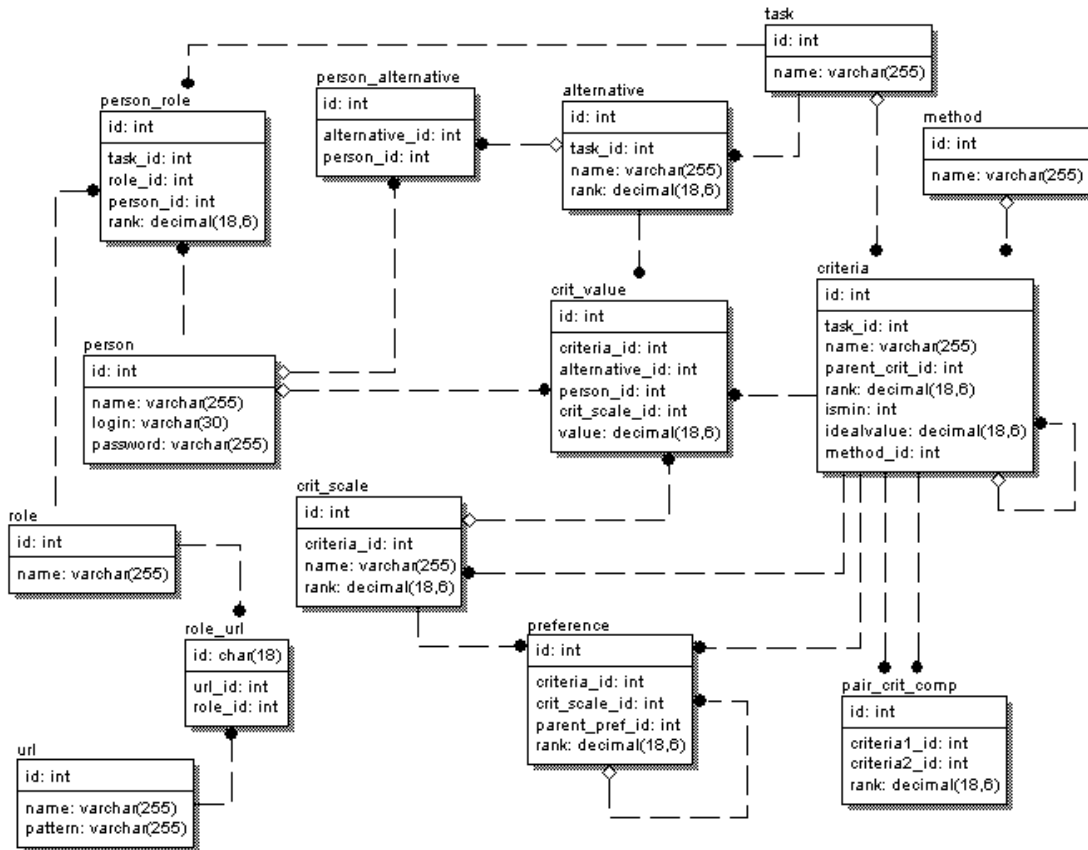


Рис. 6. Фрагмент унифицированной концептуальной модели БД СППР

Основной идеей унифицированной модели БД СППР является обеспечение структурной независимости от конкретных оцениваемых объектов. Для альтернатив, критериев и значений критериев применяется подход аналогичный модели Entity–Attribute–Value(EAV). Для этого в сущности *crit_value* содержатся значения критериев для всех альтернатив. Преимуществом данного подхода является то, что добавление новых объектов предметной области не требует перестроения модели. В единой сетевой базе данных СППР можно хранить разнородные задачи и различными критериями оценки и деревом их агрегирования с произвольным числом уровней вложенности. Пользователям системы обеспечивается разграничение доступа на уровне ролей (сущность *person_role*), которые им назначены в конкретных задачах поддержки принятия решений. Кроме того, права доступа разграничиваются на уровне отдельных альтернатив (сущность *person_alternative*), таким образом, экспертам можно поручать оценку альтернатив только из того подмножества, в котором они наиболее компетентны.

При программной реализации СППР крайне важно обеспечить высокий уровень качества создаваемого ПО. Рассмотрим правила качественной разработки СППР. Затруднительно установить первоначальный источник отдельных правил из этого списка, они встречаются и обсуждаются на сайтах www.wikipedia.org, www.habrahabr.ru, в работах Р.Гласса. Проблемы обеспечения качества ПО рассматриваются в работах В.В. Липаева. Автором проделана работа по выделению из всех рекомендаций по качественному написанию программного обеспечения, тех правил, которые целесообразно соблюдать при разработке СППР. Эта работа была проведена на основе личного опыта разработки ряда СППР и систем мониторинга. На базе этого списка правил проектировщик СППР должен разрабатывать свой список, специфичный для выбранных средств разработки и с учетом мнения коллектива программистов. Ниже показаны некоторые из этих правил:

- Все исходные тексты программ, кроме временных скриптов, должны храниться в единой системе контроля версий.
- Все добавления, изменения и удаления в таблицах должны сохраняться в таблице журнала изменений.
- Все скрипты должны быть в единой кодировке. В качестве единой кодировки рекомендуется выбрать UTF-8.
- В части FROM запроса, после присоединения новой таблицы оператором JOIN в условии ON должны встречаться только поля логического первичного ключа присоединённой таблицы, при этом должны встречаться все поля этого первичного ключа.
- Если есть условия, непосредственно не связанные с правилом объединения связываемых таблиц и накладывающие ограничения на итоговый результирующий набор данных, то они записываются в секции WHERE запроса.
- Курсоры и циклы в SQL допустимо использовать только, если задачу нельзя решить иначе.
- Если в select-е более одной таблицы, то запрещена ссылка на поля без имени или псевдонима имени таблицы.
- Результат не должен зависеть от неконтролируемого разработчиком порядка выборки данных самим SQL сервером. Запрещено использовать top без order by.
- Все свойства форматирования веб-страниц должны устанавливаться через CSS файл.
- Обращение к базе данных с веб-сервера должно происходить только через хранимые процедуры. Таким образом, достигается оперативность изменений бизнес-логики, повышается производительность и гибкость, обеспечивается более высокий уровень безопасности.

Для некоторых из правил разработаны программные компоненты, проверяющие их соблюдение. Например, проверяется правило на корректность кодировки UTF-8. Специальный

модуль на SQL запускается по расписанию и проверяет новые исходные тексты в системе контроля версий. Данные о нарушениях попадают в специальный отчет на MS Reporting Services.

Однако большинство правил невозможно проверять автоматически. Кроме того, качество программного обеспечения СППР во многом обеспечивается в первую очередь качеством процессов создания ПО. Поэтому необходимо обеспечить процесс качественного управления разработкой ПО. Отдельный раздел четвертой главы посвящен средствам автоматизированной поддержки процесса управления разработкой ПО, а именно:

1. Формализован процесс разработки ПО с использованием языка UML (созданы диаграммы Use Case, диаграммы активностей и диаграммы состояний).

2. Разработан механизм сбора информации о процессах жизненного цикла ПО СППР. Для этого проведена конфигурация системы JIRA компании Atlassian. JIRA обладает гибкими настройками функциями, они позволили реализовать процесс выполнения заявок в соответствии с UML диаграммами. Данная система позволяет назначать ответственных за проверку качества всех модулей ПО СППР. Проанализированы возможности других программных продуктов, решающих подобные задачи.

3. Создана программа для контроля значений показателей эффективности разработки программного обеспечения на базе MS SQL и MS Reporting Services.

4. Создана OLAP система для анализа процесса разработки ПО по множеству показателей на базе MS Analysis Services. Исходная информация извлекается из базы данных системы JIRA. В качестве примера, показано как анализировать достаточность имеющихся в отделе разработки ПО ресурсов на внеплановые разработки.

5. Создана имитационная модель процесса разработки СППР. Она позволяет обеспечить руководителя вероятностно-временными оценками производительности сотрудников, занятых при структурных и параметрических изменениях ПО СППР. Имитационная модель реализована на языке Delphi в среде Modelling.

В рамках методологии унифицированной разработки СППР даны рекомендации по выбору методов теории принятия решений, применяемых при многокритериальном анализе альтернатив. Причем этот выбор зависит от множества условий, которые накладываются конкретной решаемой задачей. Кроме самого метода важно качество его программной реализации. Необходимо учесть пожелания ЛПР по точности решения, по времени, которое он может потратить на ввод предпочтений, по быстрдействию при поиске рационального решения и по другим факторам. Все эти факторы могут быть разделены на 2 группы: свойства присущие методу теории принятия решений, который применяется (обычно это метод скаляризации векторного критерия), и свойства присущие программной реализации данного метода.

В первую группу свойств входят:

- точность (оценивается как процент совпадений при выборе альтернатив с использованием данного метода поддержки решений и при непосредственном выборе без использования каких-либо методов в задачах, в которых ЛПР не испытывает затруднений с непосредственным выбором);
- трудоемкость ввода и редактирования предпочтений для ЛПР (оценивается суммарное время, требуемое для ввода весов, парных сравнений и т.д.);
- размерность по числу критериев, числу градаций на шкалах, числу альтернатив (оценивается максимальная размерность, с которой ЛПР может работать);
- алгоритмическая сложность (асимптотическая сложность $O(g(n,m))$ алгоритма ранжирования, отбора альтернатив или оптимизации, где n - число критериев и m – число альтернатив);
- понятность (время, требуемое на изучение метода);
- требования к исходным данным по оцениваемым альтернативам (лексические оценки значений критериев, количественные оценки значений критериев, нечеткие оценки значений критериев).

Вторая группа свойств - свойства программной реализации СППР, должны оцениваться по существующим стандартам качества ISO 9126. К требуемым свойствам программной реализации СППР относятся:

- удобство интерфейса, простота изучения и простота использования;
- эффективность по времени отклика системы;
- эффективность времени поиска решения (оценка максимального, минимального и среднего времени решения задачи заданной размерности на вычислительных средствах ЛПР,);
- эффективность использования ресурсов (оперативной памяти, процессоров, внешних запоминающих устройств);
- переносимость;
- масштабируемость;
- интегрируемость;
- надежность (способность СППР в течение заданного срока работы с заданной вероятностью функционировать без ошибок и сбоев);
- защищенность.

В резюме по четвертой главе сделаны следующие выводы:

1. Разработаны принципы проектирования СППР, которые могут использоваться широким кругом разработчиков. Эти принципы позволяют работать с векторным критерием высокой размерности и объединять различные методы теории принятия решений.

2. Разработана унифицированная концептуальная модель реляционной базы данных СППР, инвариантная по отношению к предметной области, позволяющая проводить настройку на конкретную задачу без изменения структуры базы данных.

3. Разработан каркасный подход к трехуровневой архитектуре программного обеспечения СППР, позволяющий проводить быструю и эффективную адаптацию оболочки СППР к решаемой задаче с учетом предпочтений ЛПР, а также проводить быстрое внедрение СППР с интеграцией в информационную среду предприятий.

4. Создан набор рекомендаций, обеспечивающих получение качественного программного обеспечения СППР при решении конкретных задач.

5. Разработаны инструментальные средства поддержки процесса управления разработкой СППР, в том числе имитационная модель для получения вероятностно-временных оценок производительности сотрудников занятых в разработке ПО СППР.

В пятой главе рассмотрены вопросы информатизации и автоматизации формирования Этапной программы (ЭП) научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте МКС. Осуществлена разработка СППР «КОСМОС» для определения приоритетности космических экспериментов и разработана методика составления плана на основе предпочтений пользователя. СППР «Космос» использует все методологические рекомендации по разработке программного обеспечения СППР, изложенные в четвертой главе, а также унифицированную концептуальную модель реляционной БД СППР.

В настоящее время, в связи с увеличением количества предложений по новым космическим экспериментам (КЭ), а также КЭ, находящимся в стадии подготовки и реализации, актуальным является повышение эффективности экспертных процедур при выявлении приоритетов и формировании ЭП научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на российском сегменте (РС) МКС. Достигнуть этого возможно путем применения информационных, в том числе сетевых, технологий на стадии принятия решений о включении проектов в ЭП.

На базе методологии унифицированной разработки СППР была создана новая СППР «КОСМОС», позволяющая определять приоритетность КЭ. Работа с ней состоит из следующих этапов:

- Ввод векторного критерия для оценки КЭ.
- Ввод экспертами оценок конкретных КЭ по заданному векторному критерию.
- Ввод системы ценностей, отражающей важности конкретных компонент векторного критерия (с помощью метода парных сравнений, зависимых предпочтений или иными формальными методами).
- Вычисление обобщенных оценок КЭ на базе введенной информации в автоматическом режиме.

Для вычисления обобщённых оценок КЭ применяются как формальные методы на основе взвешенной суммы и парных сравнений, так и гибридный метод задания предпочтений.

Обобщенные оценки альтернатив позволяют перейти к следующему этапу работы с системой – это составление плана КЭ. Исходными данными для задачи служат ресурсные ограничения и ранжированный по значению обобщенной оценки список космических экспериментов, полученный в результате обработки экспертных оценок. На заданном временном периоде необходимо спланировать последовательность проведения множества экспериментов на МКС, выбрав их из заданного множества возможных экспериментов и определив моменты их начала.

Каждый КЭ характеризуется коэффициентом полезности (соответствует обобщенной оценке), длительностью, количеством необходимых для его проведения ресурсов различного вида как складываемого, так и не складываемого (мощностного) типа. Действует условие непрерывности проведения КЭ (начавшись, он не прерывается до его полного окончания). На проведение некоторых КЭ заданы условия выполнения из технологической последовательности (например, эксперимент j может начаться только после окончания экспериментов k и l).

Весь плановый период разбивается на дискретные составляющие. На борту МКС имеется необходимый набор ресурсов обоих типов. Для мощностных ресурсов заданы их величины, не изменяемые по дням. Для складываемых ресурсов заданы величины, которые будут расходоваться на реализацию выбранных КЭ в течение некоторого интервала пополнения, заданного в выбранных временных единицах. Интенсивность расхода складываемых ресурсов предполагается равномерной в течение всего времени проведения эксперимента. После окончания очередного интервала пополнения неизрасходованные складываемые ресурсы восстанавливаются до заданного фиксированного значения.

Составленный план должен удовлетворять всем ресурсным ограничениям и быть оптимизирован по векторному критерию, включающему следующие составляющие:

- 1) максимум суммарной обобщенной оценки включенных в план экспериментов,
- 2) минимум средневзвешенного времени начала экспериментов.

Примем следующие обозначения:

J – общее количество возможных экспериментов для выбора;

j - номер эксперимента ($j \in J$);

q_{jk} - требуемый для проведения j -го эксперимента объем k -го складываемого ресурса ($k = 1, 2, \dots, K$);

V_l - величина l -го мощностного ресурса, имеющегося на МКС в каждый элементарный временной интервал;

τ_j - продолжительность j -го эксперимента (в выбранных единицах, например, в днях; предполагается, что все временные параметры и переменные определяются в этих единицах);

v_{jl} - требуемая для проведения j -го эксперимента величина l -го мощностного ресурса ($l=1, 2, \dots, L$) на каждом элементарном временном интервале в течение времени его проведения;

T – продолжительность всего интервала планирования;

Δ - продолжительность интервала пополнения складированных ресурсов;

t - текущий рассматриваемый элементарный временной интервал ($1, 2, \dots, \Delta, \Delta+1, \Delta+2, \dots, 2\Delta, \dots, \Delta(N-1)+1, \Delta(N-1)+2, \dots, \Delta N$, где N – количество интервалов пополнения складированных ресурсов на всем интервале планирования: $T = \Delta N$);

Q_k - величина k -го складированного ресурса, имеющегося на МКС в начале каждого интервала пополнения;

p_j - коэффициент полезности j -го эксперимента (оценивается на основе многомерной иерархической структуры факторов, учитываемых при оценке общей сравнительной полезности различных экспериментов);

x_j - бинарная оптимизационная переменная, определяющая включение j -го эксперимента в формируемый план ($=1$, если планируется его включение, $=0$ в противном случае);

t_j - дискретная оптимизационная переменная, устанавливающая начало проведения j -го эксперимента;

$f_j(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau \in [1, \tau_j] \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$ - функция, определяющая факт проведения j -го эксперимента в

произвольный рассматриваемый элементарный временной интервал t , при этом $\tau = t - t_j + 1$ – это интервал времени с момента начала j -го эксперимента;

$ps[j, s] = (j, ps[j, s] \in J)$ массив, определяющий перечень номеров экспериментов, предшествующих эксперименту с номером j .

Формализованная постановка задачи планирования имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \max_{x_j, t_j (j \in J)} \left\{ \sum_{j=1}^J x_j p_j; \sum_{j=1}^J x_j p_j (T - t_j) / T \right\} \\ & \sum_{j=1}^J x_j \left\{ \frac{\sum_{t=(n-1)\Delta+1}^{n\Delta} f_j(t - t_j)}{\tau_j} \right\} q_{jk} \leq Q_k, \quad (k=1, 2, \dots, K; n=1, 2, \dots, N) \quad , \\ & \sum_{j=1}^J x_j f_j(t - t_j) v_{jl} \leq V_l, \quad (l=1, 2, \dots, L; t=1, 2, \dots, T), \\ & t_j \geq \max_s \{s \in ps[j, s] : t_p + \tau_p, \text{ где } p = ps[j, s]\} \quad , \\ & x_j \leq t_j \leq T x_j - \tau_j, \quad (j=1, 2, \dots, J), \end{aligned}$$

$$x_j = 0 \text{ или } 1, \quad (j=1, 2, \dots, J).$$

Данная задача планирования относится к классу многокритериальных нелинейных задач дискретного целочисленного (комбинаторного по x_j) программирования. Наиболее подходящим методом решения данной задачи является метод неявного перебора, основанный на локальной стратегии поиска. Этот метод, хотя и не гарантирует нахождения точного оптимального решения, как показывает опыт его использования, но позволяет находить с приемлемыми вычислительными затратами субоптимальные решения. Достоинством метода является возможность эффективного использования эвристик, учитывающих свойства решаемой задачи, при нахождении допустимых решений, при определении области перебора в районе рассматриваемой точки. Кроме того, существует возможность использования случайного механизма для реализации необходимой степени разнообразия при формировании начальных допустимых решений, что повышает вероятность выхода на оптимальное либо близкое к нему решение. На рисунке 7 показан фрагмент начального допустимого плана. В нем некоторые эксперименты не реализуются, так как ресурсов МКС не хватает для проведения всех экспериментов в заданном временном периоде.

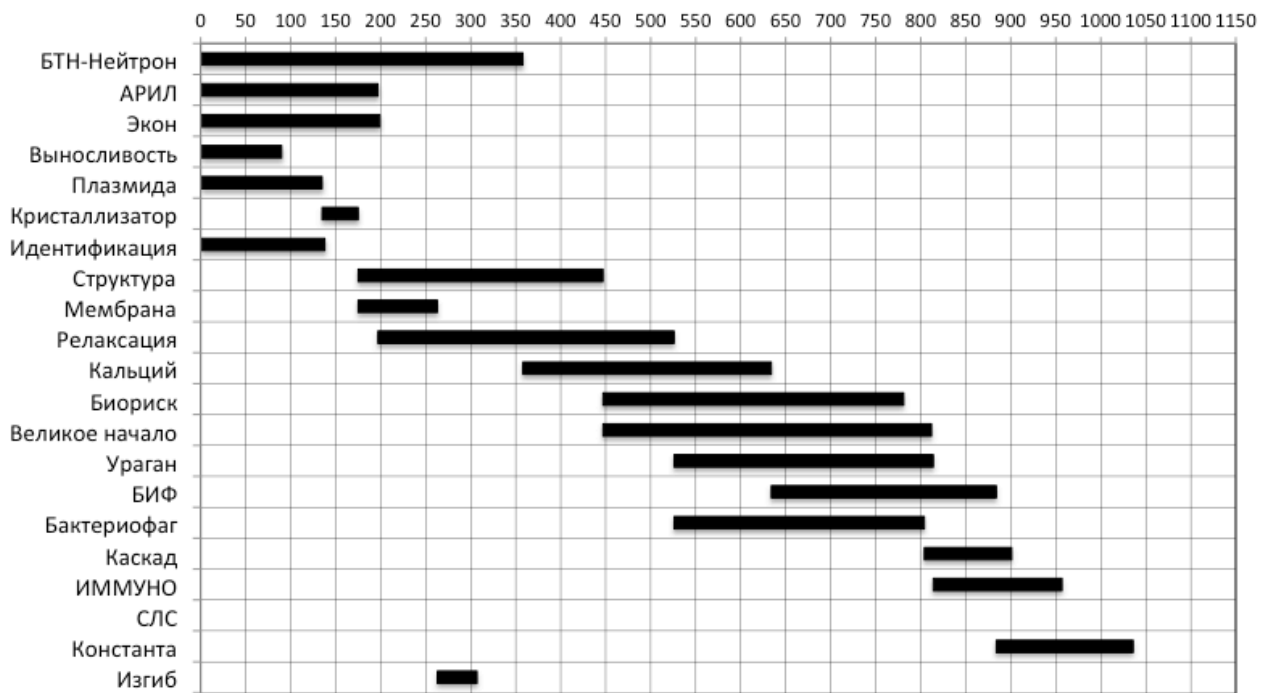


Рис. 7. Начальное допустимое решение

Возможны следующие варианты стратегий улучшения начального допустимого решения:

1. Изъятие из плана некоторого эксперимента, освобождение занимаемых им ресурсов и включение в план эксперимента с большим значением p_j , которому теперь (после снятия эксперимента) ресурсов будет достаточно для включения в план.
2. Изъятие из плана некоторого эксперимента, освобождение занимаемых им ресурсов и включение в план двух или более экспериментов с меньшими значениями p_j (но суммарная

полезность которых больше полезности исключаемого эксперимента), которым теперь (после снятия эксперимента) будет достаточно ресурсов для включения в план.

3. Изъятие из плана некоторого эксперимента, освобождение занимаемых им ресурсов и сдвигка влево (уменьшение) планируемых времен начала других экспериментов, включенных в план.

СППР «КОСМОС» разработана в соответствии с методологией унифицированной разработки систем поддержки принятия многокритериальных решений. В том числе использована базовая часть программного обеспечения на С#. БД СППР Космос является реализацией унифицированной концептуальной модели БД СППР для СУБД MS SQL. Для создания трехуровневой архитектуры СППР, соответствующей методологии, был применен каркас на ASP.NET. Как предложено в рекомендациях по обеспечению качества СППР, взаимодействие с базой данных организовано исключительно через хранимые процедуры. Таким образом достигается оперативность изменений бизнес-логики, повышается производительность и гибкость, обеспечивается более высокий уровень безопасности.

В резюме по пятой главе сделаны следующие выводы:

1. Использование принципов проектирования из методологии унифицированной разработки СППР, обеспечило быстрый (менее месяца) переход с фазы проектирования к фазе кодирования (написания ПО) СППР «КОСМОС».
2. Каркасный подход позволил быстро (в течение одного дня) подключить к работающей СППР «КОСМОС» метод мультипликативной свертки. Обновление затронуло только серверное ПО.
3. Использование унифицированной концептуальной модели БД СППР позволило гибко настраивать векторный критерий в процессе эксплуатации СППР «Космос»: добавлять и удалять компоненты критерия, настраивать права доступа различным пользователям, оперативно редактировать систему ценностей ЛПР.
4. Трёхуровневая архитектура, предложенная в унифицированной методологии, позволила заказчику СППР «КОСМОС» минимизировать затраты на сопровождение рабочих станций.
5. Реализация алгоритма оптимизации программ научно-прикладных исследований в рамках СППР «КОСМОС», позволила получить рациональный план космических экспериментов соответствующий предпочтениям ЛПР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан гибридный метод построения функций предпочтений, который содержит быструю итеративную процедуру ввода и редактирования предпочтений, обеспечивает требуемую точность поддержки принятия решений, позволяет учитывать зависимости по предпочтениям и позволяет работать с векторным критерием высокой размерности. Оригинальность метода

заключается в процедуре разбиения пространства критериев на области и определения отношения доминирования между областями качественными методами теории принятия решений; а внутри области предложено применение количественных методов скаляризации векторного критерия.

2. Разработан метод дискретизации шкал критериев в иерархических структурах уменьшающий информационные потери, который позволяет строить дерево агрегирования показателей с большим количеством уровней при использовании функций предпочтений.

4. Создана методология унифицированной разработки СППР включающая: принципы проектирования СППР, унифицированную концептуальную модель БД, каркасный подход к 3-х уровневой архитектуре программного обеспечения СППР, набор рекомендаций по обеспечению качества программирования СППР. Методология унифицированной разработки СППР позволяет повысить скорость адаптации СППР под требования пользователя, снижает затраты на внедрение и сопровождение СППР, облегчает интеграцию СППР с другими информационными системами.

5. Методология унифицированной разработки СППР применена к задаче формирования программ космических экспериментов (КЭ) проводимых на российском сегменте Международной Космической Станции. На основе методологии была создана СППР «КОСМОС». Она размещена в сети интернет по адресу <http://knts.tsniimash.ru/DSS/>. Открытые исходные тексты СППР «КОСМОС» опубликованы на сайте <https://code.google.com/p/microgravity/>. С помощью гибридного метода была проведена оценка критерия «Значимость КЭ», информационные потери для критерия «Прикладной эффект КЭ» были снижены на 11%. Разработка СППР «Космос» заняла около года и методология унифицированной разработки сократила сроки примерно в 3 раза.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Афонин К.А. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка принятия многокритериальных решений по предпочтениям пользователя. СППР DSS/UTES. – М.: Изд-во МАИ. 2006. 169 с.
2. Бомас В.В., Судаков В.А. Поддержка субъективных решений в многокритериальных задачах. – М.: Изд-во МАИ, 2011. 173 с.

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

3. Бомас В.В., Судаков В.А., Сурков В.В., Хахулин Г.Ф. Применение системы поддержки решений DSS/UTES в задачах мониторинга иерархических структур // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 9. с. 70-73.
4. Судаков В.А. Инструментальные средства для управления разработкой корпоративной информационной системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 10. с. 49-55.
5. Судаков В.А. Инструментальные средства для управления разработкой корпоративной информационной системы (окончание) // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2008. № 11. с. 51-55.
6. Судаков В.А. Автоматизация процесса управления разработкой корпоративной информационной системы // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 1. с. 149-153.
7. Осипов В.П., Судаков В.А., Хахулин Г.Ф. Информационные технологии формирования этапной программы научно-прикладных исследований на российском сегменте Международной

космической станции // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2012, №12, с. 24-28.

8. Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А. Предпосылки унификации программных средств поддержки принятия решений // Программные продукты и системы, 2013, №3, с. 147-150.

9. Ескин В.И., Судаков В.А. Гибридный метод формирования функций предпочтений в компьютеризированных системах поддержки принятия решений // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3, с. 166-172.

10. Осипов В.П., Сивакова Т.В., Судаков В.А., Загребев Б.В., Трахтенгерц Э.А. Методологические основы поддержки принятия решений при планировании научно-прикладных исследований и экспериментов на международной космической станции (МКС) // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т.9. № 3, с. 80-88.

11. Осипов В.П., Загребев Б.В., Судаков В.А. Система поддержки принятия решений для формирования программ исследований на МКС // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 10. с. 28-41.

12. Ескин В.И., Судаков В.А. Автоматизированная поддержка решений с использованием гибридной функции предпочтений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2014. № 3. с. 116-124.

Авторские свидетельства

13. Афонин К.А., Бомас В.В., Судаков В.А. Система поддержки принятия решений DSS/UTES [программа] // Программы для ЭВМ. Свидетельство № 990866 (03.12.1999)

14. Бомас В.В., Ескин В.И., Судаков В.А. Система поддержки принятия решений- ГЛОНАСС [программа] // Программы для ЭВМ/ RU ОБПБТ № 3(80) 20.09.2012, Свидетельство № 2012613276 (06.04.2012).

Публикации по теме диссертации в других изданиях

15. Бомас В.В., Судаков В.А. Модель компонентных объектов в системе поддержки решений по предпочтениям пользователя // Сборник статей. Будущее авиации и космонавтики. - М.: Изд-во МАИ. 1999.

16. Бомас В.В., Ескин В.И., Судаков В.А. Модель компонентных объектов в системе поддержки решений по предпочтениям пользователя // Труды международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». М.: Изд-во МАИ, 1999

17. Судаков В.А. Система поддержки решений ориентированная на предпочтения пользователя // Материалы семинара по искусственному интеллекту. М.: НПК «ПОИСК», 2000.

18. Судаков В.А. Решение многокритериальных задач высокой размерности в системе поддержки решений DSS/UTES // Материалы V Всероссийской конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» – Таганрог: 2000

19. Судаков В.А. Мониторинг иерархических структур // Материалы 8-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика - 2001» – М: МИЭТ, 2001.

20. Бомас В.В., Ескин В.И., Судаков В.А. Оптимальное закругление шкал в иерархии показателей // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Сборник трудов XI международного научно-технического семинара. - М.: МГАПИ. 2002

21. Бомас В.В., Сурков В.В., Судаков В.А. Автоматизированная система мониторинга муниципальных образований (АСМ МО) // Материалы семинара «Казначейская система исполнения бюджета и её модели». М.: Изд-во «Элиот», 2002

22. Бомас В.В., Сурков В.В., Судаков В.А. Система поддержки многокритериальных решений по предпочтениям пользователя (DSS/UTES) // Материалы семинара «Казначейская система исполнения бюджета и её модели». М.: Изд-во «Элиот», 2002

23. Калинин П.Е., Федосеев А.С., Судаков В.А. Формальная грамматика для построения детерминированных функций предпочтений // Современные технологии в задачах управления,

автоматики и обработки информации: Сборник трудов XI международного научно-технического семинара. М.: МГАПИ. 2002

24. Садофьев М.В., Судаков В.А. Разработка Системы Поддержки Решений DSS/UTES на основе идеологии Открытого Программного Обеспечения // Современные технологии в задачах управления, автоматизи и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Алушта, 2008 г. - СПб.: ГУАП, 2008.

25. Судаков В.А. Оценка качества процессов разработки корпоративной информационной системы // Современные технологии в задачах управления, автоматизи и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара. Алушта, сентябрь 2008 г. - СПб.: ГУАП, 2008.

26. Семухин М.В. Судаков В.А. Геокодирование в автоматизированных системах маршрутизации транспорта // Современные технологии в задачах управления, автоматизи и обработки информации. Международный научно-технический семинар. Алушта, 2011.

27. Осипов В.П., Репченков Р.О., Судаков В.А. Методическое и программное обеспечение автоматизации формирования программ космических экспериментов на РС МКС // IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва. ИКИ РАН. 2012.

28. Бомас В.В., Ленюк А.И., Судаков В.А. Методическое и программное обеспечение автоматизации проверки достоверности данных формирующих программу космических экспериментов на РС МКС // Труды московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике — 2012». Москва. 2012.

29. Осипов В.П., Репченков Р.О., Судаков В.А. Прикладная методика распределения ресурсов при планировании космических экспериментов // Материалы IX международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012). Алушта. 2012.

30. Осипов В.П., Судаков В.А. Принципы унификации архитектуры систем поддержки принятия решений // Материалы XVIII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013). Алушта. 2013.

31. Осипов В.П., Судаков В.А. О задаче рационального распределения ресурсов при планировании научно-прикладных исследований на российском сегменте МКС // Материалы XVIII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013). Алушта. 2013.

32. B.V. Zagreev, V.P. Osipov, V.A. Sudakov. A Decision Support System (DSS) for Developing Programs of Scientific and Applied Research and Experiments on the Russian Segment of the ISS // 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2013). Munich, Germany, 1-4 July 2013.

33. Суздальцев А.П., Судаков В.А. Реализация гибридного метода выявления предпочтений в задаче ранжирования космических экспериментов проводимых на российском сегменте МКС // 12-я Международная конференция «Авиация и Космонавтика – 2013», 12-15 ноября 2013 года. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2013. с. 510-512.

34. Судаков В.А. Сетевая компьютерная лаборатория - как средство информационно-аналитической поддержки научно-образовательной деятельности // Третья конференция «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России». Рабочие материалы конференции. Саров. 2014. с. 78.