

Федеральное государственное
.....

На правах рукописи

Левин Марк Шмуилович

**ТИПОВЫЕ КОМБИНАТОРНЫЕ СХЕМЫ
ПОДДЕРЖКИ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ
С МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ**

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2013 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
..... Федеральное государственное учреждение науки Институт системного анализа

доктор технических наук, профессор XXXXXX
XXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX, Национальный исследовательский университет XXXXXXXX XX

доктор технических наук, профессор
.....,

Федеральное государственное учреждение науки Институт
..... Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки XXXXXXXXXXX XXXXXXXXXXXX

Защита состоится “.....” 2014 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д XXX.XXX.XX при по адресу: XXXXXX, Москва,

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Автореферат разослан “.....” 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д XXX.XXX.XX
доктор технических наук, профессор

А. А. Аааааа

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Исследования, анализ, моделирование, проектирование и поддержка решений в области сложных систем имеют особую важность. В частности, в области системного проектирования можно указать следующие базовые направления:

I. Общие подходы: (1.1) иерархическое проектирование систем и декомпозиционные методы; (1.2) модульное проектирование; (1.3) использование матрицы проектной структуры (design structure matrix); (1.4) методы многокритериального принятия решений; (1.5) морфологический анализ; (1.6) объектно-ориентированные методы; (1.7) методы на основе системных компонентов.

II. Формальные подходы: (2.1) аксиоматические методы; (2.2) формальные методы.

III. Оптимизация: (3.1) междисциплинарная оптимизация; (3.2) методы смешанного целочисленного нелинейного программирования; (3.3) методы глобальной оптимизации; (3.4) нелинейная многоцелевая оптимизация; (3.5) многоцелевая эволюционная оптимизация.

IV. Подходы на основе методов искусственного интеллекта: (4.1) специальные экспертные системы и системы на основе баз знаний; (4.2) использование грамматических описаний систем, включая подходы типа composable systems; (4.3) многоагентные подходы; (4.4) методы на основе задач выполнимости.

В России накоплен уникальный опыт в области анализа, моделирования и построения решений на различных этапах жизненного цикла сложных систем. Можно привести примеры научных направлений в данных областях: (1) декомпозиционное проектирование сложных систем (акад. РАН П.С. Краснощеков и др., ВЦ РАН); (2) теория решения изобретательских задач Г. Альтшуллера (ТРИЗ); (3) морфологический синтез (угольных шахт, химических технологий) с использованием многокритериального выбора (акад. РАН С.В. Емельянов, д.т.н. О.А. Сергеев, и др.; ИПУ РАН, ИСА РАН и ИМАШ РАН); (4) синтез системных решений на основе морфологического и многокритериального анализа, близости решений к идеальным композициям (к.т.н., д.с.н. В.Н. Якимец и др.; ИСА РАН); (5) аппроксимационно-комбинаторный метод к построению развивающихся систем (д.т.н. В.Р. Хачатуров, ВЦ РАН); (6) распределенные системы поддержки процессов принятия решений (д.т.н. Э.А. Трахтенгерц, ИПУ РАН); (7) интерактивные подходы к синтезу структур (д.т.н. Е.И. Артамонов и др., ИПУ РАН); (8) системная среда САПР для проектирования СВИС (акад. РАН А.Л. Стемпковский, Институт САПР РАН); (9) метод исследования пространства параметров (д.ф.-м.н. И.М. Соболев, ИПМ РАН и д.т.н. Р.Б. Статников, ИМАШ РАН & Naval Postgraduate School - USA); (10) декомпозиционные подходы и иерархическая оптимизация (д.ф.-м.н. В.И. Цурков, ВЦ РАН); (11) моделирование иерархических систем (член-корр. РАН Ю.С. Попков, ИСА РАН); (12) математические методы виртуального проектирования технологий (акад. РАН И.М. Макаров, д.т.н. В.З. Рахманкулов, к.ф.-м.н. А.А. Ахрем, ИСА РАН); (13) конфигурация и реконфигурация системных решений на основе искусственного интеллекта (в частности, constraint satisfaction problem, fuzzy sets, concurrent engineering, онтологические подходы) (д.т.н. А.В. Смирнов, СПИИ РАН); (14) композиционные методы построения информационных систем (д.ф.-м.н. Л.А. Калиниченко и др., ИПИ РАН); (15) поисковое конструирование; (16) синтез иерархических систем управления (д.т.н. В.Н. Цыгичко и др., ИСА РАН); (17) оптимизационные методы построения структур организаций (член-корр. РАН, д.т.н. Д.А. Новиков, д.ф.-м.н. А.А. Воронин, к.ф.-м.н. С.П. Мишин, к.т.н. М.В. Губко; ИПУ РАН и Волгоградский гос. университет); (18) автоматизированные методы проектирования, в том числе на основе генетических алгоритмов (д.т.н. И.П. Норенков, МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В последние годы в различных областях значительно возрастает значимость модульности и иерархических модульных систем. Во многих областях созданы и создаются библиотеки и каталоги компонентов (локальных решений), или такие локальные решения можно полу-

чить за счет информационного анализа имеющихся баз данных и заказать. Иными словами, построение сложных решений во многих приложениях теперь основывается на подборе вариантов локальных компонентов и композиции их в результирующее составное системное решение. Кроме того, актуальными становятся задачи реконфигурация существующих сложных системных решений. Таким образом, модульность является основой практически для всех этапов поддержки решений на этапах жизненного цикла модульных систем. При этом представляется целесообразным переход к разработке набора (специального уровня) системных задач (комбинаторных схем) поддержки решений на этапах жизненного цикла модульных систем, включая построение модели системного решения, оценивание, синтез, выявление узких мест, улучшение, многостадийное проектирование, моделирование эволюции и прогнозирование. Указанные комбинаторные схемы реализуются в виде комбинаторных методов, включающих модели, алгоритмы, человеко-машинные процедуры и их комбинации. Кроме того, важным является подготовка специалистов.

Цели работы. Целью работы является разработка и применение новых методологических подходов к поддержке решений на этапах жизненного цикла модульных систем в виде типовых комбинаторных схем (frameworks): построение моделей системных решений, оценивание модульных решений, комбинаторный синтез (конфигурация), улучшение, моделирование эволюции и прогнозирование и др. (Рис. 1). Предложенные комбинаторные схемы базируются на новой иерархической морфологической модели системного решения (расширение модели из морфологического анализа: иерархия системного решения, порядковые или специальные интервальные оценки альтернатив для частей решения, порядковые оценки совместимости альтернатив для различных частей решения) (Рис. 2).

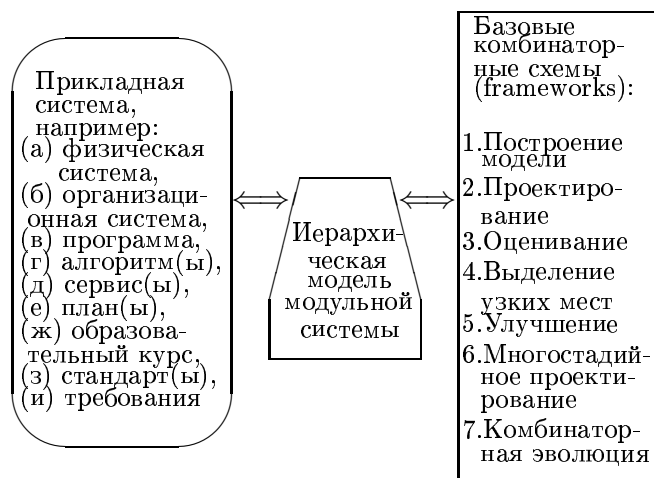


Рис. 1. Система - модель - схемы поддержки

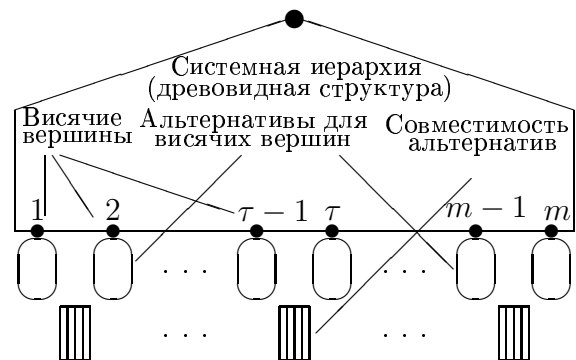


Рис. 2. Морфологическая модель

Методы исследования. Теория многоуровневых иерархических систем, системный анализ, теория графов, комбинаторная оптимизация, теория многокритериального принятия решений, морфологические методы, прикладные исследования.

Научная новизна и ценность. В диссертационной работе сформировано новое направление "Типовые комбинаторные инженерные схемы для поддержки решений на этапах жизненного цикла модульных систем с морфологической структурой", имеющее широкое приложение при построении и трансформации (реинжиниринг) сложных модульных системных решений в различных отраслях. В рамках данного исследования предложено следующее: (1) типовые комбинаторные схемы поддержки решений на этапах жизненного цикла модульных

систем (построение иерархических моделей системных решений T_1 , комбинаторный синтез T_2 , оценивание T_3 , выявление узких мест T_4 , улучшение T_5 , построение траекторий систем T_6 , комбинаторное моделирование эволюции системных решений и прогнозирование T_7) [2, 10, 11, 13, 14, 34], кроме того предложена дополнительная схема(ы) агрегации модульных решений [14]; (2) новая иерархическая задача о рюкзаке со специальным логическим ограничением (для проектирования оверлейной структуры программного комплекса и других приложений), для ее решения разработан новый тип приближенного полиномиального алгоритма с относительной погрешностью по целевой функции и относительной погрешностью по ограничению [1, 48]; (3) новая иерархическая морфологическая модель системы с учетом иерархической структуры системного решения, качества проектных (локальных) альтернатив для частей или компонентов (порядковые оценки или интервальные оценки в виде мультимножеств), качества совместимости проектных альтернатив для различных частей (порядковые оценки) [1, 6]; (4) новый метод “иерархического морфологического многокритериального проектирования” (ИММП) для комбинаторного синтеза модульных системных решений на основе комбинаторной задачи морфологической клики или задач рюкзака типа [1, 2, 6, 7, 8, 9, 10]; (5) новый тип интервальных оценок в виде мультимножеств и соответствующий вариант ИММП (с использованием оптимизационных моделей на основе поиска решений в виде медиан) [15, 39]; (6) новая векторная мера близости для ранжировок [1, 31]; (7) новый комбинаторный подход к интеграции (fusion) данных в виде потоков графов на основе клик [13]; (8) новый подход к морфологическому построению параллельно-последовательных стратегий решений задач (на примере многокритериального ранжирования альтернатив, реализовано в СППР КОМБИ), при этом формируется библиотека методов в виде операционной морфологической среды [1, 50]; (9) новая морфологическая схема решения для расширенной задачи размещения (на основе ИММП) [1, 10].

Практическое использование результатов работы. Перечень практического использования включает следующее: (1) оптимизация оверлейной структуры программного комплекса ‘ИПС Геология’ - Центральный геофизический трест Министерства геологии РФ (1979) (часть кандидатской диссертации автора) [3, 48]; (2) программный комплекс ‘Система поддержки принятия решений КОМБИ’ (DSS COMBI) (разработан совместно и А.А. Михайловым) сдан в фонд алгоритмов и программ АН СССР (ВЦ РАН) (1989-1990) [50, 51] (3) новая методика комбинаторного планирования геологических исследований (на примере месторождений полуострова Ямал) [52]; (4) иерархическое комбинаторное моделирование обобщенных планов лечения астмы у детей и синтеза таких планов применительно к конкретному типу пациента (Федеральное государственное бюджетное учреждение “Московский НИИ педиатрии и детской хирургии”, 2004) [2, 18]; (5) новый факультетский курс “Проектирование систем”, факультет радиотехники и кибернетики, Московский физико-технический институт (государственный университет) (2004-2008) [4, 33, 37]; (6) методы многокритериального проектирования сетей передачи информации и методы модульного синтеза сетевых протоколов и стандартов передачи мультимедийной информации в исследовательских работах Федерального государственного бюджетного учреждения науки ИППИ РАН им. А.А. Харкевича в рамках выполнения НИР по проектам Министерства образования и науки РФ [12, 23, 26, 27, 28, 38, 39, 40, 45, 46, 63]: (а) “Методы проектирования компьютерных сетей” (ГК N 37.053.11.0063, 2004 г.), (б) “Разработка технологии создания нового поколения широкополосных телекоммуникационных средств комплектации беспроводных сетей передачи данных, голоса и видеoinформации” (ГК N 02.447.11.1003, 2005-2006 гг.), (в) “Разработка интегрированной технологической платформы для мониторинга элементов и систем жизненно важной инфраструктуры на основе информационно-коммуникационных технологий расширенного Интернета” (ГК N 02.524.11.4002, 2007-2009 гг.), (г) “Методы обеспечения качества обслуживания при доступе к широкополосным мультимедийным услугам в беспроводных

самоорганизующихся сетях” (соглашение N 8330, 2012-2013 гг.), (д) “Методы плавного снижения качества передачи видеопотока при возникновении перегрузок в широкополосных беспроводных сетях” (соглашение N 8731, 2012-2013 гг.). Опубликованные автором примеры применения комбинаторных схем для различных прикладных систем составляют “библиотеку” приложений-прототипов (около 30) (Таблица 1).

Таблица 1. Приложения и комбинаторные схемы

Приложение	Примененные схемы							Ссылки на публикации автора
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	
1.Электронная торговля	*	*	*	*	*	*	*	[36]
2.Веб-система	*	*	*	*	*	*	*	[25, 55]
3.Стратегия многокритериального ранжирования	*	*						[1, 60]
4.СППР КОМБИ	*						*	[1, 29]
5.Модульный программный комплекс	*	*	*	*	*			[2, 9]
6.Ноутбук	*	*			*			[55]
7.Региональная сеть связи	*		*					[46]
8.GSM сеть связи	*	*						[56]
9.Телеметрическая система	*	*	*	*	*			[24, 59]
10.Система безопасности	*	*	*	*	*			[42, 55]
11.Радио сенсор	*	*	*	*	*			[44, 55]
12.Тестирование	*	*						[21]
13.Протокол связи	*	*	*	*	*	*	*	[16, 43]
14.Человеко-машинный интерфейс	*	*						[1, 8, 30]
15.Здание	*	*	*	*				[2, 20]
16.Управление в умном доме	*	*	*	*	*			[15, 47]
17.Инвестиции	*	*						[1, 55]
18.План маркетинга	*							[5]
19.Вибрационный конвейер	*	*						[1]
20.Геологическое планирование	*	*						[1, 52]
21.Технология бетона	*	*						[2, 17]
22.Планирование лечения	*	*						[2, 18]
23.Учебные курсы	*	*	*	*	*	*	*	[1, 2, 14, 55]
24.Стандарты для мультимедиа	*	*	*	*	*	*	*	[16, 22, 40]
25.Иммунологический анализ	*	*						[2, 19]

Апробация работы. По теме диссертации были сделаны доклады на всесоюзных и международных конференциях: (1) I-е Всесоюзное совещание “Статистический и дискретный анализ нечисловой информации, экспертные оценки и дискретная оптимизация”, Алма-Ата, 1981 г.; (2) III Всесоюзная конференция “Проблемы и методы принятия решений в организационных системах управления”, ИСА РАН (Звенигород, 1988); (3) Международная конференция “Многокритериальные задачи математического программирования”, Ялта, 1988; (4) 2-й, 4-й и 5-й Всесоюзный и Межгосударственные семинары по дискретной математике (МГУ), Москва, 1989, 1993, 1995; (5) Международные конференции “Многокритериальное принятие решений” MCDM: США (1990), Турция (2000), Греция (2006); (6) 3-я и 4-я Международные конференции по человеко-компьютерному взаимодействию (EWHCI): Москва (1993), Санкт-Петербург (1994); (7) 2-я Межд. конф. по параллельному инжинирингу (МакЛеан, США, 1995); (8) 14-я Межд. конференция по прикладной информатике, (Австрия, 1996); (9) Межд. конференция по классификации (Япония, 1996); (10) Межд. конференция по оптимизации SIAM-OPT (Канада, 1996); (11) 13-я и 15-я Межд. конференции по кибернетике и системным исследованиям: Вена, Австрия (1996, 2000); (12) Межд. конференции по прикладному искусственному интеллекту IEA-AIE: Венгрия (2001), Испания (2010); (13) 2-й Московская конференция “Методы декомпозиции в математическом моделировании”, ВЦ РАН (Москва, 2004); (14) Европейская конференция по комбинаторной оптимизации: ECCO-2005 (Минск,

Белоруссия), ECCO-2009 (Израиль); (15) 18-я межд. конференция по теории и методологии проектирования DETC2006 (Филадельфия, США); (16) межд. конф. по системному инжинирингу ICSEM2007: Израиль (2007); (17) 2-я межд. конф. “Информатика в России” CSR-2007 (Екатеринбург); (18) межд. конф. CAD/CAM/PDM, ИПУ РАН: Москва (2006, 2007, 2010); (19) межд. конф. по сложным системам ICCS-2007 (Бостон, США); (20) межд. конф. IEEE Region 8 Sibircon: Новосибирск (2008), Иркутск (2010); (21) межд. конф. по индустриальной информатике INDIN-2009, Cardiff, UK, 2009; (22) межд. конф. по компьютерному образованию CSEDU: Португалия (2010); Голандия 2011); (23) межд. конгресс по современным телекоммуникациям ICUMT: Москва (2010), Ст. Петербург (2012). Были сделаны доклады на научных семинарах в ИСА РАН, ЦЭМИ РАН, МГУ, ВИНТИ РАН, ВЦ РАН, ИПУ РАН, ИППИ РАН в 1979-2013 гг..

Структура и объем. Диссертация состоит из 18 глав (сгруппированных в 3 части: введение, описание типовых комбинаторных схем и описания применений указанных схем в приложениях), заключения и списка литературы. Она содержит 300 страниц основного печатного текста, 315 иллюстраций, 214 таблиц. Список литературы включает 590 наименований.

Публикации. По теме исследования опубликованы:

- (1) 2 личные монографии на английском языке (издательство Springer) [1, 2];
- (2) 14 личных статей в журналах по списку ВАК (включая WoS) [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16];
- (3) 6 статей со коллегами в журналах по списку ВАК (включая WoS) (примеры приложений) [17, 18, 19, 20, 21, 22];
- (4) 6 статей с студентами в журналах по списку ВАК (включая WoS) (примеры приложений, на основе дипломных работ, выполненных по руководством автора, и на основе лабораторных работ по курсу автора) [23, 24, 25, 26, 27, 28];
- (5) 18 статей в трудах международных конференций (Springer, Scopus) [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47];
- (6) 17 прочих публикаций [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65].

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 (введение) содержится краткое описание работы, включая важность модульности систем, основные типы иерархических моделей (деревья, многоуровневые структуры), перечень основных приложений.

Методическая часть работы (главы 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) содержит описания комбинаторных схем, включая реалистичные иллюстративные числовые примеры, облегчающие понимание.

В главе 2 описаны методы построения иерархических моделей систем [35, 61]: экспертная процедура “сверху-вниз”, иерархическая кластеризация “снизу-вверх”, онтологический подход, покрывающие деревья (минимальные покрывающие деревья, включая дерево Штейнера, дерево с максимальным числом висячих вершин), метод оптимальных организационных иерархий, многоуровневые структуры (включая новый тип k -связных структур), морфологическая структура (Рис. 2).

В главе 3 описаны схемы оценивания модульных систем, например, двухуровневая $S = S_1 * \dots * S_i * \dots * S_m$, где S_i соответствует системному компоненту/части [1, 2, 58, 63]. Используются следующие шкалы/оценки (для систем, для системных частей/компонентов и их проектных вариантов DAs, для совместимости компонентов): количественная, порядковая, векторные оценки, шкала в виде частичного порядка (на основе порядковых шкал и на основе интервальных шкал в виде мультимножеств). В качестве основной задачи используется интеграция оценок системных компонентов и оценки совместимости компонентов.

Здесь можно рассмотреть два случая: (1) шкала для качества системы на основе порядковых оценок системных компонентов (оценка системного компонента по шкале: $\iota = \overline{1, l}$; 1 соответствует наилучшему значению); (2) шкала для качества системы с порядковыми оценкам системных компонентов и порядковых оценок совместимости между системными компонентами (оценка совместимости системных компонентов по шкале: $w = \overline{1, \nu}$; ν соответствует наилучшему уровню).

Для системы, состоящей из m частей/компонентов, дискретная область (“пространство”, частичных порядок, “решетка”) основана на векторе: $N(S) = (w(S); n(S))$, где $w(S)$ равен минимуму парной совместимости между проектными вариантами DAs (соответствующим разным системным компонентам), (т.е., $\forall P_{j_1}$ и P_{j_2} , $1 \leq j_1 \neq j_2 \leq m$) in S , $n(S) = (\eta_1, \dots, \eta_r, \dots, \eta_k)$, где η_r равен числу DAs на уровне качества r в S ($\sum_{r=1}^k n_r = m$). Используются порядковые шкалы: (а) порядковая шкала для элементов (приоритеты): [1, 2, 3], (б) порядковая шкала для совместимости: [0, 1, 2, 3, 4]. Для данного примера Рис. 3а представляет шкалу качества для системных компонентов и Рис. 3б представляет интегрированную шкалу с учетом оценок совместимости (каждый “треугольник” соответствует шкале на Рис. 3а).

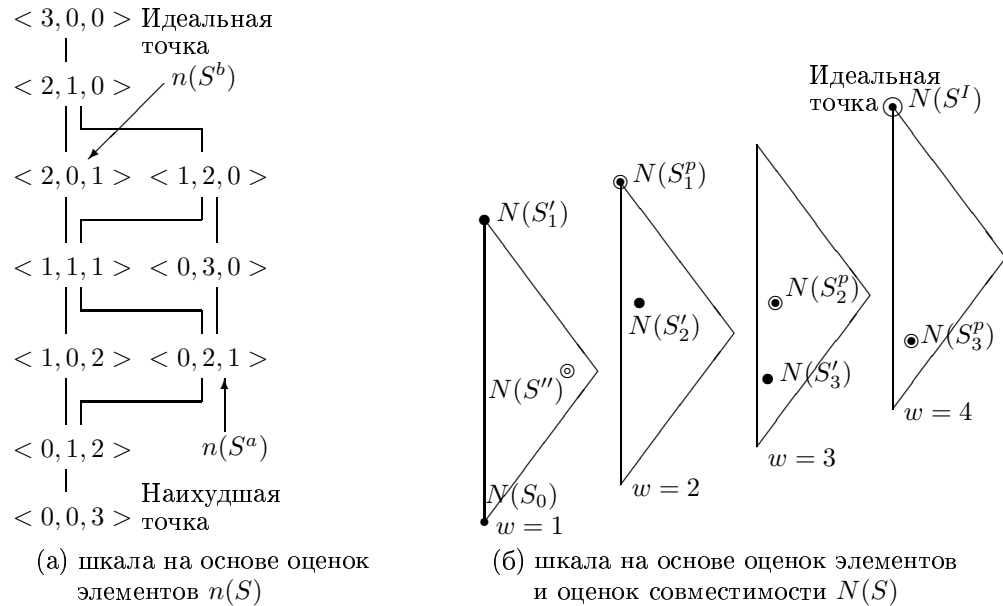


Рис. 3. Шкала для системы на основе порядковых оценок

Можно использовать следующие обобщенные уровни качества системы (шкала D на Рис. 3б):

1. Идеальная точка $N(S^I)$ (S^I - идеальное решения для системы).
2. Уровень Парето-эффективных решений: $\{S_1^p, S_2^p, S_3^p\}$; составные оценки имеют вид: $N(S_1^p) = (2; 3, 0, 0)$, $N(S_2^p) = (3; 1, 1, 1)$, $N(S_3^p) = (4; 0, 2, 1)$.
3. Следующий уровень качества (т.е., область, которая является “соседней” к уровню Парето-эффективных решений): $\{S'_1, S'_2, S'_3\}$; составные оценки имеют вид: $N(S'_1) = (1; 3, 0, 0)$, $N(S'_2) = (2; 1, 1, 1)$, $N(S'_3) = (3; 0, 2, 1)$.
4. Следующий уровень качества: S'' ; составная оценка имеет вид: $N(S'') = (1; 0, 3, 0)$.
5. Наихудшая точка: S_0 ; составная оценка имеет вид: $N(S_0) = (1; 0, 0, 3)$.

Интервальные оценки в виде мультимножеств были предложены автором в (пример шкалы представлен на Рис. 4) [58]. Данный подход заключается в назначении элементов (1, 2, 3, ...) на уровни порядковой шкалы [1, 2, ..., l]. В результате получается оценки в виде мультимножества, где базовое множество включает уровни порядковой шкалы: $\Omega = \{1, 2, \dots, l\}$ (уровни шкалы являются линейно упорядоченными: $1 \succ 2 \succ 3 \succ \dots$) и задача оценивания (для каж-

дого объекта, альтернативы) заключается в выборе мультимножества над множеством Ω с учетом двух условий:

1. мощность полученного мультимножества равна заданному числу элементов $\eta = 1, 2, 3, \dots$ (рассматриваются мультимножества мощности η);

2. “конфигурация” мультимножества имеет вид: отобранные элементы Ω покрывают интервал на шкале $[1, l]$ (т.е., “интервальная оценка в виде мультимножества”).

Таким образом, оценка e для альтернативы A имеет вид: $e(A) = (\eta_1, \dots, \eta_\iota, \dots, \eta_l)$, где η_ι - число элементов на уровне ι ($\iota = \overline{1, l}$), или $e(A) = \{\overbrace{1, \dots, 1}^{\eta_1}, \overbrace{2, \dots, 2}^{\eta_2}, \overbrace{3, \dots, 3}^{\eta_3}, \dots, \overbrace{l, \dots, l}^{\eta_l}\}$. Число мультимножеств мощности η с элементами из исходного конечного множества мощности l , называется “коэффициент мультимножества”: $\mu^{l, \eta} = \frac{l(l+1)(l+2)\dots(l+\eta-1)}{\eta!}$. Это число соответствует числу возможных оценок (без условия 2). В случае выполнения условия 2 число оценок несколько меньше. Обозначим задачу оценивания на основе введенных интервальных оценок в виде мультимножеств: $P^{l, \eta}$. Шкала в виде частично-упорядоченного множества для задачи оценивания $P^{3,4}$ представлена на Рис. 4 (оценивание по порядковой шкале $[1, 3]$ с использованием четырех элементов; оценки $(2, 0, 2)$, $(3, 0, 1)$, $(1, 0, 3)$ - не используются).

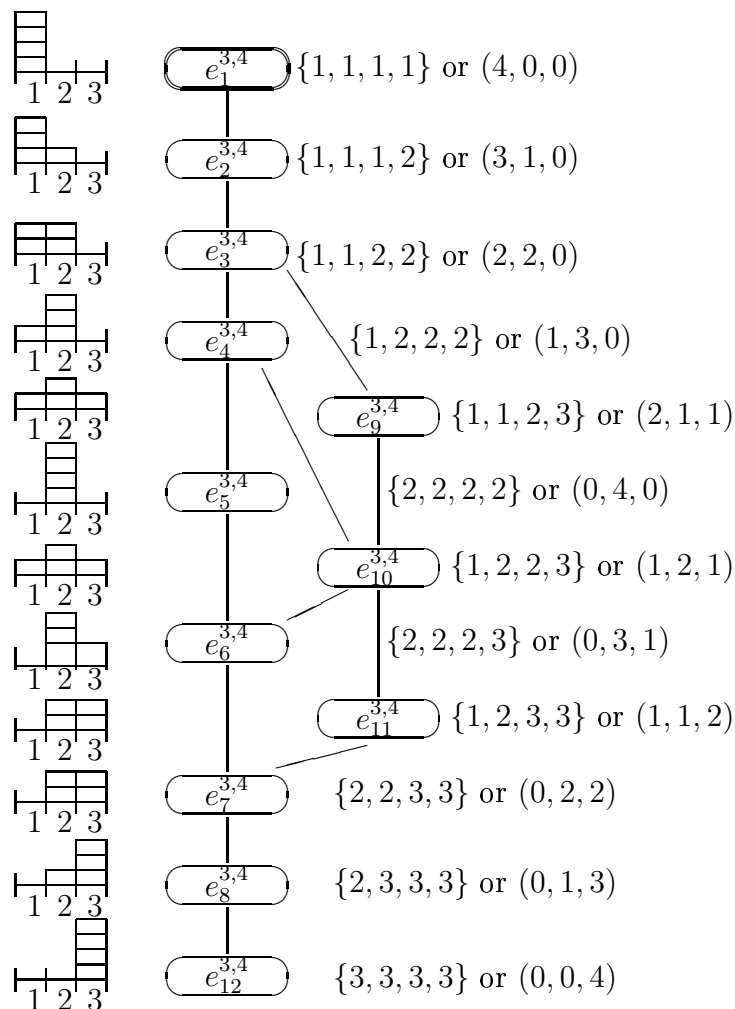


Рис. 4. Шкала для системы на основе задачи $P^{3,4}$

Дополнительно, исследуются две задачи: (1) преобразование шкал (т.е., количественная в порядковую, шкала на основе частичного порядка - в порядковую и т.п.); (2) интеграции шкал (порядковые шкалы в итоговую количественную, порядковые шкалы в итоговую порядковую и др.).

Глава 4 включает обзор методов комбинаторного синтеза модульной системы (Рис. 5, Таблица 2) [1, 2, 10, 56].

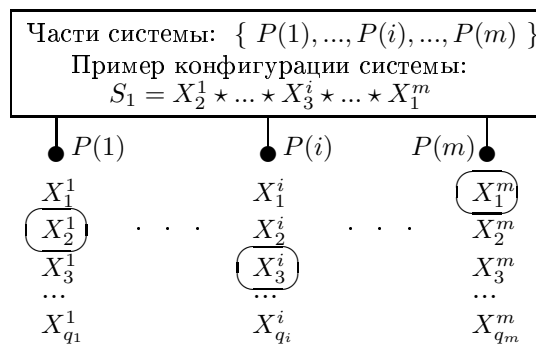


Рис. 5. Конфигурация системы (выбор)

Таблица 2. Основные методы комбинаторного синтеза

Метод	Шкала для DAs	Шкала для IC	Качество решения
1. МА	Нет	$\{0, 1\}$	Допустимость
2. Близость к идеальной точке	Нет	$\{0, 1\}$	Близость к идеальной точке
3. МА&линейное программирование	Количественная	$\{0, 1\}$	Аддитивная функция
4. Задача блочного рюкзака	Количественная	Нет	Аддитивная функция
5. QAP	Количественная	Количественная	Аддитивная функция
6. МА&Парето подход	Нет	$\{0, 1\}$	Многокритериальная оценка
7. ИММП	Порядковая	Порядковая	Многокритериальная оценка
8. ИММП с интервальными оценками в виде мультимножеств	Интервальная в виде мультимножеств	Порядковая	Многокритериальная оценка

Можно проиллюстрировать ИММП, включающий фазы:

Фаза 1. Построение древовидной модели системы (предварительная фаза).

Фаза 2. генерация DAs для висячих вершин системной модели.

Фаза 3. Иерархический выбор DAs и их композиция составные DAs для соответствующего более высокого иерархического уровня системной иерархии (задача морфологической клики).

Фаза 4. Анализ и улучшение результирующих составных DAs (решений).

Пусть система S состоит из m частей (компонентов) (Рис. 5): $\{P(1), \dots, P(i), \dots, P(m)\}$. Для каждой системной части генерируется множество DAs. Задача имеет вид:

Найти составную проектную альтернативу $S = S(1) \star \dots \star S(i) \star \dots \star S(m)$ из DAs (один представитель $S(i)$ для каждого системного компонента $P(i)$, $i = \overline{1, m}$) с ненулевой оценкой совместимости между выбранными проектными альтернативами.

При этом производится поиск составных решений, которые недоминируются по вектору $N(S)$ (т.е., Парето-эффективные решения). Таким образом, базовая версия задачи морфологической клики в базовой версии ИММП соответствует следующей оптимизационной модели (две целевые функции, одно ограничение):

$$\max e(S), \quad \max w(S), \quad s.t. \quad w(S) \geq 1.$$

“Максимизация” $e(S)$ основана на использовании соответствующего частичного порядка.

Очевидная схема решения для указанной задачи включает два этапа (переборный алгоритм):

ШАГ 1. Построить допустимые композиции.

ШАГ 2. Отобрать Парето-эффективные составные DAs (по $N(S)$).

Можно рассматривать эвристические приближенные схемы решения [1]. Например, схема решения может быть направлена на исследование допустимых решений, начиная с идеальной точки и близких к ней решений (с отсевом недопустимых решений).

Метод ИММП иллюстрируется на Рис. 6 на основе численного примера для системы их трех частей $S = X \star Y \star Z$. Приоритеты DAs представлены на Рис. 6 в круглых скобках. В результате получаются составные Парето-эффективные решения (Рис. 6):

$$S_1 = X_2 \star Y_2 \star Z_2, \quad N(S_1) = (1; 2, 1, 0); \quad S_2 = X_1 \star Y_2 \star Z_2, \quad N(S_2) = (2; 1, 2, 0);$$

$$S_3 = X_1 \star Y_1 \star Z_3, \quad N(S_3) = (3; 0, 2, 1).$$

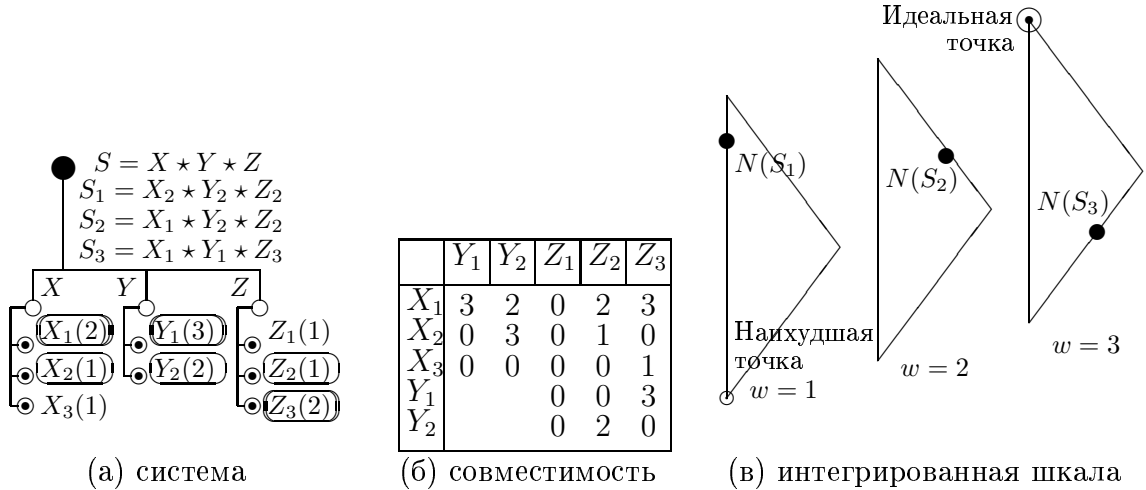


Рис. 6. Пример композиции с ИММП

В методе ИММП с интервальными оценками в виде мультимножеств интервальные оценки используются для оценивания проектных альтернатив DAs. Такой же вид оценки используется для результирующей системы $S = S(1) \star \dots \star S(i) \star \dots \star S(m)$: агрегированная оценка (“обобщенная медиана”) на основе соответствующих оценок компонентов, входящих в решение. Таким образом, $N(S) = (w(S); e(S))$, где $e(S)$ - “обобщенная медиана” на основе оценок компонентов решения. Модифицированная задача (на основе использования оценок в виде мультимножеств) имеет вид:

$$\max e(S) = M^g = \arg \min_{M \in D} \sum_{i=1}^m |\delta(M, e(S_i))|, \quad \max w(S),$$

$$s.t. \quad w(S) \geq 1.$$

Кроме того, формулируется и используется и задача блочного рюкзака с интервальными оценками в виде мультимножеств.

Глава 5 содержит описание схем выявления узких мест (Рис. 7) [1, 2, 64].

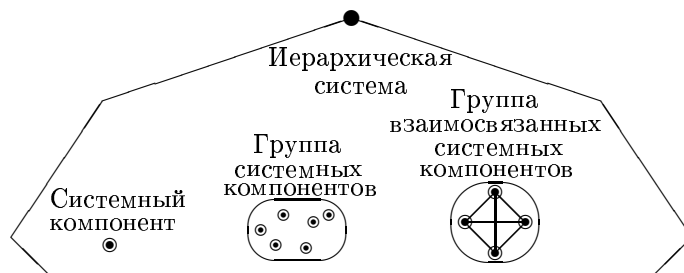


Рис. 7. Система и системные узкие места

Рассматриваемые подходы к выделению системных узких мест приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Подходы к выделению системных узких мест

Рассматриваемые объекты	Базовые методы/модели выделения	Предсказательное выделение (прогноз/динамика)
1. Системный компонент, сбой системного компонента	(а) Парето-диаграмма [49] (б) многокритериальный анализ/ранжирование (sorting) [2, 49]	(а) Парето-диаграмма (прогноз параметров системных компонентов) (б) многокритериальный анализ/ранжирование (sorting) на основе прогноза параметров
2. Взаимосвязи системных компонентов	(а) Парето-диаграмма [49] (б) многокритериальный анализ/ранжирование (sorting)	(а) Парето-диаграмма на основе прогноза параметров системных компонентов (б) многокритериальный анализ/ранжирование (sorting) на основе прогноза параметров
3. Группа системных компонентов или составной сбой	Многокритериальный анализ (sorting) [49, 60]	Многокритериальный анализ (sorting) на основе прогноза параметров сети [49, 60]
4. Критические узлы в сетях	(а) покрывающее дерево с максимальным числом терминалов (б) connected dominating set (в) иерархическое проектирование сети (г) связь узлов низкого качества	(а) покрывающее дерево с максимумом терминалов на основе прогноза (б) connected dominating set (на основе прогноза) (в) иерархическое проектирование сети (на основе прогноза) (г) связь узлов низкого качества (на основе прогноза сети)
5. Группа связанных системных компонентов	(а) ИММП [1, 2, 56, 58] (б) интеграция данных на основе клики [13, 21]	(а) ИММП на основе прогноза системы [1, 2, 56, 58] (б) интеграция данных на основе клики для потоков графов [13]

Рассмотрим проектный пример на основе ИММП. Имеется четырех-компонентная система $S = X \star Y \star Z \star H$. Проектные альтернативы для системных компонентов представлены на Рис. 8 (порядковые оценки качества DAs в виде приоритетов указаны в круглых скобках, использована шкала [1, 3], 1 соответствует наилучшему качеству). Таблица 4 содержит порядковые оценки совместимости (IC) между DAs (шкала [0, 3], 3 соответствует наилучшей совместимости). Получаются два Парето-эффективных системных решения: (i) $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$, $N(S_1) = (1; 2, 1, 1)$; (ii) $S_2 = X_2 \star Y_2 \star Z_2 \star H_2$, $N(S_2) = (2; 0, 1, 3)$.

В качестве системных узких мест рассматриваются системные компоненты (DA) или совместимости между парой DAs. Можно использовать такие схемы выделения узких мест:

Схема 1. Многокритериальное ранжирование системных компонентов (DAs).

Схема 2. Многокритериальное ранжирование связей между компонентами.

Схема 3. Совместное многокритериальное ранжирование DAs и связей между ними.

Схема 4. Выявление связанных системных компонентов (т.е., как составные системные отказы): интеграция данных на основе клики.

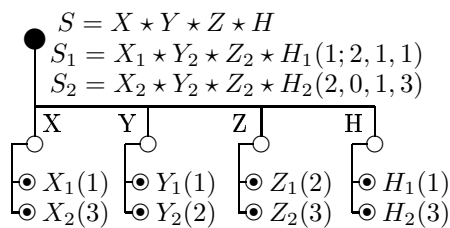


Рис. 8. Система из четырех

Таблица 4. Совместимость

	Y_1	Y_2	Z_1	Z_2	H_1	H_2
X_1	3	2	2	2	1	3
X_2	0	3	2	3	1	2
Y_1			2	2	1	2
Y_2			2	3	2	3
Z_1					1	2
Z_2					3	3

На Рис. 9 представлено системное решение $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$ (включая оценки DAs

и оценки их совместимости). В Таблице 5 представлены шесть узких мест для решения S_1 (по компонентам, по совместимости компонентов).

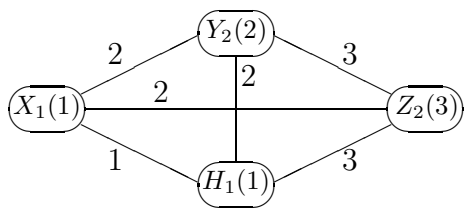


Рис. 9. Представление S_1

Таблица 5. Узкие места, улучшения для S_1

Составные DAs	Узкие места		Операция улучшения w/ι
	DA	IC	
1. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$	Y_1		$2 \Rightarrow 1$
2. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$	Z_2		$2 \Rightarrow 1$
3. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$		(X_1, Y_2)	$2 \Rightarrow 3$
4. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$		(X_1, Z_2)	$2 \Rightarrow 3$
5. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$		(X_1, H_1)	$1 \Rightarrow 3$
6. $S_1 = X_1 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$		(Y_2, H_1)	$2 \Rightarrow 3$

Выделение системных узких мест как группы взаимосвязанных узких мест можно рассматривать как выявление множества системных компонентов низкого качества, которые связаны между собой на высоком уровне совместимости. Такая ситуация соответствует новому типу составных отказов, которые был предложен в [13, 21]. Здесь некоторые “слабые” (т.е., не очень опасные) системные отказы являются “очень сильно” связанными и это может привести к очень серьезным составным системным отказам. Приведенное описание может быть представлено как двух-критериальная оптимизационная задача:

$$\min n(B), \max w(B); \quad B - \text{это подрешение для системного решения } S.$$

На Рис. 10 представлено составное решение $S_2 = X_2 \star Y_2 \star Z_2 \star H_1$, $N(S_2) = (2; 0, 1, 3)$ (из примера на Рис. 8). Для этого четырех-компонентного решения можно рассмотреть три трех-компонентных подсистемы (подрешения):

$$B_1 = X_2 \star Y_2 \star Z_2, \quad N(B_1) = (2; 0, 1, 2); \quad B_2 = X_2 \star Z_2 \star H_2, \quad N(B_2) = (2; 0, 0, 3); \\ B_3 = X_2 \star Y_2 \star H_2, \quad N(B_3) = (2; 0, 2, 1); \quad B_4 = Y_2 \star Z_2 \star H_2, \quad N(B_4) = (3; 0, 2, 1).$$

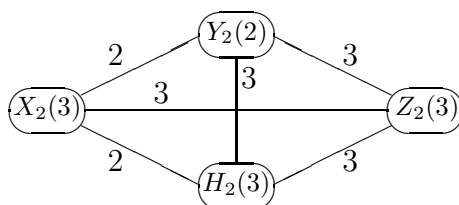


Рис. 10. Представление S_2

Две Парето-эффективных подсистемы (как составных узких мест) имеют вид: B_2 и B_4 .

Предсказательное выделение узких мест при иерархическом морфологическом проектировании может также рассматриваться (т.е., анализ эволюции системы, вычисление прогноза системы, выделение узких мест посредством указанных методов). Приведем упрощенный пример выделения составных узких мест (как подсистем) для четырех-компонентной системы $S = X \star Y \star Z \star H$ с Рис. 8. На Рис. 11 представлен численный пример для эволюции и прогноза решения $S_2 = X_2 \star Y_2 \star Z_2 \star H_2$ ($N(S_2) = 2; 0, 1, 3$). Используется следующая временная ось: базовая временная точка $t = \tau_0$, следующая временная точка (эволюция) $t = \tau_1$, прогнозная временная точка $t = \tau_2$ (т.е., $t = \tau_f$).

Отметим, для базовой временной точки (τ_0), получены две подсистемы (как составные узкие места): $B_2 = X_2 \star Z_2 \star H_2$, $N(B_2) = (2; 0, 0, 3)$; $B_4 = Y_2 \star Z_2 \star H_2$, $N(B_4) = (3; 0, 2, 1)$. Для следующей временной точки, подсистемы и их оценки имеют вид: (i) $t = \tau_1$: $N(B_1^{\tau_1}) = (3; 0, 1, 2)$, $N(B_2^{\tau_1}) = (2; 0, 1, 2)$, $N(B_3^{\tau_1}) = (2; 0, 2, 1)$, $N(B_4^{\tau_1}) = (2; 0, 2, 1)$; (ii) $t = \tau_f(\tau_2)$: $N(B_1^{\tau_2}) =$

$(3; 0, 0, 3)$, $N(B_2^{\tau_2}) = (3; 1, 1, 1)$, $N(B_3^{\tau_2}) = (2; 1, 0, 2)$, $N(B_4^{\tau_2}) = (2; 1, 1, 1)$. В результате, следующие подсистемы получены как составные узкие места:

- (а) $t = \tau_1$ (Fig. 12a): $B_1^{\tau_1} = X_2 \star Y_2 \star Z_2$, $N(B_1^{\tau_1}) = (3; 0, 1, 2)$;
- (б) $t = \tau_f(\tau_2)$ (Fig. 12б): $B_1^{\tau_2} = X_2 \star Y_2 \star Z_2$, $N(B_1^{\tau_2}) = (3; 0, 0, 3)$.

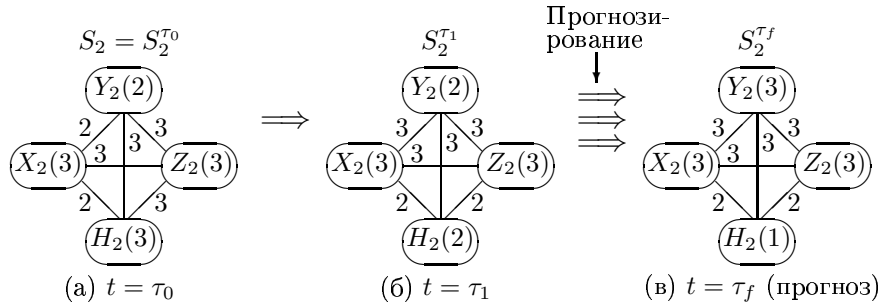


Рис. 11. Эволюция решения S_2 и прогноз

Таким образом, прогнозное узкое место имеет вид: $B_1^{\tau_2} = X_2 \star Y_2 \star Z_2$. На Рис. 13 представлена траектория составного узкого места.

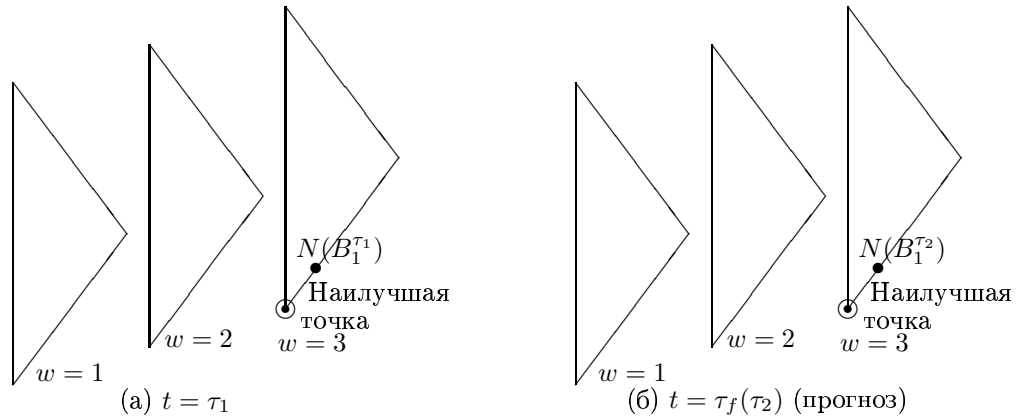


Рис. 12. Шкала частичного порядка для подсистемы B

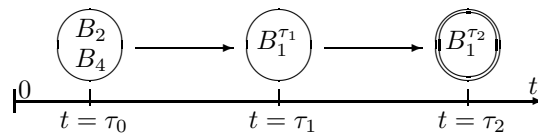


Рис. 13. Траектория узкого места

Глава 6 посвящена схемам улучшения систем (Рис. 14): (а) улучшение системных компонентов и/или их взаимосвязей, (б) улучшение, модификация или расширение структуры системы, (в) расширение системы в виде проектирования дополнительной части, (г) комбинированное улучшение/расширение системы [1, 2, 38]. Описание базовых ситуаций улучшения приведено в Таблице 6.

С общей точки зрения можно исследовать три дополнительные ситуации улучшения системы:

- (1) агрегация нескольких исходных систем,
- (2) улучшение исходной системы с целью формирования набора улучшенных систем,
- (3) улучшение нескольких исходных систем с целью формирования набора улучшенных систем.

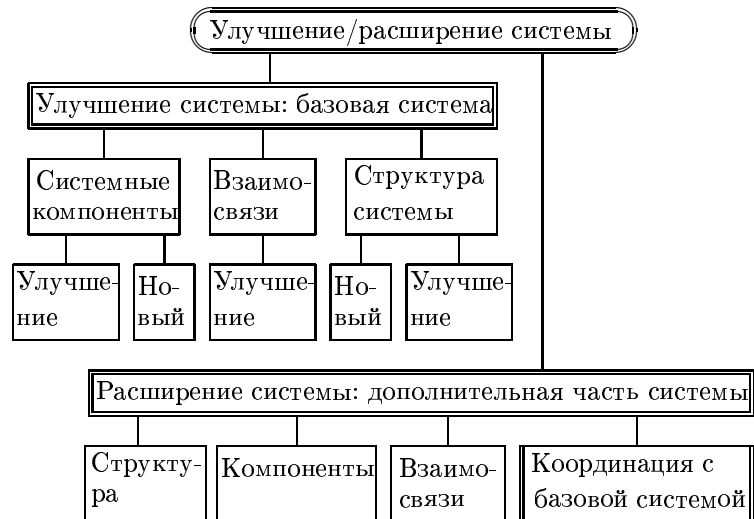


Рис. 14. Действия по улучшению системы

Таблица 6. Ситуации улучшения систем, задачи и модели

Типы улучшения систем	Подходы	Задачи/модели	Некоторые источники
Случай 1 (улучшение компонентов системы): (1.1) улучшение элементов системы	Замена, пере-проектирование	Задачи рюкзачного типа, ИММП, назначение/размещение, перекраска графа	[1, 8] [2, 10, 56] [15, 27]
(1.2) улучшение совместимости элементов	Замена, пере-проектирование	Задачи рюкзачного типа, ИММП, назначение/размещение	[1, 2]
(1.3) совместное улучшение элементов системы и их совместимости	Комбинированные подходы	Составные схемы, перекраска графа, ИММП	[1, 2, 10] [56]
Случай 2 (модификация структуры системы): (2.1) добавление частей структуры системы	Добавление	Задачи рюкзачного типа, ИММП, добавление горячих связей	[27, 61]
(2.2) удаление частей структуры системы	Удаление	Задачи рюкзачного типа, ИММП	[61]
(2.3) модификация структуры системы	Добавление, удаление, агрегация/интеграция, реструктуризация	Задачи покрытия, задачи рюкзачного типа, ИММП, augmentation problem, реоптимизация	[1, 48, 53] [28, 61]
(2.4) совместный случай	Комбинированные подходы	Составные схемы	[61]
Случай 3 (добавление части системы)	Проектирование	Схемы проектирования, задачи рюкзачного типа, ИММП	[38, 61]
Случай 4 (комбинация предыдущих случаев)	Комбинированные подходы	Схемы из задач	[38, 61]

В [53] предложен подход к модификации в области задач комбинаторной оптимизации в виде “реструктуризации” (Рис. 15). Здесь модификация основывается на следующем: включение/удаление элементов (элементов, узлов/вершин, дуг) и изменения структуры. Рассматриваются две характеристики процесса реструктуризации: (i) стоимость реструктуризации решения исходной задачи (т.е., стоимость выбранных модификаций), (ii) близость полученного реструктуризованного решения к целевому решению. Этот тип задач соответствует

перепроектированию (улучшению, обновлению) различных модульных систем [38, 53]. Соответствующая оптимизационная задача решается для двух моментов времени: τ_1 и τ_2 для получения решений S^1 и S^2 . Исследуемая задача реструктуризации заключается в “дешевой” трансформации решения S^1 в решение S^* , которое является очень близким к S^2 . В работе [53], данный подход к реструктуризации описан и иллюстрирован для следующих задач комбинаторной оптимизации: задача о рюкзаке, задача блочного рюкзака, задача о назначении, задачи покрывающих деревьев. Рис. 16 иллюстрирует задачу “реструктуризации”.

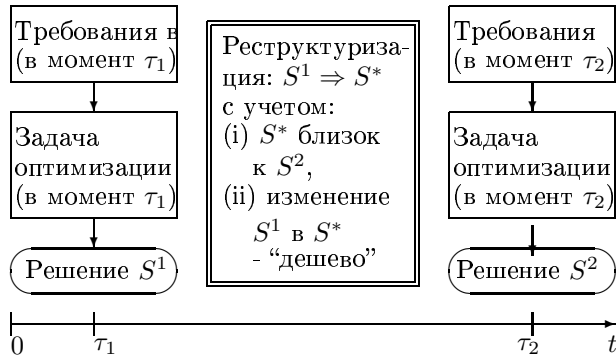


Рис. 15. Процесс реструктуризации

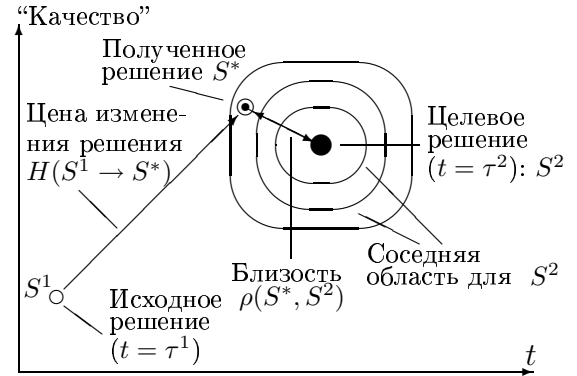


Рис. 16. Задача реструктуризации

Пусть P - задача комбинаторной оптимизации с решение в виде структуры S (т.е., подмножество, граф), Ω - исходные данные (элементы, параметры элементов и др.), $f(P)$ - целевая функция(ии). Таким образом, $S(\Omega)$ - решение для исходных данных Ω , $f(S(\Omega))$ - соответствующая целевая функция. Обозначим исходные данные на исходной стадии Ω^1 , $f(S(\Omega^1))$ - соответствующая целевая функция, Ω^2 - исходные данные на следующей стадии, $f(S(\Omega^2))$ - соответствующая целевая функция.

Следующие решения могут быть рассмотрены: (а) $S^1 = S(\Omega^1)$ с $f(S(\Omega^1))$ и (б) $S^2 = S(\Omega^2)$ с $f(S(\Omega^2))$. Можно также исследовать цену трансформации одного решения в другое: $H(S^\alpha \rightarrow S^\beta)$. Пусть $\rho(S^\alpha, S^\beta)$ - близость (похожесть) между решениями S^α и S^β , например: $\rho(S^\alpha, S^\beta) = |f(S^\alpha) - f(S^\beta)|$. Следует отметить, что функция $f(S)$ является векторной функцией. В результате получается следующая задача реструктуризации (базовая версия):

Найти решение S^* с учетом следующего :

- (i) $H(S^1 \rightarrow S^*) \rightarrow \min$, (ii) $\rho(S^*, S^2) \rightarrow \min$ (или ограничение).

Таким образом, базовая оптимизационная модель может иметь вид:

$$\min \rho(S^*, S^2) \quad s.t. \quad H(S^1 \rightarrow S^*) \leq \hat{h},$$

где \hat{h} ограничение для цены изменения решения.

Таблица 7 содержит список базовых задач модификации структур.

Далее приводится задача трансформации дерева (с весами вершин и весами ребер/дуг) посредством интеграции (конденсации) некоторых соседних вершин с учетом ограничений на общий вес максимального хвоста дерева (т.е., длина от корня дерева до висячей вершины). Данная задача была впервые сформулирована как проектирование оверлейной структуры для модульной программной системы [3, 48]. Интегрирование (склеивание) программных модулей требует дополнительной памяти, но это позволяет уменьшить время (т.е., частоту) загрузки некоторых соответствующих модулей. Также могут рассматриваться и другие приложения (построение иерархической структуры данных, иерархическая структура сайта в Интернете, задача вызова - call problem). На Рис. 17 и Рис. 18 содержится иллюстрация на примере проектирования оверлейной структуры на основе интеграции модулей, когда различные программы или модули данных могут использовать одни и те же части ОЗУ (RAM).

Для данной задачи (обобщение задачи блочного рюкзака на древовидной структуре и при специальных ограничениях) был предложен новый тип приближенного полиномиального алгоритма с ограниченной относительной погрешностью (FPTAS) [3, 48].

Таблица 5. Модификация структур

Задача	Исходная структура	Финальная структура	Некоторые источники
1. Модификация древовидных структур:			
1.1. Задача 'горячих' связей (hotlink assignment problem)	Древовидная структура	Древовидная структура с дополнительной связью из корня	[61]
1.2. Модификация дерева: 'склеивание' взвешенных вершин	Взвешенное дерево	Взвешенное дерево с агрегированными вершинами	[1, 3, 48, 61]
1.3. Трансформация дерева в дерево Штейнера	Дерево	Дерево Штейнера	[28, 61]
2. Трансформация морфологической структуры	Морфологическая структура	Морфологическая структура с требуемыми свойствами	[1, 2, 61]
3. Трансформация уровней структур	Уровневая структура	Уровневая структура с требуемыми свойствами	[61]
4. Задача пополнения графа (graph augmentation problem)	Связный граф	Связный граф с требуемыми свойствами (т.е., с улучшенной связностью)	

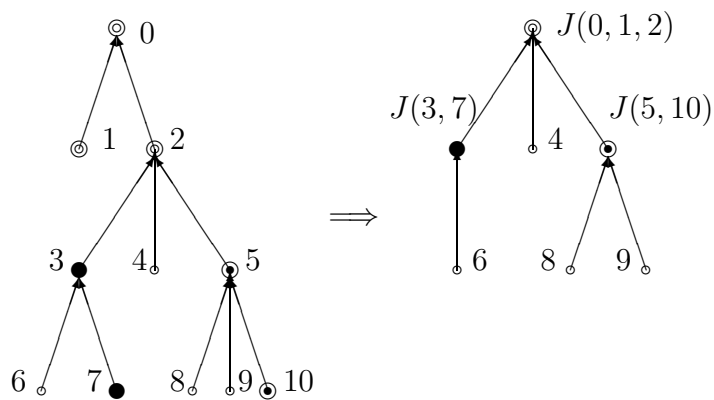


Рис. 17. Преобразование программы (оверлейная структура)

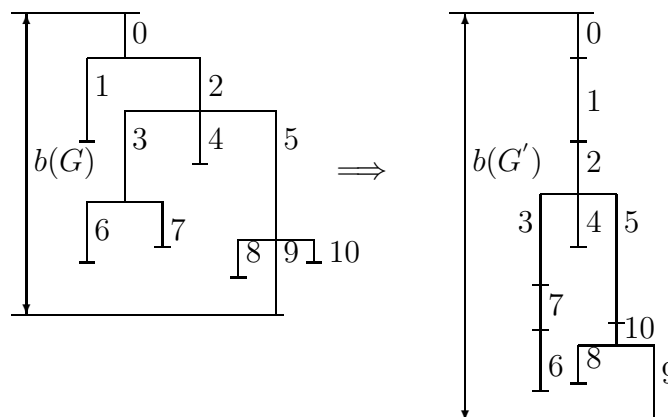


Рис. 18. Использование памяти (ОЗУ)

Пусть $G = (A, \Upsilon)$ - ориентированное дерево, где A - множество вершин (модули программ или данных) ($|A| = n$). Пусть Υ - многозначное отображение A в A . Дуги в G ориентированы от корня $a_o \in A$ к висячим вершинам. Каждая вершина $a \in A$ имеет положительных вес (требуемый объем оперативной памяти ОЗУ - RAM) $\beta(a) > 0$. Каждая дуга (a', a'') ($a', a'' \in A$ и $a'' \in \Upsilon a'$) имеет вес (т.е., исходную частоту загрузки в оперативную память) $w(a', a'') > 0$. Этот вес дуги соответствует частоте вызова/обращения (и загрузки) из модуля a' к модулю a'' .

Пусть $\pi(a^1, a^l) = \langle a^1, \dots, a^i, \dots, a^l \rangle$ будет путь ($a^{j+1} \in \Upsilon a^j, j = 1, \dots, l-1$). Для каждого пути вводится вес $\lambda(\pi(a^1, a^l)) = \sum_{i=1}^l \lambda(a^i)$. Весом графа G будет значение

$$\lambda(G) = \max_{a'' \in A^o} \{\lambda(\pi(a_o, a''))\},$$

где $A^o = \{a \in A \mid \Upsilon a = \emptyset\}$ - множество висячих вершин. Пусть $G_a = (A_a, \Upsilon)$ обозначает поддереву с корнем $a \in A$, и A_a содержит вершину a и все другие вершины, которые могут достигаться из a . Граф $(A_a \setminus a, \Upsilon)$ будет называться *хвост* вершины a , и значение $\lambda^-(a) = \lambda(G_a) - \lambda(a)$ будет называться *весом хвоста* вершины a . Очевидно, что

$$\lambda(a) = \max_{a' \in \Upsilon a} \{\lambda(G_{a'})\}.$$

Далее используются вес $w(a)$ и бинарная переменная $x(a) \forall a \in A \setminus a_o$ (1 соответствует ситуации, когда дуга, направленная к a , конденсируется - сжимается). Теперь можно определить трансформацию графа G на основе интеграции вершин a' и a'' :

(а) вершина a' изменяется на $J(a', a'')$ с следующими свойствами:

$$\lambda(J(a', a'')) = \lambda(a') + \lambda(a'') \quad \Upsilon J(a', a'') = (\Upsilon a' \cup \Upsilon a'') \setminus a'';$$

(б) вершина a'' и дуги, которые идут из этой вершины, удаляются.

Для графа G рассматривается бинарный вектор $\kappa(a)$, который включает все $x(a) \forall a \in A \setminus a_o$. Таким образом, исследуются веса вершины a и ее *хвоста* как функции вектора κ : $\lambda(a, \kappa), \lambda^-(a, \kappa)$. Теперь можно рассмотреть задачу (тип 1):

$$\max W(\kappa) = \sum_{a \in A \setminus a_o} x(a)w(a) \quad s.t. \quad \lambda(a_o, \kappa) + \lambda^-(a_o, \kappa) \leq b,$$

где b - положительная константа (т.е., объем доступной оперативной памяти - ОЗУ). Эта формулировка задачи соответствует примеру на Рис. 17 и Рис. 18.

Дополнительно, рассматривается аналогичная задача (тип 2) с другими ограничениями:

$$\lambda(a_o, \kappa) \leq b^-, \quad \lambda^-(a_o, \kappa) \leq b^+, \quad b^- + b^+ = b.$$

Следует отметить, что иллюстрации для данного класса рассматриваемых комбинаторных моделей представлены на Рис. 19 (базовые задача о рюкзаке и задача блочного рюкзака) и на Рис. 20, соответствие задачи и иллюстрации представлено в Таблице 8.

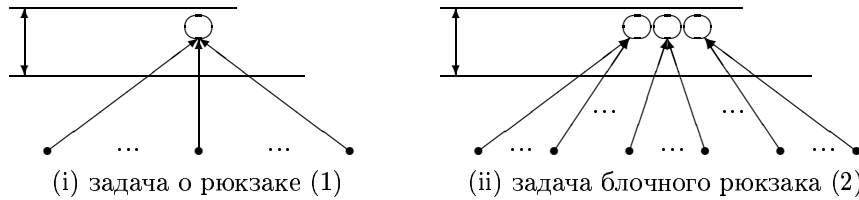


Рис. 19. Задачи о рюкзаке и блочного рюкзака [1, 3, 48]

Теперь можно рассмотреть некоторые простые случаи задачи (тип 1 и тип 2). Пусть $\Upsilon a_o = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ (и u_i) соответствует некоторой дуге (a_o, a_i) ($w(u_i) = w_i$). Тогда соответствующая задача (задача 1, эквивалент задачи о рюкзаке, Рис. 19i) имеет вид:

$$\max \sum_{i=1}^m x_i w_i \quad s.t. \quad \lambda(a_o) + \sum_{i=1}^m x_i \lambda(a_i) \leq b, \quad x_i \in \{0, 1\}.$$

Целевая функция в других простых случаях (1.1 - Рис. 20а, 1.2 - Рис. 20b, 1.3 - Рис. 20с, 1.4 - Рис. 20d), которые основаны на задаче о рюкзаке (задача 1, Рис. 19i), является аналогичной; далее только ограничения будут указываться для этих задач.

Задача 1.1 (Рис. 20а) включает следующее ограничение:

$$\lambda(a_o) + \sum_{i=1}^m x_i \lambda(a_i) + \max_{1 \leq i \leq m} ((1 - x_i) \lambda(a_i)) \leq b.$$

Эта задача соответствует формированию загрузочного “программного ядра” во многих программных пакетах.

Задача 1.2 (Рис. 20b) типа 2 имеет вид:

$$\lambda(a_o) + \sum_{i=1}^m x_i \lambda(a_i) \leq b^-, \quad \max_{1 \leq i \leq m} ((1 - x_i) \lambda(a_i)) \leq b^+.$$

Задача 1.3 (Рис. 20с) имеет вид:

$$\lambda(a_o + \sum_{i=1}^m x_i \lambda^-(a_i)) + \max_{1 \leq i \leq m} ((1 - x_i) \lambda^-(a_i) + \lambda^+(a_i)) \leq b.$$

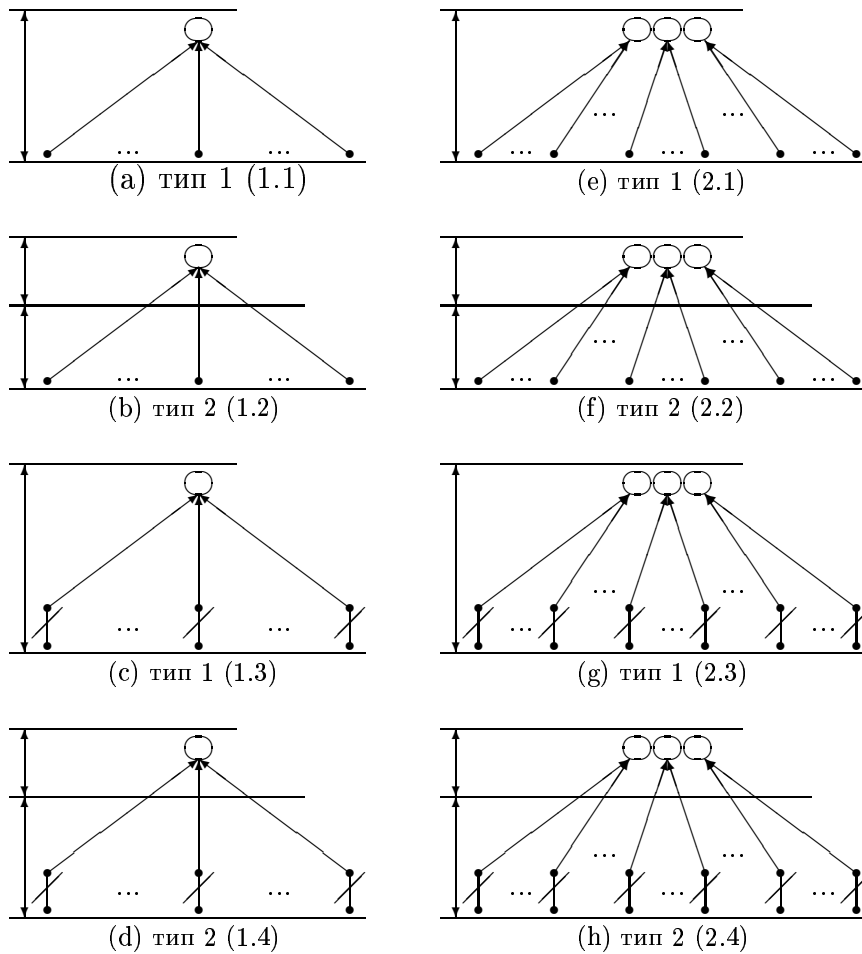


Рис. 20. Простейшая и вспомогательные задачи [1, 3, 48]

Представляется важным указать следующие свойства этой задачи:

(а) a_i ($\forall a_i \in \Upsilon a_o$) имеет вес $\lambda^-(a_i)$;

(б) a_i ($\forall a_i \in \Upsilon a_o$) имеет только одного сына с весом $\lambda^+(a_i)$, и значение соответствует весу хвоста;

(в) только конденсация (сжатие) следующих дуг является допустимым (a_o, a_i) ($i = \overline{1, m}$).

В результате, последовательность простых задач на основе задачи о рюкзаке может быть рассмотрена (Таблица 8): 1 (базовая задача о рюкзаке, Рис. 19i), 1.1 (аналог задачи о рюкзаке, Рис. 20a), 1.2 (Рис. 20b), 1.3 (Рис. 20c), 1.4 (Рис. 20d).

Аналогично, можно указать последовательность вспомогательных задач на основе задачи блочного рюкзака (Таблица 8): 2 (базовая задача блочного рюкзака, Рис. 19ii), 2.1 (аналог задачи блочного рюкзака, Рис. 20e), 2.2 (Рис. 20f), 2.3 (Рис. 20g), 2.4 (Рис. 20h).

Таблица 8. Задачи рюкзачного типа - иллюстрации

Задача	Иллюстрации
1. Базовая задача о рюкзаке (<i>задача 1</i>)	Рис. 19i
2. <i>Задача 1.1</i>	Рис. 20a
3. <i>Задача 1.2</i>	Рис. 20b
4. <i>Задача 1.3</i>	Рис. 20c
5. <i>Задача 1.4</i>	Рис. 20d
6. Задача блочного рюкзака (<i>задача 2</i>)	Рис. 19ii
7. <i>Задача 2.1</i>	Рис. 20e
8. <i>Задача 2.2</i>	Рис. 20f
9. <i>Задача 2.3</i>	Рис. 20g
10. <i>Задача 2.4</i>	Рис. 20h

В данном случае, задача блочного рюкзака или задача 2 (Рис. 19ii) имеет вид:

$$\begin{aligned} \max W(\{x_{ij}\}) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} w(a_{ij})x_{ij} \\ \text{s.t. } \lambda(a_o) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} \lambda(a_{ij}) &\leq b, \quad \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad x_{ij} \in \{0, 1\}. \end{aligned}$$

В вспомогательных задачах используются следующее множество Булевых векторов:

$$X = \{\kappa = (x_{ij}^1; x_{ij}^2) | x_{ij}^1, x_{ij}^2 \in \{0, 1\}; j = \overline{1, q_i}; i = \overline{1, m}\}$$

Дополнительно, следующее ограничение должно быть учтено для всех вспомогательных задач:

$$\sum_{j=1}^{q_i} x_{ij}^1 = 1, \quad \forall i; \quad x_{ij}^2 \leq x_{ij}^1, \quad \forall i, j.$$

Также используется следующая модифицированная целевая функция:

$$W(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} (x_{ij}^1 w^-(a_{ij}) + x_{ij}^2 w(a_{ij})).$$

Теперь можно рассмотреть вспомогательную задачу, например задачу 2.4, которая соответствует типу 2 (Рис. 20h):

$$\lambda(a_o) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij}^2 \lambda^-(a_{ij}) \leq b^-, \quad \max_{i,j} ((1 - x_{ij}^2) \lambda^-(a_{ij}) + \lambda^+(a_{ij})) \leq b^+.$$

Для последовательности простых задач, можно использовать приближенные алгоритмы, которые основываются на ϵ -приближенном алгоритме ($\epsilon \in [0, 1]$) для задачи о рюкзаке. В указанных алгоритмах оценки числа вычислительных операций подобна оценке для задачи

о рюкзаке и равна $O(\frac{m^2}{\epsilon})$ [1, 3, 48]. Эти алгоритмы используют упорядочение элементов из множества Υa по невозрастанию $\lambda(a_i)$ или $(\lambda^-(a_i) + \lambda^+(a_i))$.

Подход к решению вспомогательных задач основан на подобном приближенном подходе к задаче блочного рюкзака с следующими оценками числа вычислительных операций и требуемым объемом оперативной памяти соответственно:

$$O(\frac{m}{\epsilon} \sum_{i=1}^m q_i), O(\frac{m^2}{\epsilon} \max_{1 \leq i \leq m} \{q_i\}).$$

К сожалению, алгоритм с аналогичной оценкой сложности для задачи 2.3 не был построен (Рис. 20g). Поэтому (ϵ, δ) -приближенный алгоритм с следующими оценками (число операций, требуемый объем памяти) был предложен [1, 3, 48]

$$O(\frac{m}{\epsilon \delta} \sum_{i=1}^m q_i), O(\frac{m^2}{\epsilon} \max_{1 \leq i \leq m} \{q_i\}),$$

где δ - относительная погрешность по ограничению.

В случае, когда G - k -уровневое дерево, алгоритм основан на каскадной схеме 'снизу-вверх' (Рис. 21) [1, 3, 48]:

Шаг 1. Задача 1.2.

$\cdot \cdot \cdot$
Шаг j ($j = 2, k - 2$). Задача 2.4.

$\cdot \cdot \cdot$
Шаг $(k - 1)$. Задача 2.3.

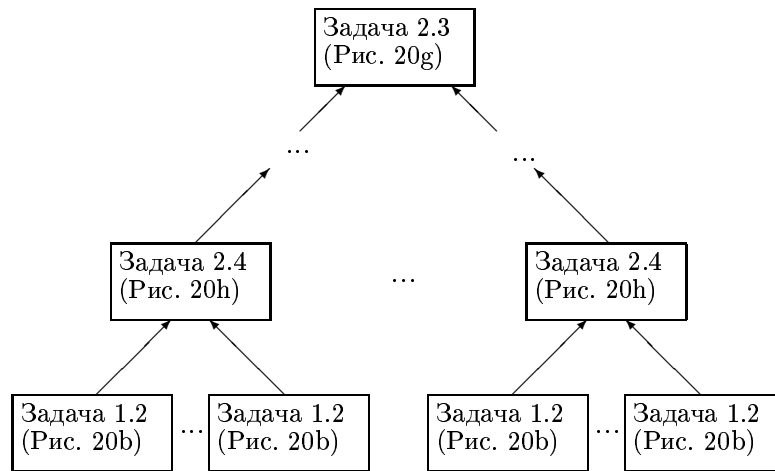


Рис 21. Схема 'снизу-вверх' для древовидного графа

Оценки сложности алгоритмов имеют вид (т.е., число операций, объем требуемой памяти):

$$O(\frac{n^2 \eta^5(a_o)}{\epsilon \delta^4}), O(\frac{m^2 \eta^4}{\epsilon \delta^4}),$$

где $m(a) = |\Upsilon(a)|$, $m = \max_{a \in A} m(a)$, $\eta(a) = |A_a \setminus \{a' \in A_a \mid \Upsilon a' = \emptyset\}|$.

В случае 3-уровневого дерева, оценки имеют вид: $O(\frac{n^2 \eta^4(a_o)}{\epsilon \delta^3})$.

В последние годы особую актуальность приобрела задача уменьшения сложности доступа в информационных структурах (например, в web-директориях) посредством использования ограниченного числа дополнительных связей ('горячих' связей) в структурах данных:

Найти дополнительную дугу(u) для исходного графа как короткий путь к данным с целью уменьшения среднего ожидаемого пути.

Обычно, данная задача рассматривается для деревьев. Пусть $T = (A, E)$ обозначает направленное дерево с максимальной степенью d , корнем $r_0 \in A$ (например, элементы A соответствуют Web сайтам, элементы E соответствуют связям - hyperlinks). Вес узла равен частоте (вероятности) обращения (доступа, поиска) к нему. Для упрощения предполагается, что требуемая информация содержится в висячих вершинах (узлах). Длина поиска для узла $v \in A$ равна числу дуг в пути из корня r_0 в v .

Пусть $T_u = (A_u, E_u)$ будет поддерево T ($A_u \subseteq A, E_u \subseteq E$), корень расположен в узле $u \in A$ (здесь, u не является сыном r_0). Таким образом, дополнительная прямая связь (“hotlink”) имеет вид: (r_0, u) . При этом пути ко всем висячим узлам в T_u будут меньшей длины.

Рис. 22 и Рис. 23 иллюстрируют упрощенные версии задачи горячих связей. На Рис. 23 представлено использование внутренних узлов как дополнительных корней (r_1).

Базовая задача назначения горячих связей заключается в назначении k дополнительных связей (из корня) с целью минимизации общего числа шагов для посещения требуемых информационных узлов. С другой стороны, необходимо найти множество k узлов ($U = \{u\}$) в дереве T . В основном, данные задачи относятся к классу NP-трудных задач. Для таких задач предложены приближенные алгоритмы (включая FPTAS). Очевидно, для рассматриваемых задач можно использовать близкие задачи выбора и/или комбинаторного синтеза.

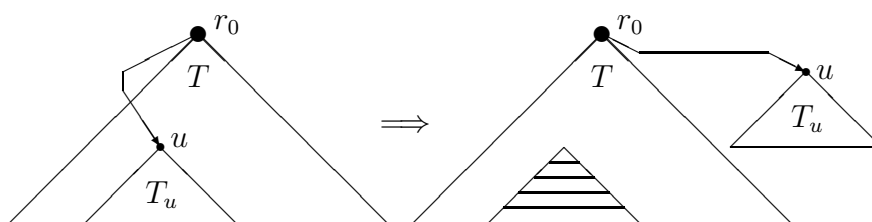


Рис. 22. Задача горячей связи (одна связь)

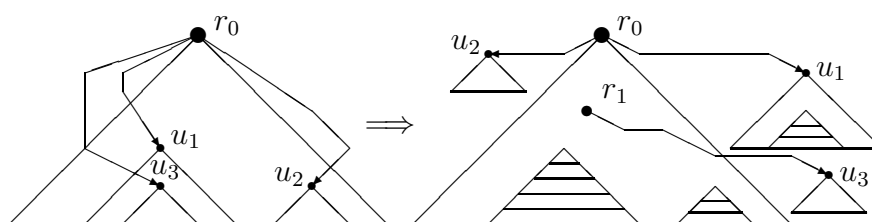


Рис. 23. Задача горячей связи (три связи, внутренний корень)

Задача трансформации дерева $T = (A, E)$ в дерево Штейнера $S = (A', E')$ рассматривается как добавление точек Штейнера в исходное дерево (или предварительно построенное покрывающее дерево) с учетом следующего: “стоимость” (требуемые ресурсы) для каждой точки Штейнера, “полезность” каждой точки Штейнера, общее ограничение по ресурсу (т.е., общая “стоимость” выбранных точек Штейнера) [28, 61]. Рассматривается простейший случай, когда точки Штейнера используются только для “треугольников”. Очевидно, что модели с векторными “стоимостью” и “полезностью” могут быть также рассмотрены. Предложенная схема решения имеет вид:

Стадия 1. Определение (экспертное оценивание, кластеризация) m регионов (кластеры, группы соседних узлов) в исходном дереве T для возможных дополнительных точек Штейнера.

Стадия 2. Генерация возможных точек Штейнера (кандидатов) и их параметров (т.е., стоимость добавления точек, “полезность”).

Стадия 3. Формулирование задачи блочного рюкзака для выбора наилучших дополнительных точек Штейнера с учетом ограничений по ресурсам:

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij} x_{ij} \quad s.t. \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} a_{ij} x_{ij} \leq b, \quad \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1, \quad x_{ij} \in \{0, 1\};$$

где i - индекс региона ($i = \overline{1, m}$), q_i - число версий для добавления точек Штейнера в регионе $i = \overline{1, m}$, j - индекс версии для добавления точек Штейнера в регионе ($j = \overline{1, q_i}$), x_{ij} - бинарная переменная, равная 1, если выбирается версия j в регионе i , b - общее ограничение по требуемым ресурсам (т.е., общая "стоимость").

Стадия 4. Решение задачи блочного рюкзака для получения результирующего дерева Штейнера S .

В работе численный пример иллюстрирует данную схему. Исходное дерево имеет вид (Рис. 24): $T = (A, E)$, $A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$. Определены четыре региона (Рис. 24): регион 1: $\{1, 2, 3, 4\}$; регион 2: $\{4, 6, 7\}$; регион 3: $\{4, 5, 6, 9, 11\}$; регион 4: $\{7, 8, 10\}$. Рассматриваются следующие точки Штейнера (Рис. 25): регион 1: s_{11}, s_{12} ; регион 2: s_{21} ; регион 3: s_{31}, s_{32} ; регион 4: s_{41} .

Задача в примере имеет вид:

$$\max \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij} x_{ij} \quad s.t. \quad \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{q_i} a_{ij} x_{ij} \leq b, \quad \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1, \quad x_{ij} \in \{0, 1\}.$$

Рис. 26 иллюстрирует решения.

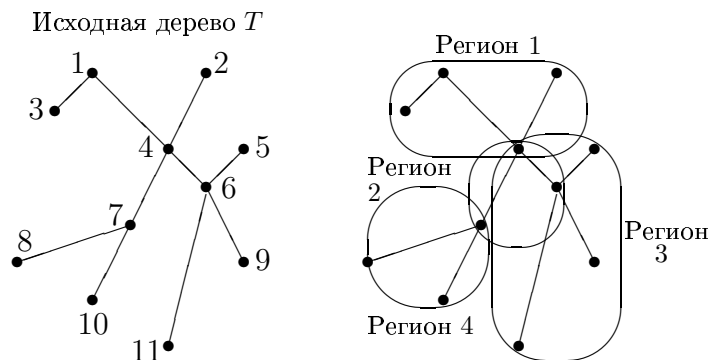


Рис. 24. Исходное дерево и регионы (кластеры)

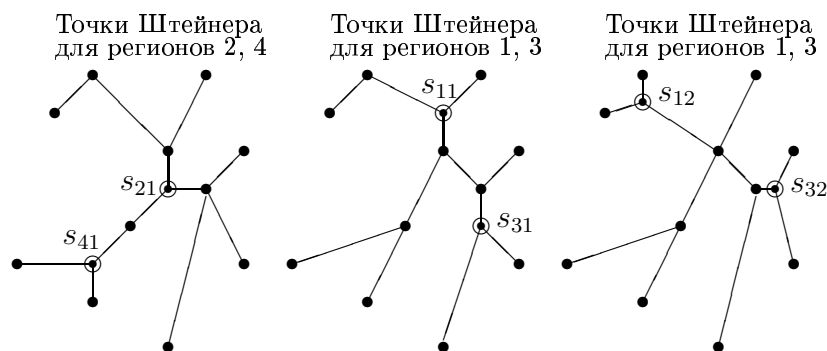


Рис. 25. Дополнительные точки Штейнера для регионов

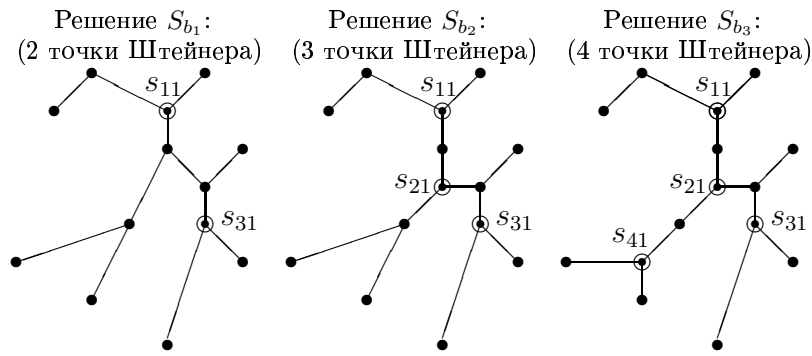


Рис. 26. Решения

На основе предложенного подхода могут быть исследованы более сложные задачи с учетом следующего: (i) несколько дополнительных точек Штейнера в одном регионе, (ii) совместимость дополнительных точек в соседних регионах.

В главе 7 рассматриваются схемы агрегации модульных решений в виде структур (Рис. 27) [55]:

Найти агрегированное составное (модульное) решение S^{agg} на основе множества исходных составных (модульных) решений $\{S_1, \dots, S_\tau, \dots, S_m\}$, т.е.,
 $\{S_1, \dots, S_\tau, \dots, S_m\} \implies S^{agg}$.

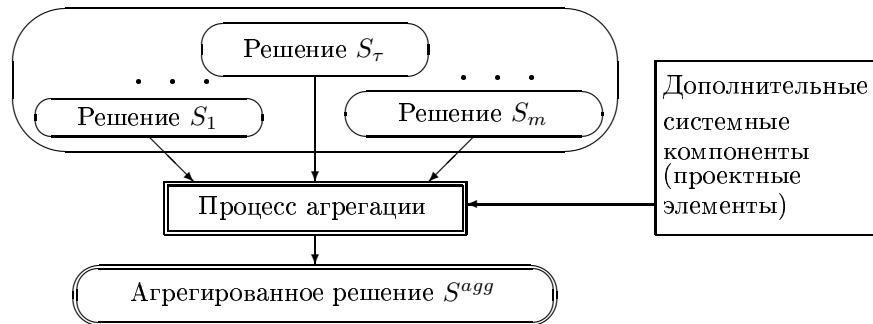


Рис. 27. Общая схема процесса агрегации

В Таблице 9 представлены основные задачи агрегации по типам исходных структур и результирующим структурам.

Таблица 9. Базовые задачи агрегации

Исходные структуры	Целевая структура
1. Множества	Подмножество, надмножество
2. Цепочки/последовательности	Общая подпоследовательность, общая надпоследовательность, медиана, консенсус
3. Ранжировки	(i) Медиана/консенсус (ii) Размытое ранжирование
4. Деревья	(i) Консенсус (agreement) как дерево (ii) Консенсус как лес (iii) Наддерево
5. Графы	Общий подграф, общий надграф

В работе рассмотрены четыре стратегии решения: (1) стратегия расширения: построение “системного ядра” на основе множества исходных решений и его расширение за счет добавления неких дополнительных элементов; (2) сжимающая стратегия: построение надструктуры для множества исходных решений и удаление из нее некоторых элементов; (3) комбинированная стратегия (расширение, удаление, операции замены элементов); (4) стратегия проектирования: построение расширенной “области” проектных элементов и проектирование нового решения. Указанные четыре стратегии основываются на комбинаторных моделях (многокритериальное ранжирование/выбор, рюкзак, блочный рюкзак, морфологический синтез). Функция близости/метрики для решений имеет вид: $\rho(S_{i_1}, S_{i_2})$, $i_1, i_2 \in \{1, 2, \dots, n\}$. Кроме того, используются следующие вспомогательные задачи:

Задача 1. Найти максимальную подструктуру: $\tilde{S} = \arg \max_{\{S'\}} (|S'|)$, $\forall S' \in \bigcap_{i=1}^n S_i$.

Задача 2. Найти минимальную надструктуру: $\bar{S} = \arg \min_{\{S''\}} (|S''|)$, $\forall S'' \in \bigcup_{i=1}^n S_i$.

Медианы для исходных множеств S определяются так:

(а) “обобщенная медиана” (“generalized median”) M^g определится так:

$$M^g = \arg \min_{M \in D} \left(\sum_{i=1}^n \rho(M, D_i) \right),$$

где D ($D \supseteq S$) является множеством структур специального вида (поиск такой медианы обычно представляет собой NP-трудную задачу);

(б) упрощенный случай медианы (некая аппроксимация) в виде “медианы множества” (“set median”) M^s над множествами S :

$$M^s = \arg \min_{M \in S} \left(\sum_{i=1}^n \rho(M, S_i) \right).$$

Здесь ищется один представитель из множества $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\}$. вычисление близости $\rho(M, S_i)$ представляет собой часто также NP-трудную задачу.

Следующие задачи имеют вид (задача 3, задача 4, задача 5):

Задача 3. Найти “медиану множеств” M^s .

Задача 4. Найти (“обобщенную медиану”) M^g .

Задача 5. Найти расширенную структуру в виде медианы (консенсуса) посредством добавления (или коррекции/редактирования) к базовой структуре в виде медианы/консенсуса некоторых элементов с учетом ресурсных ограничений.

Указанные задачи рассматриваются для следующих типов структур: (i) множества, (ii) *множество морфологий*, (iii) деревья, (iv) деревья с *множеством морфологий*. В случае, когда рассматривается векторная близость/метрика $\rho(S_{i_1}, S_{i_2})$, осуществляется поиск Парето-эффективных решений в задаче 3, задаче 4, задаче 5.

Используемые схемы агрегации основаны на построении “системного ядра” K : (i) построение подструктуры для исходных решений, (ii) построение медианной структуры (consensus или agreement) для исходных решений, (iii) построение расширенной подструктуры или расширенной медианной структуры, (iv) двух-стадийная схема: (а) задание множества базовых системных частей (как подмножество всех частей/компонентов системы), (б) выбор наилучшего системного элемента для каждой заданной базовой системной части.

Для приведенных выше задач агрегации описаны схемы решения и численные примеры. Особое внимание уделено мерам близости для рассматриваемых структур (включая новый тип векторной близости для ранжировок) и задачам построения медиан.

Рассмотрен специальный комплексный иллюстративный пример агрегации четырех ноутбук (Рис. 28; морфологическая структура: древовидная модель, альтернативы для висячих вершин).

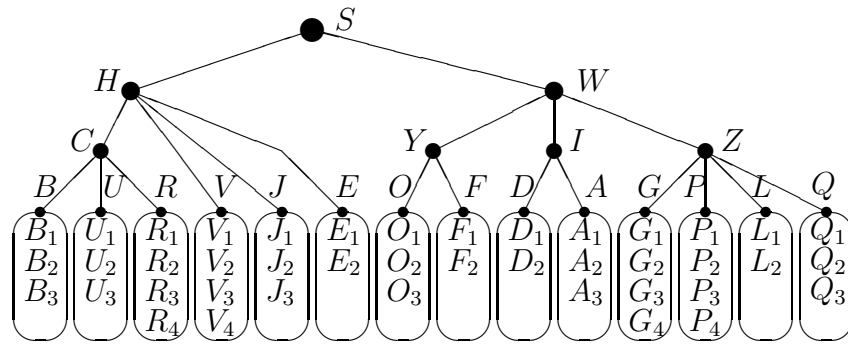


Рис. 28. Упрощенная структура ноутбука

В главе 8 представлены схемы многостадийного проектирования (построения траектории системы) [2, 65]. Таблица 10 содержит краткое описание рассматриваемых схем и задач.

Таблица 10. Основные типы задач построения траекторий систем

Тип сети верхнего уровня	Тип схемы/задачи проектирования	Прикладной пример
1.Цепочка	(1.1) Последовательная траектория(и) (1.2) Последовательно-параллельная траектория(и)	1.Последовательные и последовательно-параллельные стратегии ранжирования [1, 50, 60] 2.Последовательные стратегии для Web-систем (провайдер) [54] 3.Проектирование start-up бригады (работа)
2.Древовидная структура	(2.1) Древовидная траектория (2.2) Расширение сети верхнего уровня точками 'анализа', проектирование древовидных траекторий	Планирование лечения (работа)
3.Ациклический граф	(3.1) Построение маршрута (цепочка, дерево, последовательно-параллельный граф, построение соответствующей траектории(ий)) (3.2) Построение покрывающего дерева; решение задачи 2.2	Пример (работа)
4.Ориентированный граф	(4.1) Построение маршрута (цепочка, дерево, последовательно-параллельный граф); design of corresponding system траектории(ий) (4.2) Построение покрывающего дерева; решение задачи 2.2 (4.3) Построение более простой (по структуре) покрывающей сети; решение задач 4.1 или 4.2	Упрощенная иллюстрация (работа)

В работе предложена двух-уровневая комбинаторная схема для многостадийного проектирования (т.е., построения траектории системы) (Рис. 29) [1, 2, 65]:

Фаза 0. Генерация общей структуры проектной задачи:

- 0.1. генерация временных/логических точек,
- 0.2. генерация сети верхнего уровня над логическими точками (цепочка, дерево, оргграф),
- 0.3. формулирование подпроблем комбинаторного синтеза для каждой логической точки: морфологическая модель системы, проектные альтернативы (DAs), критерии для оценки DAs, оценки DAs и их совместимости).

Фаза 1. Иерархическое проектирование проектных решений для каждой логической точки (получение Парето-эффективных решений).

Фаза 2. Проектирование траектории системы как комбинации решений в логических точках.



Рис. 29. Иллюстрация проектирования траектории

Результирующая системная траектория может иметь вид: (а) цепочка решений (последовательная или последовательно-параллельная траектория), (б) дерево решений, (в) орграф решений.

В качестве иллюстративного примера для построения цепочки решений рассмотрена структура для start-up группы:

0. Древоподобная структура $S = L \star R \star E \star M$:

1. Лидер проекта L : нет L_0 , частичное участие (неполный рабочий день), консультирование L_1 , полной участие (полный рабочий день) L_2 .

2. Исследователь R : нет R_0 , частичное участие (неполный рабочий день), консультирование R_1 , полной участие (полный рабочий день) R_2 , два исследователя $R_3 = R_1 \& R_2$.

3. Инженер E : нет E_0 , частичное участие (неполный рабочий день), консультирование E_1 , полной участие (полный рабочий день) E_2 , два инженера $E_3 = E_1 \& E_2$.

4. Менеджер M : нет M_0 , частичное участие (неполный рабочий день), консультирование M_1 , полной участие (полный рабочий день) M_2 .

Эта структура исследуется для четырех последовательных временных точек:

Стадия 0 ($t = \tau_0$) (Рис. 30, приоритеты DAs показаны в круглых скобках; Таблица 11): генерация базовой идеи для нового продукта/системы, подготовка проекта предложения.

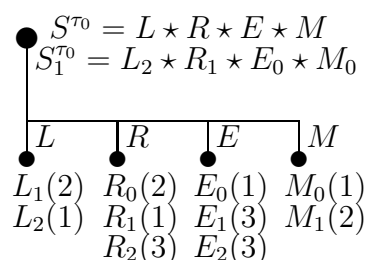


Рис. 30. Структура группы (τ_0)

Таблица 11. Совместимость (τ_0)

	R_0	R_1	R_2	E_0	E_1	E_2	M_0	M_1
L_1	1	2	1	3	3	2	3	2
L_2	1	3	2	3	3	2	3	2
R_0				3	3	2	3	1
R_1				3	3	1	3	3
R_2				3	3	1	3	2
E_0							3	3
E_1							3	3
E_2							3	2

Стадия 1 ($t = \tau_1$): проектирование прототипа предлагаемого продукта/системы, подготовка исследовательских материалов в виде научных статей, презентаций на конференциях, подготовка патента, поиск инвесторов.

Стадия 2 ($t = \tau_2$): проектирование предварительной версии продукта/системы, анализ рынка (маркетинг), подготовка бизнес-плана, поиск инвесторов.

Стадия 3 ($t = \tau_3$): проектирование версии системы для реального приложения(ий), поиск реальных прикладных областей применения, маркетинг.

Результирующее составное Парето-эффективное решение для τ_0 имеет вид (ИММП):
 $S_1^{\tau_0} = L_2 \star R_1 \star E_0 \star M_0$, $N(S_1^{\tau_0}) = (3; 4, 0, 0)$.

Для стадий 1, 2 и 3 рассматриваются аналогичные структуры и таблицы оценок совместимости и проводится построение решений (ИММП). Рис. 30 иллюстрирует финальную траекторию группы (построена на основе ИММП с учетом совместимости решения для стадий).

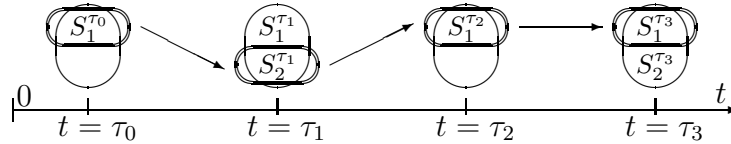


Рис. 30. Траектория группы

Для построения древовидной траектории рассматривается расширение задачи комбинаторного планирования лечения астмы [2, 18]. Рис. 31 иллюстрирует дерево плана решений, включая логические точки $\{\mu_i\}$ (Таблица 12) и точки анализа/решения $\{a_j\}$ (Таблица 13). Для каждой точки μ_i рассматривается вариант исходных данных (структура и др.) и решается задача комбинаторного синтеза. Результирующее дерево решений представлено на Рис. 32.

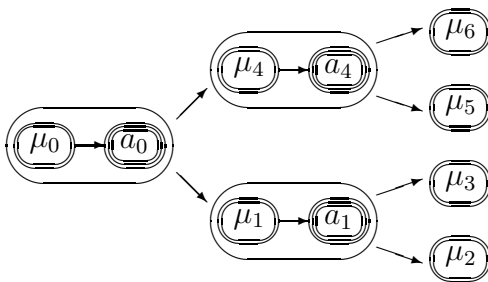


Рис. 31. Дерево плана лечения

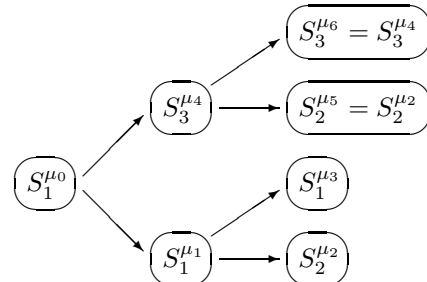


Рис. 32. Древовидная траектория

Таблица 12. Логические точки

Логическая точка	Описание
μ_0	Базовое (полное) лечение
μ_1	Лечение средой (Рис. 8.17)
μ_2	Дополнительное лечение отдыхом (Рис. 8.18)
μ_3	Дополнительная физиотерапия
μ_4	Дополнительная физиотерапия и лечение лекарствами
μ_5	Дополнительное лечение средой
μ_6	Дополнительная физиотерапия и лечение лекарствами

Таблица 13. Точки 'анализ/решение'

Точка 'анализ/решение'	Описание
a_0	(i) хороший результат, переход к μ_1 (ii) результат недостаточен, переход к μ_4
a_1	(i) хороший результат, переход к μ_2 (ii) результат недостаточен, переход к μ_3
a_4	(i) хороший результат, переход к μ_5 (ii) результат недостаточен, переход к μ_6

Кроме того, на базе приведенного медицинского примера построена упрощенная траектория на базе орграфа (Рис. 33, Рис. 34).

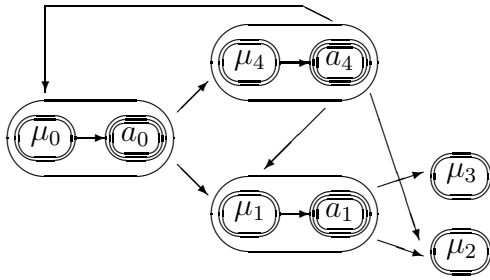


Рис. 33. Пример общего орграфа

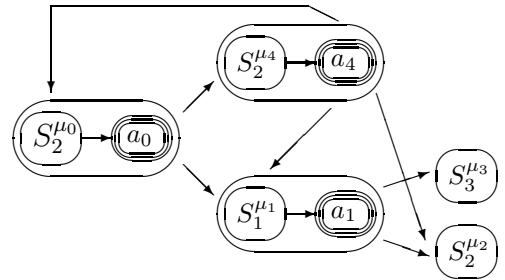


Рис. 34. Решение в виде орграфа

В главе 9 представлена схема комбинаторного моделирования и прогнозирования (Рис. 35) [2, 14, 55]:

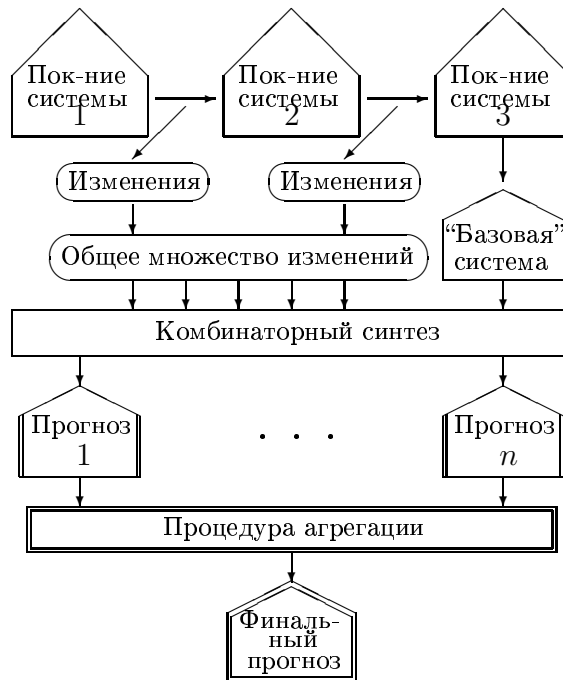


Рис. 35. Общая схема эволюции

Стадия 1. Генерация общей иерархической структуры для исследуемой системы (включая базовое множество альтернатив для компонентов системы - всяких вершин модели).

Стадия 2. Построение иерархической структуры для каждого поколения системы.

Стадия 3. Выделение системных изменений между соседними поколениями системы.

Стадия 4. Интеграция изменений системы для построения общего множества возможных изменений системы (включая использование экспертных процедур для добавления изменений системы).

Стадия 5. Анализ множества изменений системы: многокритериальное оценивание, бинарные отношения над множеством (предшествование, дополнительность, совместимость).

Стадия 6. Комбинаторный синтез прогнозного варианта системы как выбор наиболее перспективных изменений системы с учетом следующего: (i) общее ресурсное ограничение(я), (ii) “полезность” для каждого изменение системы и соответствующая получаемая общая “полезность”, (iii) совместимость между выбранными изменениями системы (в случае использования ИММП).

Стадия 7. Анализ полученного прогнозы(зов) и агрегация (в случае получения нескольких прогнозных вариантов) для формирования окончательного агрегированного решения.

В Таблице 14 указаны примеры применения схем комбинаторного моделирования эволюции.

Таблица 14. Моделирование эволюции систем

Прикладная система	Исследуемая задача			Источник
	Эволюция	Прогнозирование	Агрегация	
1. Модульный курс	Да	Да	Да	[14]
2. СППР КОМБИ	Да	Нет	Нет	[1, 2, 50, 60]
3. Электронное устройство	Да	Да	Нет	[2]
4. MPEG-подобный стандарт для передачи мультимедийных данных	Да	Да	Нет	[22]
5. Протокол связи ZigBee	Да	Да	Да	[43]

Существенная часть работы (главы 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) посвящена приложениям.

В главе 10 представлено описание применения комбинаторных схем для компьютерных систем [1, 2, 9, 30]: (а) модульный программный комплекс, (б) человеко-машинный интерфейс, (в) комбинаторная эволюция СППР КОМБИ, (г) последовательно-параллельные стратегии для многокритериального ранжирования. Здесь следует представить данные о развитии системы СППР КОМБИ (Таблица 15).

Таблица 15. Поколения СППР КОМБИ

Поколение	Тип ЭВМ	Тип интерфейса	Область приложений	Обучение	Год	Ссылка	Презентация на конференции	Применение в образовании
1. КОМБИ (язык Pascal)	Мини-ЭВМ	На основе языка	Различные	Нет	1987	[50, 51]	Нет	Нет
2. СОМБИ РС (язык Pascal)	РС	Граф-меню	Различные	Да	1988	[50]	SPUDM-89	Нет
3. СОМБИ РС (язык C)	РС	Граф-меню	Различные	Да	1989	[29, 50] [1, 30]	МСДМ-90, ЕВНСИ-93	[4, 33]
4. СОМБИ РС (язык C)	РС	Граф-меню	Инвестиции	Да	1991	[29]	Нет	Нет

На Рис. 36 приведена структура интерфейса СППР КОМБИ, который обеспечивает модульное проектирование последовательно-параллельных стратегий многокритериального ранжирования и решение задач в интерактивном режиме (поколения СППР КОМБИ 2 и 3):

$$R_0 \Rightarrow R_1 \Rightarrow R_2 \Rightarrow \{R_3\} \Rightarrow R_4.$$

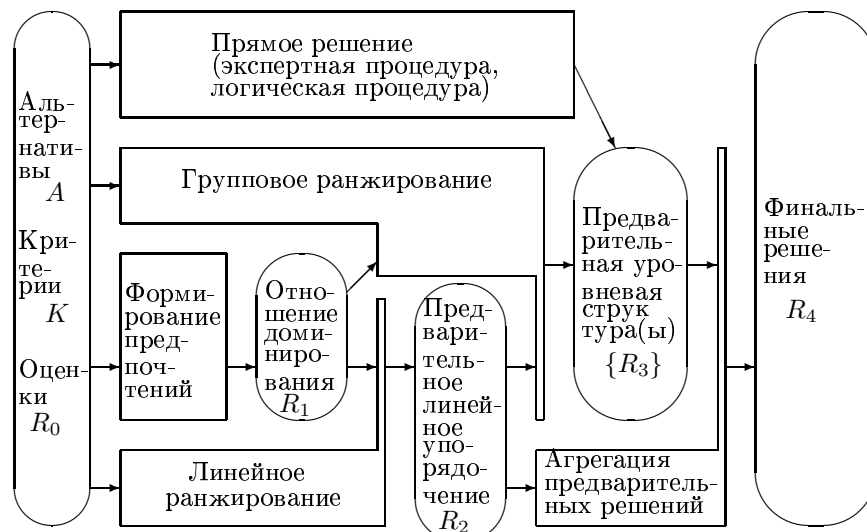


Рис. 36. Структура функционального графа-меню [1, 50]

В главе 11 описано перспективное приложение: применение метода ИММП для размещения специалистов по комнатам (такой подход существенно обобщает известные постановки задач размещения) [1, 10].

В главе 12 представлены примеры схем иерархического моделирования и проектирования систем управления умными домами [6].

Глава 13 содержит примеры приложения комбинаторных схем в коммуникационных системах [12, 26, 38, 45, 55]: (1) задача “последняя миля”, (2) GSM сеть связи, (3) подключение конечных пользователей к точкам доступа сети связи, (4) стандарты передачи мультимедийной информации типа MPEG, (5) коммуникационный протокол для сенсорных сетей, (6) примеры улучшения и расширения сетей связи.

В главе 14 приведены приложения в строительной области: моделирование и планирование технологии бетона (включая производство и перевозку) и моделирование и улучшение здания с точки зрения сейсмостойкости [1, 17, 20].

В главе 15 приведены примеры комбинаторного моделирования и планирования при лечении и астмы у детей и для проведения иммунологического анализа [2, 18, 19]. Заметим, в главе 8 представлена новая расширенная версия задачи планирования лечения.

Глава 16 содержит описание задач комбинаторного проектирования радио сенсора и телеметрической системы [24, 44, 59].

Глава 17 содержит описание приложений в менеджменте [1, 5, 57]: планирование исследований в геологии, разработка стратегий маркетинга, проектирование бригады исполнителей, композиция модульного продукта при электронной торговле, формирование портфеля инвестиций.

В главе 18 приведены приложения комбинаторных схем в системах образования [1, 14]: проектирование учебного курса, агрегация учебных курсов, формирование плана студента.

3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты диссертационной работы включают следующее:

1. В рамках усовершенствования методов анализа, моделирования и оптимизации сложных системных решений выделен класс модульных решений на основе использования специальной морфологической модели (с иерархической структурой, альтернативными вариантами частей/компонентов, а также их оценок и оценок их взаимосвязей). Разработан специальный уровень поддержки решений для этапов жизненного цикла модульных систем, состоящий из типовых комбинаторных схем (frameworks) или “системных задач” (композиции известных постановок из области принятия решений, например, многокритериальное ранжирование и выделение Парето-эффективных решений, а также известных и новых задач комбинаторной оптимизации, таких как задача морфологической клики, задача блочного рюкзака):

- (i) построение иерархической модели модульных системных решений,
- (ii) комбинаторный (структурный) синтез (“снизу-вверх”) модульных решений,
- (iii) оценивание модульных решений (как интеграция оценок компонентов решения и оценок совместимости компонентов),
- (iv) выявление узких мест в модульных системных решениях (в качестве системных узких мест исследуются компоненты и их взаимосвязи, группы связанных компонентов),
- (v) улучшение/расширение модульных системных решений (в том числе по компонентам и/или их совместимости, по структуре решения),
- (vi) многостадийное проектирование модульных решений (построение траекторий решений),
- (vii) комбинаторное моделирование эволюции модульных системных решений и построение прогнозов.

Рассматриваемые системные решения ориентированы на следующие приложения: физические многокомпонентные системы (включая системы управления), системы поддержки принятия решений, стратегии решения типовых задач принятия решений (многокритериальное ранжирование), аппаратура, планы, стандарты и протоколы.

2. Предложены подходы к анализу (оцениванию) составных модульных системных решений (составных альтернатив): (а) оценивание системных компонентов с использованием многокритериальных оценок, порядковых оценок или нового типа интервальных оценок в виде мультимножеств, (б) интегрирование оценок (порядковых, интервальных в виде мультимножеств) для системных компонентов и их совместимости, на основе использования “решеток” обобщенного качества/эффективности системных решений и выделения Парето-эффективных решений.

3. Предложен новый подход к структурному синтезу составных решений (модульных систем, альтернатив) на основе расширенного варианта морфологического анализа с учетом порядковых связей между выбираемыми вариантами для компонентов (иерархическое морфологическое многокритериальное проектирование ИММП), при этом используются новые задачи комбинаторной оптимизации: (а) морфологическая клика, (б) морфологическая клика с интервальными оценками в виде мультимножеств и (в) блочный рюкзак с интервальными оценками в виде мультимножеств. Такой подход позволяет учитывать системные связи (совместимость) между частями/компонентами системных решений на основе порядковых шкал (в некоторых приложениях используются предварительные векторные оценки совместимости). В случае использования интервальных оценок в виде мультимножеств соответствующий вариант ИММП основан на оптимизационных моделях в виде поиска решений типа медиан.

4. Осуществлена постановка и формализация задачи агрегирования структурных объектов (модульных решений) и предложены методы (стратегии/схемы) их решения. Данный подход позволяет проводить исследование и интеграцию имеющихся системных модульных решений как улучшение некоторого множества существующих (или полученных на предыдущих шагах) решений.

5. Предложен новый расширенный вариант задачи иерархического блочного рюкзака со специальными логическими ограничениями и новый приближенный полиномиальный алгоритм ее решения (с относительной погрешностью по целевой функции и относительной погрешностью по ограничению). Такая задача, в частности, позволяет моделировать процесс формирования оверлейной структуры сложных модульных программных комплексов.

6. Предложена новая морфологическая схема решения расширенной задачи размещения на основе ИММП, позволяющая учитывать дополнительные логические правила.

7. Разработан новый подход к интеграции (fusion) информации над потоками графов на основе клики, что позволяет выявление составных системных узких мест в динамическом режиме.

8. Предложены новые векторные близости для структурных объектов (модульных решений) (например, ранжировок, морфологических моделей), позволяющие более удобно формулировать и анализировать сходство и различия исследуемых модульных объектов.

9. Предложен новый подход, постановка и формализация реструктуризации задач комбинаторной оптимизации (на примере ряда задач: задача о рюкзаке, задача блочного рюкзака, задача покрывающего дерева, задача дерева Штейнера), что позволяет учитывать стоимость процесса изменения исходного решения и близости получаемого решения к оптимальному решению на следующем временном интервале.

10. Предложен новый подход к комбинаторному моделированию эволюции модульных иерархических систем (на основе анализа изменений компонентов и структуры системы) и синтезу прогнозных вариантов таких систем на основе многокритериальных оптимизационных моделей (задача о рюкзаке, задача блочного рюкзака и др.).

11. На основе предложенной новой векторной близости для ранжировок (исходного набора альтернатив) разработана модель рюкзачного типа для поиска медианы для множества исходных ранжировок в виде набора интервалов для каждой альтернативы.

12. Предложенная морфологическая структура для модульных системных решений является удобной базой для получения, анализа и обработки экспертной информации (прикладные примеры: план лечения, система управления умным домом, человеко-машинный интерфейс, здание, процедура иммунологического анализа, план геологических исследований, радио сенсор, телеметрическая система, стратегия решения задач принятия решений (ранжирование), система поддержки принятия решений, протокол связи, модульный учебный курс и др.).

13. В работе представлены примеры предложенных новых подходов (около 30) в различных областях (компьютерные системы, системы связи, стандарты и протоколы передачи информации, система управления умным домом, здание, СППР и др.). Эти примеры представляют собой “библиотеку” базовых аналогов (задач-прототипов), позволяющие формулировать и решать задачи в различных областях (включая использование в учебных курсах).

14. Предложенный подход к комбинаторному синтезу модульных систем применен к построению последовательно-параллельных стратегий решения задач принятия решений (многокритериальное ранжирование на примере СППР КОМБИ), что позволяет организовывать процесс подготовки и принятия решений как интерактивную процедуру с синтезом составных стратегий решения задач.

15. Предложенный метод ИММП применен к построению человеко-машинного интерфейса (на примере СППР КОМБИ), что позволяет осуществлять синтез вариантов человеко-машинного интерфейса для конкретных пользователей.

16. Предложенный подход к комбинаторному моделированию эволюции модульных систем и построению их прогнозных вариантов позволяет осуществлять анализ развития и совершенствования существующих системных решений (т.е., анализ поколений систем) и их прогнозирование на основе моделей комбинаторной оптимизации.

17. Предложенный подход к комбинаторному синтезу модульных системных решений применен к построению модульных учебных курсов и данный подход является основой для построения новых модульных учебных курсов, а также для формирования индивидуальных учебных курсов.

18. Автором разработан и реализован факультетский курс “Проектирование систем” на ФРТК в МФТИ (2004-2008 гг.). Данный курс основывался на методах системного анализа, задачах принятия решений и моделях комбинаторной оптимизации, в том числе на разработанных автором типовых комбинаторных схемах (“системных задачах”) поддержки жизненного цикла модульных систем (моделирование, оценивание, синтез, улучшение и др.), и использовании указанных схем применительно к различным прикладным системам в рамках исследовательских работ студентов.

Таким образом, предложенные типовые комбинаторные схемы поддержки решений на этапах жизненного цикла модульных систем представляются полезным инструментарием при анализе, моделировании и оптимизации модульных системных решений.

Список публикаций

Монографии

1. Levin M.Sh. Combinatorial Engineering of Decomposable Systems. Springer, 1998. - 372 pp.
2. Levin M.Sh. Composite Systems Decisions. Springer, London, 2006. - 254 pp.

Личные публикации в журналах по списку ВАК (включая WoS)

3. Левин М.Ш. Одна экстремальная задача организации данных // Изв. АН СССР, сер. Техн. кибернетика. 1981. N. 5. С. 103-112.
4. Левин М.Ш. О преподавании проектирования систем. Информационные технологии и вычислительные системы // Вып. 2, 2007, С. 89-94.
5. Левин М.Ш., Комбинированная схема формирования стратегии маркетинга // Бизнес информатика, Вып. 2, 2009, С. 42-51.
6. Levin M.Sh. Hierarchical morphological multicriteria design of decomposable systems. Concurrent Engineering: Res. and Appl. 1996. Vol. 4, No. 2, pp. 111-117.
7. Levin M.Sh. System synthesis with morphological clique problem: fusion of subsystem evaluation decisions. Inform. Fusion. 2001. Vol. 2, No. 3, pp. 225-237.
8. Levin M.Sh. Towards combinatorial analysis, adaptation, and planning of human-computer systems. Applied Intelligence. 2002. Vol. 16, No. 3, pp. 235-247.
9. Levin M.Sh. Modular system synthesis: Example for composite packaged software. IEEE Trans. on SMC, Part C. 2005. Vol. 35, No. 4, pp. 544-553.
10. Levin M.Sh. Combinatorial optimization in system configuration design. Autom. and Remote Control. 2009. Vol. 70, No. 3, pp. 519-561.
11. Levin M.Sh. Four-layer framework for combinatorial optimization problems domain. Advances in Engineering Software. 2011. Vol. 42, No. 12, pp. 1089-1098.
12. Levin M.Sh. Selection of user's connection in last mile problem. IEEE Trans. SMC - Part A. 2011. Vol. 41, No. 2, pp. 370-374.
13. Levin M.Sh. Towards clique-based fusion of graph streams in multi-function system testing. Informatica. 2012. Vol. 23, No. 3, pp. 391-404.
14. Levin M.Sh. Towards combinatorial evolution of composite systems. Expert Systems with Applications. 2013. Vol. 40, No. 4, pp. 1342-1351.
15. Levin M.Sh. Modular design and improvement of the management system in the smart home with the use of interval multiset estimates. J. of Communications Technology and Electronics. 2013. Vol. 58, No. 6, pp. 584-593.
16. Levin M.Sh. A modular approach to the communication protocol and standard for multimedia information: A review. J. of Communications Technology and Electronics. 2013. Vol. 58, No. 6, pp. 594-601.

Публикации с коллегами в журналах по списку ВАК (включая WoS)

17. Levin M.Sh., Nisnevich M.L. Combinatorial scheme for management of life cycle: Example for concrete macrotechnology. J. of Intell. Manuf. 2001. Vol. 12, No. 4, pp. 393-401.
18. Levin M.Sh., Sokolova L.V. Hierarchical combinatorial planning of medical treatment. Comp. Meth. and Progr. in Biomedicine. 2004. Vol. 73, No. 1, pp. 3-11.
19. Levin M.Sh., Firer M. Hierarchical morphological design of immunoassay technology. Computers in Biology and Medicine. 2005. Vol. 35, No. 3, pp. 229-245.
20. Levin M.Sh., Danieli M.A. Hierarchical decision making framework for evaluation and improvement of composite systems (example for building). Informatica. 2005. Vol. 16, No. 2, pp. 213-240.
21. Levin M.Sh., Last M. Design of test inputs and their sequences in multi-function system testing. Applied Intelligence. 2006. Vol. 25, No. 1, pp. 105-124.
22. Levin M.Sh., Kruchkov O., Hadar O., Kaminsky E. Combinatorial systems evolution: Example of standard for multimedia information. Informatica. 2009. Vol. 20, No. 4, pp. 519-538.

Публикации с студентами в журналах по списку ВАК (включая WoS, Springer, Scopus)

23. Левин М.Ш., Сафонов А.В. Проектирование и перепроектирование конфигурации оборудования коммуникационной системы // Информационные технологии и вычислительные

системы. 2006, N. 4, С. 63-73.

24. Levin M.Sh., Khodakovskii I.A., Structural composition of the telemetry system. Automation and Remote Control. 2007. Vol. 68, No. 9, pp. 1654-1661.

25. Levin M.Sh., Sharov S.Yu. Hierarchical morphological design of Web-hosting system. Int. J. of Integrated Design and Process Science. 2009. Vol. 13, No. 1, pp. 1-14.

26. Levin M.Sh., Petukhov M.V. Connection of users with a telecommunications network: multicriteria assignment problem. J. of Communications Technology and Electronics. 2010. Vol. 55, No. 12, pp. 1532-1542.

27. Levin M.Sh., Safonov A.V. Improvement of regional telecommunications networks. J. of Communications Technology and Electronics. 2011. Vol. 56, No. 6, pp. 770-778.

28. Levin M.Sh., Zamkovoy A.A. Multicriteria Steiner tree with the cost of Steiner vertices. J. of Communications Technology and Electronics. 2011. Vol. 56, No. 12, pp. 1527-1542.

Публикации в трудах международных конференций (Springer, Scopus)

29. Levin M.Sh. Hierarchical components of human-computer systems. Human Computer Interaction. LNCS, Vol. 753, Berlin: Springer, 1993. pp. 37-52.

30. Levin M.Sh. Hierarchical design of user interfaces. In: Human Computer Interaction. LNCS, Vol.876, Springer, Berlin, 1994. pp. 140-151.

31. Levin M.Sh. Towards comparison of decomposable systems. In: Data Science, Classification, and Related Methods, Tokyo, Springer, 1998. pp. 154-161.

32. Levin M.Sh. Hierarchical approach for engineering skills acquisition. In: Engineering of Intelligent Systems, LNCS 2070, Berlin: Springer, 2001. pp. 92-100.

33. Levin M.Sh. Course 'Design of systems: structural approach', DETC2006-99547. In: ASME Int. Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2006), vol. 4a: 18th Int. Conf. on Design Theory and Methodology DTM, Pennsylvania, USA, Sept. 2006. pp. 475-484.

34. Levin M.Sh. Combinatorial technological systems problems (examples for communication system). In: Proc. of Int. Conf. on Systems Engineering and Modeling ICSEM-2007, Israel, 2007. pp. 24-32.

35. Levin M.Sh. Towards hierarchical clustering. In: V. Diekert, M. Volkov, A. Voronkov (Eds.), CSR-2007, LNCS 4649, Springer, 2007. pp. 205-215.

36. Levin M.Sh. Morphological approach to electronic shopping. In: IEEE Int. Conf. Sibircon 2008, Novosibirsk, 2008. pp. 280-285.

37. Levin M.Sh. Student research projects in system design. In: Int. Conf. on Computer Supported Education CSEDU-2009, Lisbon, Portugal, 2009. Vol. 2, pp. 67-72.

38. Levin M.Sh. Towards communication network development (structural systems issues, combinatorial problems). In: IEEE Region 8 Int. Conf. Sibircon 2010, 2010. Vol. 1, pp. 204-208.

39. Levin M.Sh. Combinatorial synthesis of communication protocol ZigBee with interval multiset estimates. In: 4nd Int. Congress on Ultra Modern Telecomm. & Control Systems ICUMT-2012, St. Petersburg, Russia, 2012. pp. 29-34.

40. Levin M.Sh. Synthesis of MPEG-like standard with interval multiset estimates. In: The Eight Int. Conf. on Digital Telecommunications ICDT 2013, Italy, 2013. pp. 14-19.

41. Levin M.Sh., Merzlyakov A.O. Composite combinatorial scheme of test planning (example for microprocessor systems). In: IEEE Region 8 Int. Conf. "Sibircon-2008", Novosibirsk, 2008, pp. 291-295.

42. Levin M.Sh., Leus A.V. Configuration of integrated security system. In: 7th IEEE Int. Conf. INDIN 2009, Cardiff, UK, 2009. pp. 101-105.

43. Levin M.Sh., Andrushevich A., Kistler R., Klapproth A. Combinatorial evolution of ZigBee protocol. In: IEEE Region 8 Int. Conf. Sibircon 2010, 2010. Vol. 1, pp. 314-319.

44. Levin M.Sh., Fimin A.V. Configuration of alarm wireless sensor element. 2nd Int. Congress ICUMT-2010, Moscow, 2010. pp. 924-928.
45. Levin M.Sh., Petukhov M.V. Multicriteria assignment problem (selection of access points). In: Proc. of 23rd Int. Conf. IEA/AIE 2010, "Trends in Applied Intelligent Systems", LNCS 6097, part II, Springer, Cordoba, 2010. pp. 277-287.
46. Levin M.Sh., Safonov A.V. Towards modular redesign of networked system. 2nd Int. Congress ICUMT-2010, Moscow, 2010. pp. 109-114.
47. Levin M.Sh., Andrushevich A., Klapproth A. Improvement of building automation system. In: LNCS 6704, Part II, Springer, 2011. pp. 459-468.

Прочие публикации

48. Левин М.Ш. Некоторые дискретные оптимизационные задачи распределения ресурсов в вычислительных системах // Дисс. ... канд. техн. наук по спец.: 05.13.02/ - М., МГУ-ВНИИСИ, 1981. - 123 с.
49. Левин М.Ш. Типовой подход к анализу качества в машиностроении // - М.: ВНИИКИ, 1988. - Вып. 4, 64 с.
50. Левин М.Ш., Михайлов А.А. Фрагменты технологии стратификации множества объектов: Препринт. - М.: ВНИИСИ. 1988. - 60 с.
51. Левин М.Ш., Михайлов А.А. Диалоговая система сравнительной оценки многокритериальных объектов/ 89.01.0045; 50890000275; 89.03. Описание применения - 77с., Спецификация - 3с.// Информационный бюллетень Алгоритмы и программы, 1990. - N. 1.
52. Левин М.Ш., Пороскун В.И. Комбинаторное планирование разведки нефти и газа. В сб.: Геологическое изучение и использование недр, Вып. 4, Москва, Министерство природных ресурсов Российской Федерации, ЗАО "Геоинформмарк", 1997. С. 58-63.
53. Levin M.Sh. Restructuring in combinatorial optimization. Electronic preprint. 11 pp., Febr. 8, 2011. <http://arxiv.org/abs/1102.1745> [cs.DS]
54. Levin M.Sh. Towards configuration of applied Web-based information system. Electronic preprint, 13 pp., Aug. 31, 2011. <http://arxiv.org/abs/1108.3865> [cs.SE]
55. Levin M.Sh. Aggregation of composite solutions: strategies, models, examples. Electronic preprint. 72 pp., Nov. 29, 2011. <http://arxiv.org/abs/1111.6983> [cs.SE]
56. Levin M.Sh. Morphological methods for design of modular systems (a survey). Electronic preprint. 20 pp., Jan. 9, 2012. <http://arxiv.org/abs/1201.1712> [cs.SE]
57. Levin M.Sh. Towards electronic shopping of composite product. Electronic Preprint. 10 pp., March 3, 2012. <http://arxiv.org/abs/1203.0648> [cs.SE]
58. Levin M.Sh. Multiset estimates and combinatorial synthesis. Electronic preprint. 30 pp., May 9, 2012. <http://arxiv.org/abs/1205.2046> [cs.SY]
59. Levin M.Sh. Composition of modular telemetry system with interval multiset estimates. Electronic preprint. 9 pp., July 25, 2012. <http://arxiv.org/abs/1207.6651> [cs.SY]
60. Levin M.Sh. Composite strategy for multicriteria ranking/sorting (methodological issues, examples) Electronic preprint. 24 pp., Nov. 9, 2012. <http://arxiv.org/abs/1211.2245> [math.OC]
61. Levin M.Sh. Towards design of system hierarchy (research survey). Electronic preprint. 36 pp., Dec. 7, 2012. <http://arxiv.org/abs/1212.1735> [math.OC]
62. Levin M.Sh. Note on combinatorial engineering frameworks for hierarchical modular systems. Electronic preprint. 11 pp., Mar. 29, 2013. <http://arxiv.org/abs/1304.0030> [math.OC]
63. Levin M.Sh. Note on evaluation of hierarchical modular systems. Electronic preprint, 15 pp., May 21, 2013. <http://arxiv.org/abs/1305.4917> [cs.AI].
64. Levin M.Sh. Towards detection of bottlenecks in modular systems. Electronic preprint, 12 pp., June 1, 2013. <http://arxiv.org/abs/1306.0128> [cs.AI].
65. Levin M.Sh. Towards multistage design of modular systems. Electronic preprint, 13 pp., June 19, 2013. <http://arxiv.org/abs/1306.4635> [cs.AI].