

КОМБИНАТОРНЫЙ МЕТОД "ИЕРАРХИЧЕСКОЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ" И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

ЛЕВИН Марк Шмуилович
АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
05.13.01

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1 А к т у а л ь н о с т ь

Задачи комбинаторного синтеза сложных систем из их частей (подсистем, компонентов и т.п.) являются важным практическим направлением во многих приложениях (техника, экономика, управление и др.). Часто такой подход называют модульным проектированием (например: разработка программного обеспечения, проектирование электронных систем, строительство, машиностроение и др.) или планированием (например, модульное планирование в производственных системах).

В последние годы значимость модульного подхода резко возрастает, поскольку во многих областях созданы и создаются библиотеки и каталоги компонентов (локальных решений) или такие локальные решения можно получить за счет информационного анализа имеющихся баз данных и заказать. Иными словами, проектирование сложных решений во многих приложениях теперь основывается на подборе вариантов локальных компонентов и композиции их в результирующую систему. Кроме того, актуальными становятся задачи перепроектирования существующих сложных систем.

1.2 Ц е л и р а б о т ы

Целью работы является исследование применения композиционного подхода к проектированию сложных декомпозируемых систем, включая этапы:

- (а) описание систем,
- (б) моделирование комбинаторного синтеза,
- (в) разработка алгоритмов и схем решения возникающих задач,
- (г) накопление примеров применения комбинаторного синтеза для решения практических задач,
- (д) обучение специалистов основам комбинаторного синтеза.

1.3 М е т о д ы и с с л е д о в а н и я

Теория сложных систем, теория многоуровневых иерархических систем, теория принятия решений, теория графов, модели комбинаторной оптимизации, теория алгоритмов, теория вычислительной сложности, теория информационных систем, методы искусственного интеллекта.

1.4 Н а у ч н а я н о в и з н а и ц е н н о с т ь

В диссертационной работе сформировано новое научно-техническое направление "Комбинаторный синтез декомпозируемых систем", имеющее широкое приложение (проектирование, планирование) при построении и трансформации (ре-инжиниринг) сложных модульных систем в различных отраслях народного хозяйства. При этом рассмотрены все стадии процесса подготовки и принятия решений, включая моделирование на основе известных и новых комбинаторных моделей, построение алгоритмов и схем решения, практические примеры и их анализ. Проведен анализ подходов к сравнению сложных систем.

Кроме того, предложенный подход применен к построению модульных стратегий решения, т.е., к синтезу адаптивных алгоритмических систем (выбор и комбинирование локальных алгоритмических модулей и/или человеко-машинных процедур для построения последовательно-параллельных стратегий).

Уделено внимание вопросам преподавания на основе базовых моделей комбинаторного синтеза модульных систем.

1.5 П р а к т и ч е с к о е и с п о л ь з о в а н и е р е з у л ь т а т о в р а б о т ы

Перечень практического использования включает следующее: (1) оптимизация оверлейной структуры программного комплекса "ИПС Геология Центральный геофизический трест Министерства геологии РФ (1979); (2) многокритериальный анализ площадок для жилой застройки в Москве - НИИгенплана Москвы (1985); (3) проектирование региональных информационно-вычислительных сетей - ИНФОРМПРИБОР (1988); (4) программный комплекс "Система поддержки принятия решений СОМВИ" сдан в фонд алгоритмов и программ РАН (ВЦ РАН) (1989); (5) методология применения гипертекстовых информационных систем как средств поддержки процесса проектирования - ВИНТИ (1990); (6) разделы курса "Принятие решений", Академия народного хозяйства при правительстве России (1995-1996); (7) планирование процессов лечения на примере астмы, Российский Институт педиатрии (2004); (8) разделы курса "Проектирование систем: структурный подход", факультет радиотехники и кибернетики, Московский физико-технический институт (2004-2006).

1.6 А п п р о б а ц и я р а б о т ы

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", Звенигород, 1988 г.; (3) Международная конференция "Многокритериальные задачи математического программирования", Ялта, 1988; (4) 2-й, 4-й и 5-й Всесоюзный и Межгосударственные семинары по дискретной математике, Москва, 1989, 1993, 1995; (5) Международные конференции "Многокритериальное принятие решений", Фейрфакс, США (1990)) и Анкара, Турция (2000); (6) 3-я и 4-я Международные конференции "Восток-Запад" по человеко- компьютерному взаимодействию, Москва-1993, Санкт-Петербург -1994; (7) Международный семинар по автоматизации проектирования, Москва, 1994; (8) 2-я Межд. конф. по параллельному инжинирингу, МакЛеан, 1995; (9) 14 Межд. конференция по прикладной информатике, Иннсбрук, 1996; (10) Межд. конференция по классификации, Кобе, 1996; (11) 13я 15я Межд. конференции по кибернетике и системным исследованиям, Вена, 1996/2000; (12) Межд. конференция по прикладному искусственному интеллекту, Будапешт, Венгрия, 2001; (13) 2-й Московская конференция "методы декомпозиции в математическом моделировании", 2004; (14)) Европейская конференция по комбинаторной оптимизации, Минск, 2005. Кроме того были сделаны доклады в ИСА РАН, ЦЭМИ РАН, МГУ, ВИНТИ РАН, ВЦ РАН, ИПУ РАН в 1979-2004 гг..

1.7 Структура и объем

Диссертация состоит из 19 глав, заключения и списка литературы. Она содержит ... страниц основного печатного текста, ... иллюстраций, ... таблиц. Список литературы включает 224 наименований.

1.8 Публикации

По теме исследования опубликованы 38 работ, включая 3 монографии (две на английском) [10, 28, 35]. Общий объем - более 40 печатных листов.

Разработанный автором электронный курс "Проектирование систем: структурный подход"[18] включает материалы по тематике диссертации. Курс представлен в Интернете (на русском и английском языках).

2 СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 рассмотрены ИММП, модульные (составные, декомпозируемые) системы, базовые комбинаторные задачи синтеза. В нашем исследовании под декомпозируемой системой мы понимаем следующее: (1) система состоит из частей (компонентов); (2) для каждой части имеется или может быть сформировано некоторое множество альтернативных проектных вариантов (DAs). Часто реальные системы требуют подобного многоуровневого описания или такое описание целесообразно использовать (например, для уменьшения исходной размерности). Приведем перечень основных функциональных операций, требуемых при проектировании, анализе и преобразовании декомпозируемых систем: (a) *описание и/или представление* (разработка древовидной модели системы; требований и/или характеристик системы и ее частей и их взаимосвязей-совместимости Ins); (b) *оценивание системы и ее частей* (получение оценок DAs и Ins, формирование интегральных оценок системы в целом); (c) *выявление узких мест* (выявление элементов системы в виде частей-компонентов и/или их совместимостей, улучшение которых приводит к улучшению качества системы в целом); (d) *сравнение* (сравнение вариантов системы или ее частей); (e) *отбор* (выбор лучших вариантов системы или ее частей, например: DAs); (f) *синтез (композиция)* (композиция системы из DAs с учетом качества DAs и Ins с учетом интегрального качества получаемых составных решений);

(g) *модификация (преобразование, улучшение, адаптация)*, т.е. изменение (в частности, элементов и их взаимосвязей, состава).

Пример декомпозируемой системы представлен на Рис. 1. При этом рассматривается следующая ситуация: (а) исходная система S включает три компонента A, B, C с соответствующими проектными альтернативами DAs: $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2$. Дополнительно мы предполагаем некоторые изменения системы: (1) добавить DAs A_3, B_4, C_3 ; (2) исключить DAs (B_2, C_1); (3) добавить компонент D с DAs (D_1, D_2, D_3, D_4).

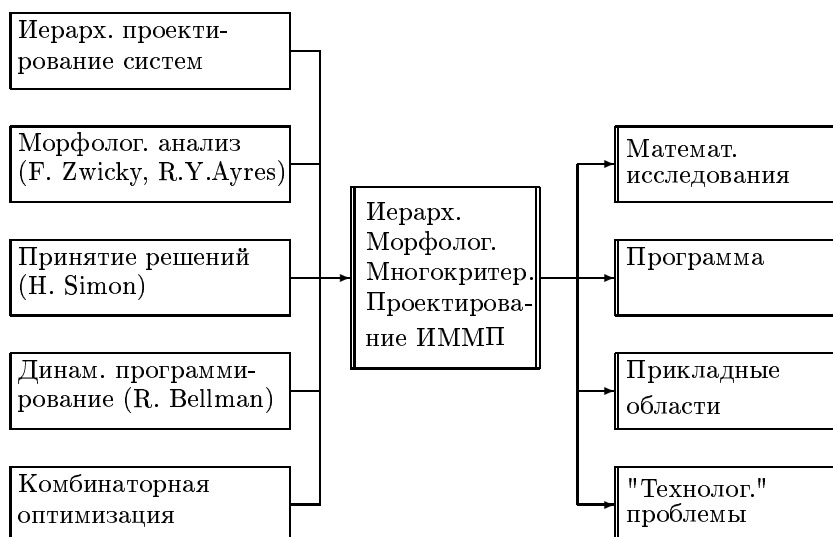


Рис. 0. Основы ИММП и направления исследования

Наше Иерархическое Морфологическое Многокритериальное Проектирование ИММП включает следующие стадии: (1) задание требований к проектируемой системе и ее компонентам (цели или критерии, ограничения); (2) проектирование структуры проектируемой системы; (3) генерация проектных альтернатив DAs; (4) оценивание DAs и совместимостей между ними Ins; (5) отбор DAs; (6) композиция составных DAs; (7) анализ составных DAs и их улучшение.

Укажем базовые предположения, используемые в ИММП: (1) проектируемая система имеет иерархическую древовидную структуру; (2) качество (эффективность, совершенство и т.п.) системы представляет собой агрегацию качества составных частей и качества совместимости этих частей; (3) критерии качества являются монотонными; (4) качество совместимости частей системы (или подсистемы) равно агрегации парных совместимостей частей; (5) многокритериальные характеристики качества частей или совместимостей могут быть отображены на некие порядковую шкалы, и эти шкалы могут быть согласованы.

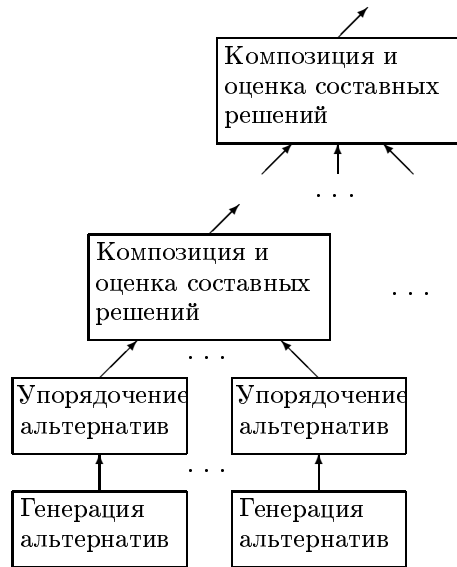


Рис. 2. Схема "СНИЗУ-ВВЕРХ"

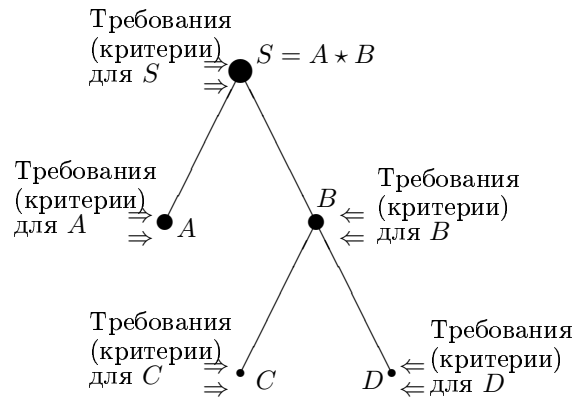


Рис. 3. Иерархия требований

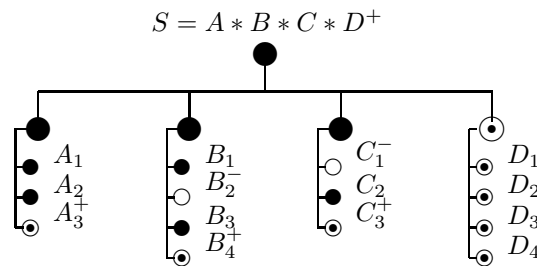


Рис. 1. Декомпозируемая система

Обычно для перечисленных задач применяются следующие три подхода: (а) оптимизационные модели; (б) системы на основе баз знаний; (с) гибридные методы. Дополнительно в главе 1 указаны подходы к структурному моделированию систем и многокритериальному ранжированию.

Глава 2 посвящена рассмотрению моделей целочисленного программирования, ориентированных на комбинаторный синтез. Исследуются следующие модели: (1) задача о рюкзаке; (2) блочный рюкзак (multiple-choice problem); (3) рюкзак со специальным логическим ограничением, предложенный автором (применительно к проектированию оверлейной структуры программ); (4) одна задача о рюкзаке с квадратичным критерием; (5) одна модель целочисленного нелинейного программирования (INLP), применяемая для проектирования надежных программ; (6) модель смешанного целочисленного программирования, часто используемая при проектировании химических технологий.

Мы рассматриваем вопросы сложности указанных моделей и подходы к решению. При этом предложены следующие новые модели и алгоритмы: (а) несколько модификаций задачи о рюкзаке и блочного рюкзака с совместностью элементов; (б) новая рюкзачная модель со специальными логическими ограничениями и новый полиномиальный алгоритм для нее с ограниченными относительными погрешностями по целевой функции и невязки ограничения; (в) выделены случаи полиномиальной разрешимости с гарантированной относительной ошибкой целевой функции нескольких случаев блочного рюкзака с совместностью элементов, когда некая "обобщенная совместность" (структурный критерий сложности) является графом простого вида (например, цепочка, дерево).

Рис. 2 и 3 иллюстрируют задачу о рюкзаке со специальным логическим ограничением. Здесь имеется некий граф (дерево) G , вершины которого соответствуют программным модулям, дуги - отношению вызова одного модуля другим, и каждый модуль требует некоторый объем оперативной памяти (RAM). За счет объединения модулей можно снизить временные затраты на вызов модулей в оперативную память (целевая функция), но при этом требуется больший общий объем RAM ($b(G)$).

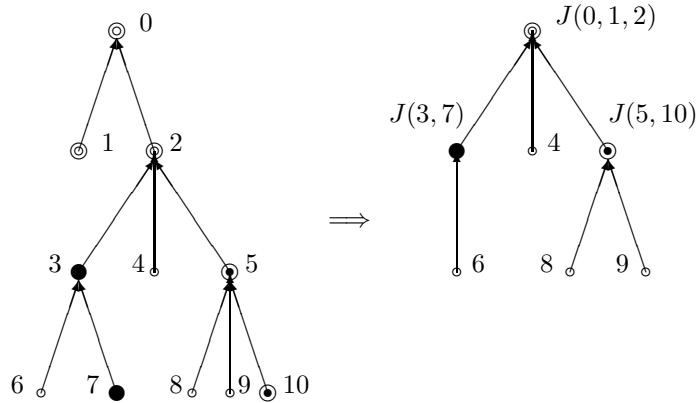


Рис. 2. Преобразование комплексной программы на основе интеграции модулей (проектирование оверлейной структуры)

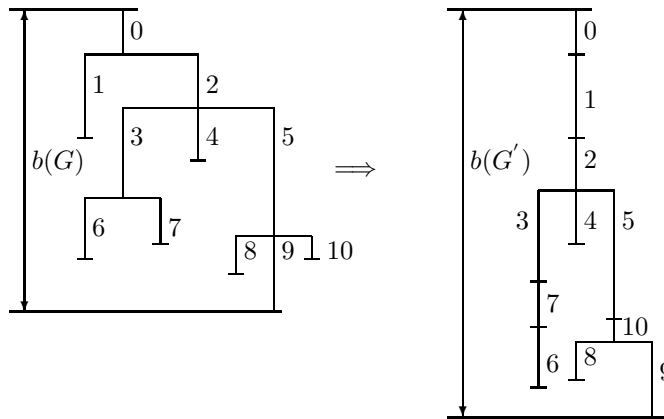


Рис. 3. Использование памяти (RAM)

Глава 3 содержит описание предложенного морфологического подхода на основе новой комбинаторной модели - задачи морфологической клики (далее просто *морфологической клики*). Опишем постановку этой задачи в виде следующих трех пунктов:

1. В качестве исходной информации мы используем следующую: множество морфоклассов; DAs для каждого морфокласса; бинарную совместимость между элементами для каждой пары элементов их разных морфоклассов (0 соответствует несовместимой паре элементов).

2. Требуется найти следующую композицию DAs (один представитель из каждого морфологического класса) с ненулевой совместимостью

$$S = \{S(1), \dots, S(i), \dots, S(m)\},$$

где $S(i)$ является компонентом i . Отметим, что такая задача была предложена Zwicky в рамках морфологического подхода. Наша модель является обобщением

морфологического подхода Zwicky и дополнительно использует порядковые оценки качества DAs и Ins и специальный векторный критерия для оценивания качества системы.

3. Используются следующее: (а) общая порядковая шкала для DAs (приоритет $r = 1, \dots, l$; 1 соответствует лучшему приоритету); (б) порядковая шкала для совместимости $0, \dots, u$ (u соответствует наилучшему уровню совместимости); (с) вектор совершенства решения S :

$$N(S) = (w(S); n(S)),$$

где $w(S)$ - минимум парной совместимости в S ,

$$n(S) = (n(1), \dots, n(r), \dots, n(l)),$$

где $n(r)$ - число компонентов r -го качества в S (некая гистограмма).

Таким образом мы ищем решение, недоминируемое по $N(S)$. Рис. 4 демонстрирует два эквивалентных представления на примере решеток на $N = (w; n(1), n(2), n(3))$ для следующих случаев: $w = const$, $m = 3$, $l = 3$. Полная решетка на N включает u взаимосвязанных решеток для $w = 1, \dots, u$. Дополнительно мы используем некие уровни системного совершенства, например: идеальное решение (состоящее из лучших DAs), Парето-эффективные по N DAs, и т.д. Некоторые варианты обобщения задачи морфологической клики (случай шкал оценки DAs в виде некоторых простых частичных порядков) и соответствующие обобщенные варианты дискретных пространств качества (решеток качества) для составных решения рассмотрены в [29].

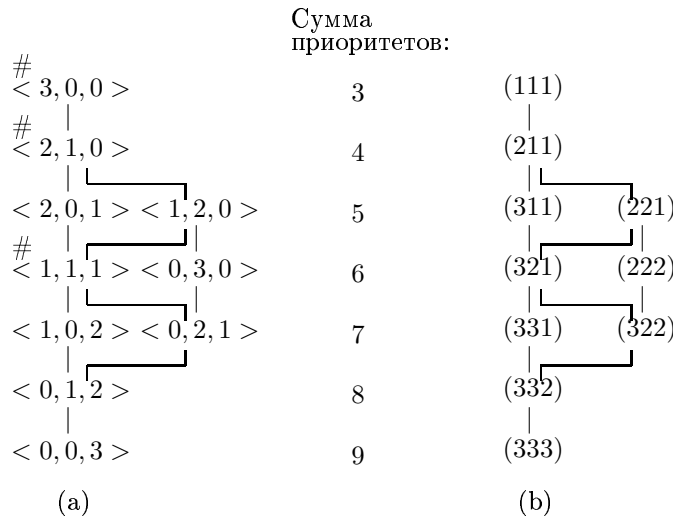


Рис. 4. Два эквивалентных представления примера решетки по $N = (w; n(1), n(2), n(3))$, $w = const$, $m = 3$, $l = 3$;
 (а) позиционное представление (гистограмма) с числом DAs ($n(S)$)
 (б) прямое представление с приоритетами DAs

Рис. 1 иллюстрирует задачу композиции морфологической клики:
 $N(S_1) = (2; 1, 1, 1)$, $N(S_2) = (1; 2, 1, 0)$.

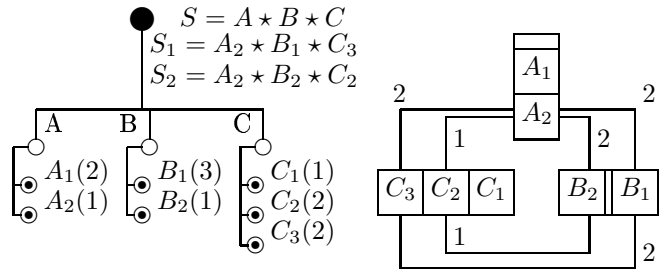


Рис. 1. Пример построения морфологической клики (приоритеты DAs указаны в скобках)

Базовая схема решения включает два этапа:
ШАГ 1. Построить допустимые композиции.
ШАГ 2. Отобрать Парето-эффективные составные DAs.

Рассматриваемая задача является NP-трудной. Обычно для конструирования допустимых композиций целесообразно использовать "backtracking" подход, и следующие две операции: (а) исключить недопустимые DAs; (b) выявить ситуации, когда составные композиции не существуют. Кроме того, автором был также реализован алгоритм на основе динамического программирования [29].

В нашем случае более сложная шкала для DAs, Ins и S позволяет использовать схему решения, направленную от точки $w = u$ и $r = l$. Кроме того, эксперт может участвовать на всех стадиях процесса решения. Рис. 5 представляет взаимосвязи между несколькими известными комбинаторными моделями и морфологической кликой.

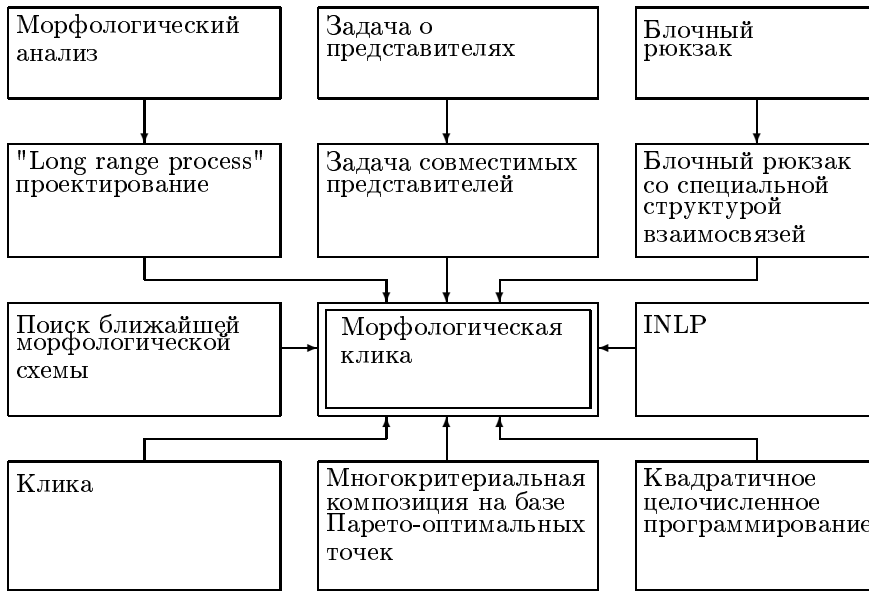


Рис. 5. Некоторые комбинаторные модели синтеза

Рассмотрим подробнее алгоритмы для морфологической клики. Пусть $G = (\{A(j), j = 1, \dots, m\}, \{\{E(j), j = 1, \dots, m\} \cup E_c\})$ будет морфологический граф, где $A(j)$ - множество вершин (проектных альтернатив DAs) в морфологическом классе j , $|A(i) \& A(j)| = 0$, $E(j)$ - множество дуг внутри морфологического

класса j (частичный порядок), E_c - множество дуг (совместимость, взаимосвязь Ins) между DAs различных морфологических классов (симметричное бинарное отношение). Мы будем использовать приоритеты вместо $E(j)$. Задача заключается в следующем: Найти морфологическую клику (морфологическую схему, составную композицию или DA - S) из лучших DAs (один представитель из каждого $A(j)$) с учетом допустимости.

Пример морфологической клики представлен на Рис. 6.

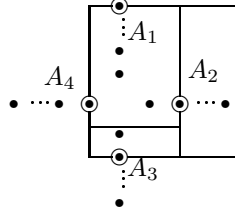


Рис. 6. Пример морфологической клики

Морфологическое пространство имеет следующий вид: $\Lambda_o = A(1) \star \dots \star A(j) \star \dots \star A(m)$. Пусть $S = \{S(1), \dots, S(j), \dots, S(m)\}$ будет допустимое решение, в котором компонент $S(j)$ является элементом из $A(j)$, $w(e_c(S(a), S(b)))$ - вес дуги для каждой пары компонентов $S(a), S(b) \in S$,

$$w(S) = \min\{w(e_c(S(a), S(b))) \mid \forall S(a), S(b) \in S\} > 0$$

соответствует допустимости по Ins. Через $Z = \{S\}$ мы обозначим множество допустимых решений. Мы будем использовать параметрическое пространство $\Lambda(w_o)$, where $w > w_o$. Вектор качества для S по компонентам имеет вид: $n(S) = (n(1), \dots, n(i), \dots, n(k))$, где $n(i)$ - число элементов с приоритетом $r = i$. $N(S) = (w(S); n(S))$ соответствует обобщенному качеству (совершенству). Дополнительно используются следующие обозначения:

I. Решения:

- (1) Y - множество составных Парето-оптимальных по N решений;
- (2) Id - множество идеальных составных решений (из лучших компонентов).

II. Параметры задачи:

- (1) $w_o = \max\{w\}, \dots, 1$ - ограничение для минимума $w(S)$;
- (2) $i = 1, \dots, k$ - ограничение для худшей альтернативы в S , мы рассматриваем $A(i, j) = \{a \in A(j) \mid r(a) < i + 1\}$ и

$$B_i = A(i_1) \star \dots \star A(i_j) \star \dots \star A(i_m);$$

- (3) $\Gamma = \{N''\}$ or $\{n'\}$ - множество опорных точек.

III. Базовые задачи:

- (1) Φ - конструирование Z ;
- (2) Ψ - поиск Y .

IV. Параметрические задачи и решения:

- (1) $\Phi_i(w_o, \Gamma) \Rightarrow Z_i(w_o, \Gamma)$;
- (2) $\Psi_i(w_o, \Gamma) \Rightarrow Y_i(w_o, \Gamma)$.

Очевидной является следующая лемма:

Лемма 1. Предположим $S \in Y(w_o = l)$ и $S' \in Y(w_o = l - 1)$; тогда $N(S') \succeq N(S)$.

Теперь рассмотрим следующую задачу:

$$Arg\{N(S_o) \mid N(S_o) \succeq \forall N(S) \in Z\}. \quad (1)$$

Базовая схема решения для (1) включает следующие этапы (алгоритм 1):

ШАГ 1 (Задача Φ). Построить $Z = Z(\Lambda)$.

ШАГ 2 (Задача Ψ). Отобрать Парето-эффективные решения $Y = Y(Z)$.

ШАГ 2 алгоритма 1 имеет сложность, полиномиальную от $|Z|$. Поскольку Φ является NP-полной задачей, целесообразно уменьшить ее размерность, например, за счет рассмотрения нескольких подзадач меньшей размерности. Теперь исследуем задачу $\Psi(\Gamma)$:

$$\text{Arg}\{N(S_o) \mid (N(S_o) \succeq N(S), S \in \Lambda_o) \&$$

$$((N(S_o), N(S)) \cup (N(S_o) \succ N' \in \Gamma))\}. \quad (2)$$

Далее мы исследуем множество $Y(N')$ и частичный порядок на векторах $\{N(S)\}$ и по включению для $Y(N(S))$. Очевидным является следующее:

Свойство 1. Если $N' \succeq N''$, тогда $Y(N'') \ni Y(N')$.

Давайте введем $A_{i,j} = \{a \in A_j \mid r(a) < r + 1\}$ и, соответственно, $\Lambda_i = A_{i,1} \star \dots \star A_{i,j} \star \dots \star A_{1,m}$, $\Lambda_i(N')$, Ψ_i for (1), and $\Psi_i(N')$, $Y_i(N')$ for (2). В результате имеем алгоритм 2:

ШАГ 0. Инициализация: $w' := \max(w)$; $w'' := 1$; $i' := 1$, $i'' := k$. Множество решений $Y = \emptyset$; $\Gamma = \{(0; 0, \dots, 0, m)\}$.

ШАГ 1. $w_o := w''$.

ШАГ 2. $i := i'$.

ШАГ 3. Решение задачи $\Phi_i(w_o, \Gamma)$, т.е. конструирование $Z_i(w_o, \Gamma)$.

ШАГ 4. Решение задачи $\Psi_i(w_o, \Gamma)$, т.е. отбор $Y_i(w_o, \Gamma)$.

ШАГ 5. If $|Y_i(w_o)| > 0$ then *begin* $Y := Y \cup Y_i(w_o)$; $\Gamma := \Gamma \cup Y_i(w_o)$; if $i = 1$ then *Stop*; $i'' := i - 1$; go to *Step 2*, *end*.

ШАГ 6. If $w_o = w''$ then go to *Stop* else $w_o := w_o - 1$ and go to *Step 2*.

ШАГ 7. If $i = i''$ then go to *Step 1* else $i := i + 1$ and go to *Step 3*.

Алгоритм 2 включает несколько подзадач и только подзадача $\Phi_i(w_o, \Gamma)$ является NP-полной. Другие части алгоритма 2 являются полиномиальными от параметров задач и $|Z_i(w_o, \Gamma)|$. Как правило, размерность задачи $\Phi_i(w_o, \Gamma)$ не высока (например, десятки) и возможно использование backtracking подходов. Дополнительно представляется целесообразным применять алгоритмические правила, например, следующие: (i) исключить доминируемые элементы или решения; (ii) выявить ситуации, когда допустимые решения не существуют.

Рис. 7 демонстрирует подграф, который не может быть включен в решение (*отрицательный пример*). Отметим, что автором был также реализован алгоритм на основе динамического программирования [29].

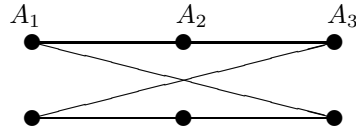


Рис. 7. *Отрицательный пример для морфологической клики*

Теперь рассмотрим анализ и улучшение составных решений для морфологической клики. Пусть $S(j)$ будет компонентом составного решения

$$S = S(1) \star \dots \star S(j) \star \dots \star S(m),$$

$$S' = S(1) \star \dots \star S(j-1) \star S(j+1) \star \dots \star S(m)$$

будет вспомогательным решением без элемента $S(j)$. Мы предполагаем, что n является нормированным вектором.

Определение 1. $S(j)$ называется:

- (a) *S-улучшающим* элемент, если $N(S) \succ N(S')$;
- (b) *S-нейтральный* элемент, если $N(S) = N(S')$;
- (c) *S-ухудшающий* элемент, если $N(S') \succ N(S)$.

Мы будем использовать также аналогичное определение по отношению w . Теперь рассмотрим близость для составных DAs. Пусть θ будет вариацией по w или n для S', S'' :

$$\theta_w(S', S'') = w(S') - w(S''), \theta_n(S', S'') = n(S') - n(S'').$$

Таким образом мы получаем целочисленную метрику θ_w и вектор близости θ_n .

Здесь мы используем целочисленную метрику одновременно по θ_w и θ_n как сумму вариационных единиц. Подобный подход может быть применен и для множества составных DAs. Теперь возможно введение определения соседства для составных решений:

Определение 2. Некоторое составное решение $\{S''\}$ называется θ_o -соседом для составного решения S' by w or n , если выполняются следующие условия:

$$\theta_w(S', S'') + \theta_n(S', S'') = \theta_o;$$

Определения соседства S' по w или n имеют следующий вид:

$$D_w(S', \theta_o) = \{S'' \mid (\theta_w(S', S'') = \theta_o) \& (\theta_n(S', S'') = 0)\},$$

$$D_n(S', \theta_o) = \{S'' \mid (\theta_w(S', S'') = 0) \& (\theta_n(S', S'') = \theta_o)\}.$$

Аналогично $D(S, \theta_o)$ будет называться θ_o -окрестностью S . Окрестности множества $\{S\}$ определяются так: $D_w(\{S\}, \theta_o)$, $D_n(\{S\}, \theta_o)$, $D(\{S\}, \theta_o)$. Окрестность Парето-эффективного слоя Y будет выглядеть следующим образом: $Y_w(\theta_o)$, $Y_n(\theta_o)$, $Y(\theta_o)$. Окончательно, через $Id(\theta_o)$ обозначим окрестность множества идеальных точек Id . Тогда мы получаем следующие уровни совершенства систем: Id ; $Id(1)$; Y ; $Y(1)$.

Два главных параметра могут рассматриваться для классификации составных DAs: (a) результат улучшения узкого места; (b) некоторый конструктивный тип узкого места. Мы исследуем следующие виды улучшающих акций: (1) генерация Id ; (2) улучшение Y ; (3) расширение Y , т.е. улучшение элементов из $Y(1)$; (4) ограничение Y посредством построения некоторой новой Парето-эффективной точки, которая доминирует по N некоторые элементы из Y .

В общем случае имеется две ситуации: (a) $|Y| \neq 0$; (b) $|Y| = 0$. В последнем случае мы рассматриваем только построение некоего допустимого составного решения как расширение Y . При этом необходимо производить поиск недопустимых взаимосвязей, улучшение которых позволит построить допустимое решение. Построение допустимых решений основывается на анализе всех недопустимых взаимосвязей. Теперь мы исследуем существование Y . Два конструктивных типа узких мест существуют:

1. *S-ухудшающие* элементы для точек из Y . Улучшение такого элемента позволяет улучшить некую точку из Y . В качестве результата мы получаем некоторое ограничение (сужение) Y , когда построенная новая точка доминирует по N некоторые точки из Y .

2. Соответствующие элементы из окрестности, т.е. $Y(1)$. Улучшение узких мест позволяет расширить Y .

Алгоритм для выделения узких мест имеет вид:

Алгоритм 3.

ШАГ 1. Найти все S -ухудшающие элементы (компоненты, взаимосвязи) для решений из Y .

ШАГ 2. Проанализировать каждый S -ухудшающий элемент.

Алгоритм 4.

ШАГ 1. Построить $Y(1)$.

ШАГ 2. Проанализировать каждый элемент из $Y(1)$.

Рис. 8 представляет решетку качества, Парето-эффективные точки (#), соседей, и два вида улучшающих акций.

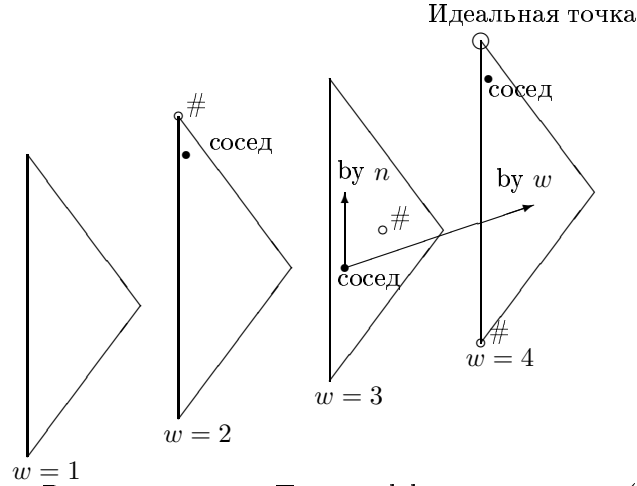


Рис. 8. Решетка качества, Парето-эффективные точки (#), соседи, и улучшения (→)

В главе 4 приведены подходы к классификации комбинаторных моделей синтеза и аппроксимации морфологической клики.

Пусть $B = (\{a(j), j = 1, \dots, m\}, V)$ будет конденсированный морфологический граф, описывающий обобщенную взаимосвязь элементов, как это было введено в разделе блочного рюкзака. Аналогично мы будем использовать граф $B^+ = (\{b_j\}, \{v^+\})$.

Классификационная формула для задачи композиции имеет следующий вид:

Задача: = Результат | Компоненты | Совместимость | Ограничение,

где *Результат*: = t, a ;

Компоненты: = num, a ;

Совместимость: = rel, a, tB^+ ;

Ограничение: = ine, str ;

где тип $t := S | F | S_r | M$; S соответствует наилучшему составному решению; F соответствует семейству наилучших решений; S_r соответствует наилучшему решению с избыточностью, т.е. с дублированием некоторых компонентов; M - морфологическое решение; оценка $a := amd | N | ad | nl | rel | vec | b | o | int$; adm соответствует допустимости; $N = (w(S); n(S))$; ad соответствует аддитивной функции; nl соответствует нелинейной функции; pr соответствует отношению предпочтения; vec соответствует векторному описанию; b соответствует бинарному описанию; o соответствует порядковому описанию; int соответствует функции с интервальным порядковым значением; num соответствует числу морфологических классов; rel соответствует бинарному отношению E_c , например, симметричному & рефлексивному ($sym \& ref$); $tB^+ := empty | chain | tree | G$ (общий случай графа) или C (полный граф); ine соответствует неравенствам; str - структурные ограничения.

Приведем примеры известных задач:

(а) базовая морфологическая клика: $S, N | m, o | sym \& ref, o, G |$,

(b) морфологический анализ: $S, adm | m, | sym \& ref, b, G |$,

(c) блочный рюкзак: $S, a | m, a | sym \& ref, b, empty | ine$.

Давайте рассмотрим некоторые специальные версии задачи композиции. Во-первых, следует отметить, что схема решения для задачи $F, N | m, o | sym, o, ge$ | базируется на алгоритме для базовой версии (морфологической клике). Во-вторых, мы можем предположить использование интервальных шкал (или размытых множеств) для оценивания DAs:

$S_o, N | m, int | sym, o, ge |$.

Здесь отношение предпочтения по $n(S)$ будет несколько сложнее. Такая версия является базовой для следующих:

$S_r, N | m, o | sym, o, ge |$ и $M, N | m, o | sym, o, ge |$.

При этом мы можем рассматривать агрегированные DAs, полученные из нескольких исходных. Взаимосвязь агрегированных DA будет равна пересечению исходных взаимосвязей для исходных DAs. И приоритеты агрегированных DA могут быть представлены как гистограммы из исходных приоритетов для исходных DAs. В-третьих, быстрые алгоритмы существуют для следующих задач:

$S_o, ad | m, ad | sym, b, co | ine$ (блочный рюкзак);

$S_o, ad | m, ad | sym, b, chain | ine$;

$S_o, ad | m, ad | sym, b, tree | ine$.

Отметим некоторые факторы, определяющие сложность: (a) тип оценивания DAs; (b) тип оценивания Ins; (c) интегральное оценивание составных регений S ; (d) структурный вид Ins ("обобщенная совместимость"); (e) подход к определению совместимости пар DAs; (f) зависимость совместимости пар DAs; (g) дополнительные ограничения и требования.

Приближенные подходы основываются на аппроксимации следующих компонентов задачи: (a) целевая функция; (b) ограничения. Подобные методы применяются для задачи о рюкзаке. В случае морфологической клики мы можем аппроксимировать следующие главные элементы составного решения S : (i) качество DAs; (ii) качество Ins.

Рассмотрим два пути аппроксимации 2го элемента: (1) аппроксимация исходной структуры требований, которая отображается в структуру совместимости; (2) ослабление требований к совместимости пар DAs из различных морфологических классов. Первый путь может обеспечить полиномиальную разрешимость, поскольку мы можем использовать простые аппроксимирующие структуры (например, *цепочка, дерево*). Во втором случае мы рассматриваем решение следующего типа (квази морфологическая клика):

$$S^a = S^a(1), \dots, S^a(i), \dots, S^a(m),$$

где $S^a(i)$ - множество элементов из морфологического класса i . Пусть $K(S^a) = (w(S^a); k(S^a))$ будет векторное совершенство системы для S^a , где $w(S^a)$ является минимумом совместимости между каждым элементов из $S^a(i)$ и каждым элементов из каждого другого морфологического класса, $k(S^a) = (k(1), \dots, k(r), \dots, k(l))$, где $k(r)$ - число компонентов r го качества в S^a (некая гистограмма). Мы можем исключить элемент j , если существует морфологический класс, который не содержит элемент, соединенный с j с весом совместимости больше или равным $w(S^a)$. Очевидно, что некоторые другие версии исключающих правил могут использоваться тоже. Пример квази клики ($m = 4$ и $w(S^a) = 2$) представлен на Рис. 9. Рассмотренный подход является основой для упрощенных алгоритмов, позволяющих достаточно эффективно строить аппроксимации морфологической клики.

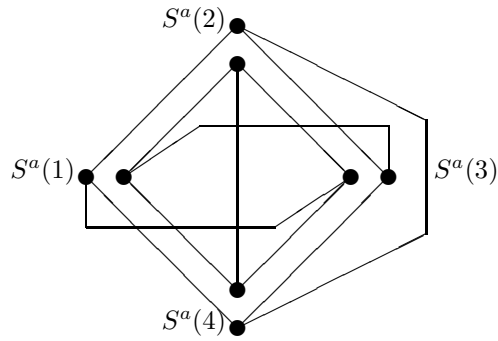


Рис. 9. Пример квази-морфологической клики

Глава 5 содержит описание применения морфологической клики к построению параллельно-последовательной стратегии решения (Рис. 10). Мы рассматриваем морфологию операций в системе многокритериального ранжирования СОМ-ВІ и строим стратегию решения (Рис. 11 и 12).



Рис. 10. Схема проектирования для стратегии решения

$$\begin{aligned} \text{Стратегия решения } S &= H * T * U \\ S_1 \& S_2 \& S_3 &= (H_4 * T_5 * U_4) \& (H_2 * T_1 * U_3) \& (H_2 * T_3 * U_1) \end{aligned}$$

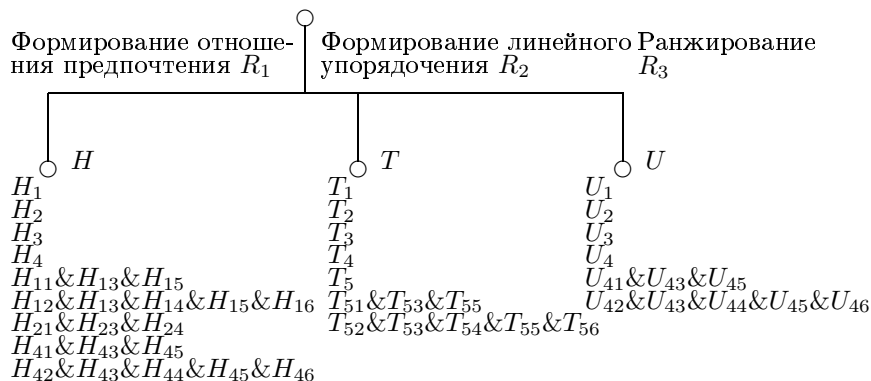


Рис. 11. Результирующая проектная морфология

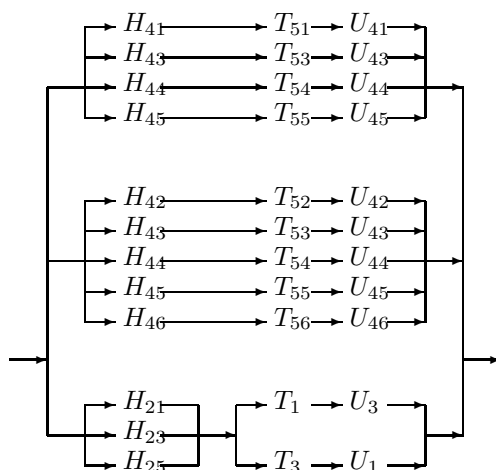


Рис. 12. Последовательно-параллельные стратегии решения

В главе 6 предлагается набор системных "технологических" задач: структурное моделирование, проектирование, улучшение, оценивание, выявление "узких мест", многостадийное проектирование, моделирование (системных поколений систем). Указанные задачи базируются на ИММП.

3 Прикладные Задачи

Во-первых, представляется целесообразным перечислить основные системные "технологические-задачи, базирующиеся на введенном в работе морфологическом подходе: 1. модульное иерархическое проектирование (T_1) [11, 13, 14, 16, 19, 23, 28, 36, 32, 37, 38, 34, 35]; 2. многостадийное проектирование (T_2) [28, 36, 34, 38, 35]; 3. многостадийное (T_3) [28, 37]; 4. перепроектирование, улучшение, адаптация, трансформация (reengineering, upgrade) (T_4) [28, 34, 39, 35]; 5. оценивание (T_5) [39, 35]; 6. моделирование комбинаторной эволюции (T_6) [31, 35]; 7. стратегическое планирование и прогнозирование (T_7) [28, 35].

В Таблице 1 иллюстрирует разработанные прикладные задачи.

Таблица 1. Приложения и технологические задачи

Приложения	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
1.Информ. системы	*			*			
2.Электронные устройства						*	
3.Чел.-маш. интерфейс	*		*	*		*	
4.Здания	*			*	*		
5.Проектирование бригады	*			*			
6.Технология бетона	*	*		*			
7.Планирование лечения	*		*				
8.Преподавание	*			*			
9.Передача информации							*
10.Иммунология	*	*					

Следующая информация представляет экспертное описание автора для базового набора проведенных прикладных работ. Описание имеет следующую позиционную структуру: (*i*) область; (*ii*) эксперт; (*iii*) сложность задачи по шкале [1...5], 5 - наивысшая сложность; (*iv*) существование базового примера; (*v*) уровень структурного мышления эксперта по шкале [1...5], 5 - наивысший уровень; а (*vi*) тип стратегии (d - прямая стратегия "шаг-за-шагом", p - на основе прототипа). Рассматривается следующий список прикладных задач:

1. информационная система (центр); М.Ш. Левин & Л.С. Левинский; 5; Да; 5,d; [28].
2. модульный программный пакет; М.Ш. Левин; 3; Да; 5,p; [34, 35].
3. Чел.-маш. интерфейс; М.Ш. Левин; 5; Нет; 5,d; [23, 28, 32].
4. проектирование бригады; М.Ш. Левин; 3; Да; 5,d; [28].
5. Размещение персонала по комнатам; М.Ш. Левин; 4; Да; 5,d; [28].
6. Проектирование программы учебного курса; М.Ш. Левин; 4; Да; 5,d; [14, 28].
7. Проектирование стратегии решения; М.Ш. Левин; 3; Нет; 5,p; [28].
8. Чел.-маш. система; М.Ш. Левин; 5; Нет; 5,d; [28, 32].
9. Планирование геологических исследований; В.И Порожун; 3; Нет; 5,d; [16, 28].
10. Технология бетона; М.Л. Nisnevich; 3; Нет; 3,d; [36, 35].
11. Стандарты в открытых системах; В. Батоврин; 5; Нет; 4,p; [19].
12. Перепроектирование зданий; М.А. Danieli; 3; Да; 2,d; [39, 35].
13. Вибрационный конвейер; Ю.Т. Каганов; 5; Нет; 2,d; [28].
14. Проектирование стратегий маркетинга; М.Ш. Левин; 3; Да; 4,p; [35].
15. Проектирование жизненного цикла продукции; М.Ш. Левин; 3; Да; 4,p; [36, 35].
16. Планирование лечения; Л.В. Соколова; 4; Нет; 4,p; [37].
15. Моделирование эволюции системы (программа); М.Ш. Левин; 4; Нет; 5,d; [28].
17. Моделирование эволюции системы (устройство обработки сигналов); В.А. Feldman & М.Ш. Левин; 5; [35].
18. Иммунология (immunoassay technology); М.А. Firer; 5; Нет; 5,d; [38].

В главе 7 предлагается подход к преобразованию существующей декомпозируемой системы на основе ИММП. Мы вводим пространства объектов (система, ее элементы, акции изменений) и их качества (Рис. 13).

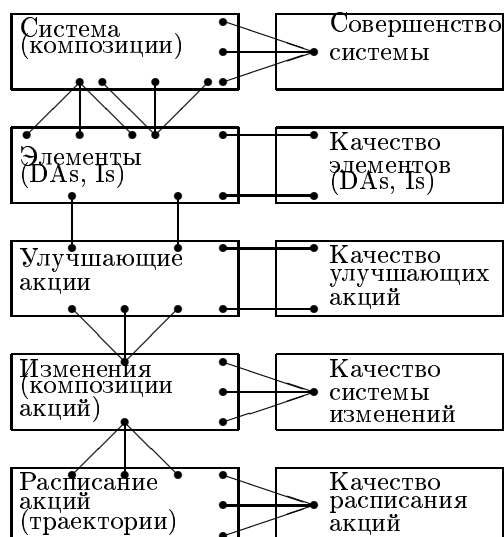


Рис. 13. Пространства объектов и их качества

В результате процесс трансформации системы базируется на применении ИММП к новой декомпозируемой системе - иерархии акций изменений и параллельно-последовательной стратегии их реализации.

Глава 8 базируется на некоей шкале интеллектуальности, предложенной Г.С.Альтшуллером (использование готового объекта, выбор, модификация, проектирование нового объекта и системы объектов) или близких подобных шкалах, разработанных психологами.

Для высоких творческих уровней рассматриваются комплексные задачи, в основном, в виде композиционного синтеза. При этом предлагаются подходы к формированию учебных программ в области приложений и комбинаторного синтеза с учетом специфики студентов (например, пользователь, инженер-системотехник).

4 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сформировано новое научно-техническое направление "Комбинаторный морфологический синтез модульных (составных, декомпозируемых) систем", имеющее практическое приложение в различных областях техники, экономики, управления и медицины.

2. Предложено "Иерархическое Морфологическое Многокритериальное Проектирование" (ИММП) декомпозируемых систем (этапы, предположения, базовые комбинаторные задачи, информационная поддержка).

3. Предложены новые рюкзачные модели с совместимостью элементов, которые необходимы при построении агрегативных проектных альтернатив.

4. Предложена новая модель комбинаторной оптимизации (рюкзак с специальными логическими ограничениями) и новый приближенный полиномиальный алгоритм с гарантированной относительной погрешностью целевой функции и невязки ограничений. Эта модель, в частности, имеет приложение при проектировании оверлейной структуры сложного программного комплекса.

5. Разработан новый морфологический подход к синтезу декомпозируемых систем с учетом порядковых оценок качества локальных решений и их совместимости. Этот подход базируется на новой модели комбинаторной оптимизации - морфологическая клика. В рамках этого подхода разработано новое представление качества декомпозируемых систем в виде специальной решетки, и алгоритмические схемы формирования глобальных составных решений, их анализа и улучшения.

6. Предложена классификационная формула для задач комбинаторного синтеза декомпозируемых систем, объединяющая большое число известных задач подобного типа. Проведено описание сложности этих задач, выделены основные факторы их сложности, и предложен новый подход к структурной аппроксимации декомпозируемых систем, имеющий приложение в информационном проектировании. Кроме того выявлены некоторые полиномиальные разрешимые случаи на основе анализа "обобщенной совместимости".

7. Предложена модель синтеза проектирования последовательно-параллельных стратегий решения на практическом примере построения стратегии решения многокритериального ранжирования при использовании библиотеки методов в виде операционной морфологической среды. Такой подход к построению библиотек методов и управлению моделями (model management) был предложен автором впервые и частично реализован в системе многокритериального ранжирования альтернатив СОМВИ.

8. Предложен общий подход и структура процесса анализа и трансформации декомпозируемых систем. При этом рассматривается не только исходная декомпозируемая система, но и проводится построение системы изменений (иерархии акций изменения) также в виде декомпозируемой системы. Таким образом аппарат, предложенный автором для анализа и проектирования декомпозируемых систем, применяется здесь для построения и анализа процесса трансформации декомпозируемой системы.

9. Предложены конкретные приложения разработанных подходов комбинаторного синтеза декомпозируемых систем (включая синтез, анализ и улучшение решений) к следующим задачам: проектирование информационного центра, проектирование пользовательского интерфейса, информационное проектирование в гипер-информационных системах, планирование жизненного цикла продукции, синтез учебного курса. Кроме того, предложены подходы к построению на базе комбинаторного синтеза макро-эвристик для нескольких задач комбинаторной оптимизации.

12. Разработаны и реализованы учебные курсы в области информационных технологий, приложений принятия решений (для студентов экономистов и инженеров) и проектирования систем на основе базовых моделей комбинаторного синтеза декомпозируемых систем. Часть учебных курсов базировалась на системе поддержке принятия решений СОМВИ-РС .

Список литературы

- [1] Левин М.Ш. Об эффективном решении некоторых задач теории расписаний на сетях// Кибернетика. - 1980. - N. 1. - С. 123-127.
- [2] Левин М.Ш. Одна экстремальная задача организации данных // Техн. кибернетика. - 1981. - N. 5. - С. 103-112.
- [3] Левин М.Ш. Применение оптимизационных комбинаторных моделей в автоматизированных системах// Сер. С-9. Автоматизированные системы управления. - М.: ВНИИТЭМР, 1986. - Вып. 1. - 64 с.
- [4] Левин М.Ш. Типовой подход к оценке качества машиностроительной продукции. - М.: ВНИИКИ, Серия "Управление качеством", 1988. - Вып. 4. - 64 с.
- [5] Левин М.Ш., Михайлов А.А. Фрагменты технологии стратификации множества объектов: Препринт. - М.: ВНИИСИ. - 1988. - 60 с.
- [6] Левин М.Ш. Применение оптимизационных комбинаторных моделей при оценке альтернатив// Принятие решений и анализ экспертной

информации. - Научный совет по компл. проблеме "Кибернетика" АН СССР, 1989. - N. 6. - С. 60-79.

- [7] Левин М.Ш. Иерархическая гипертекстовая система // НТИ, сер. 2. - 1989. - N. 6. - С. 10-13
- [8] Левин М.Ш. Автоматизированные средства многокритериального анализа машиностроительных объектов//Сер. "Автоматизация производства, гибкие производственные системы и робототехника". - М.: ВНИИТЭМР, 1990. - Вып. 6. - 36 с.
- [9] 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.
- [10] Белкин А.Р., Левин М.Ш. Принятие решений: Комбинаторные модели аппроксимции информации. М: Наука, 1990. - 160 с.
- [11] Левин М.Ш. Задача планирования информационного центра// НТИ, сер. 2. - 1995.- N. 2. - С. 16-24.
- [12] Левин М.Ш. О третьей грамотности// НТИ, сер. 2. - 1995. - N. 6 - С. 20-30.
- [13] Левин М.Ш. Типовые задачи принятия решений при подготовки бизнес-планов// НТИ, сер. 1. - 1995, N. 10. - С. 7 -13.
- [14] Левин М.Ш. Иерархический комбинаторный подход к планированию карьеры// НТИ, сер. 2. - 1996, N. 12, - С. 22-27.
- [15] М.Ш. Левин, О преподавании информационных технологий// НТИ, сер. 1. - 1996, N. 5, - С. 14-23.
- [16] Левин М.Ш., Пороскун В.И. Комбинаторное планирование исследования нефти и газа, Геологические исследования и эксплуатация. Вып. 4, Москва, Институт минеральных ресурсов РАН, 1997, С. 58-63.
- [17] Левин М.Ш. Комбинаторное проектирование систем// Автоматизация проектирования. - 1997, N. 4, - С. 14-19.
- [18] Левин М.Ш. Курс "Проектирование систем: структурный подход", <http://www.iitp.ru/SYSD.HTM/>
- [19] Батоврин В.К., Левин М.Ш. Использование метода морфологического проектирования в открытых информационных системах.// Информационные технологии и вычислительные системы, 2005, N. 4, С. 47-54.
- [20] Levin M.Sh. Hierarchical components of human-computer systems. *Human Computer Interaction*. LNCS, Vol. 753, Springer, 1993, pp. 37-52.
- [21] Levin M.Sh. Morphological clique problem. *Abstracts of Intl. Conf. on Combinatorial Optimization CO94*, Amsterdam, 1994.
- [22] Levin M.Sh. Towards design of complex decomposable system. *Abstracts of the 4th Intl. Design Automation Workshop*. Moscow, 1994, pp. 2-5.
- [23] Levin M.Sh. Hierarchical design of user interfaces. *Human Computer Interaction*. LNCS, Vol.876, Springer, 1994, pp. 140-151.

- [24] Levin M.Sh. Towards hierarchical morphological design of decomposable systems. *Proc. of The Second Conf. on Concurrent Engineering*, Virginia, 1995, pp. 65-75.
- [25] Levin M.Sh. Towards combinatorial engineering of decomposable systems. *13th Eur. Meeting on Cybern. and Syst. Res. EMCSR'1996*, Vienna, April 9-13, Vol. 1, 1996, pp. 265-270.
- [26] Levin M.Sh. Hierarchical morphological multicriteria design of decomposable systems. *Concurrent Eng.: Res. and Appl.*, 1996, 4(2), pp. 111-117.
- [27] Levin M.Sh. Towards comparison of decomposable systems. *Data Science, Classification, and Related Methods*, Springer, Tokyo, 1998, pp. 154-161.
- [28] Levin M.Sh. *Combinatorial Engineering of Decomposable Systems*, Kluwer, 1998, 372 pp.
- [29] Levin M.Sh. System synthesis with morphological clique problem: Fusion of subsystem evaluation decisions. *Inform. Fusion*, 2001, 2(3), pp. 225-237.
- [30] Levin M.Sh. Hierarchical approach for engineering skills acquisition. *Engineering of Intelligent Systems, LNCS 2070*, Springer, 2001, pp. 92-100.
- [31] Levin M.Sh. Combinatorial evolution of composite systems, *Proc. of the 16th Eur. Meeting on Cybern. and Syst. Res. EMCSR'2002*, Vol. 1, Vienna, 2002, pp. 275-280.
- [32] Levin M.Sh. Towards combinatorial analysis, adaptation, and planning of human-computer systems, *Applied Intelligence*, 2002, 16(3), pp. 235-247.
- [33] Levin M.Sh. Common part of preference relations. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 2003, 28(4), pp. 223-246.
- [34] Levin M.Sh. Modular system synthesis: Example for composite packaged software. *IEEE Trans. on SMC, Part C*, 2005, 35(4), pp. 544-553.
- [35] Levin M.Sh. *Composite Systems Decisions*, Book Series "Decision Engineering", Springer, 2006, 268 pp.
- [36] Levin M.Sh., Nisnevish M.L. Combinatorial scheme for management of life cycle: Example for concrete macrotechnology. *J. of Intelligent Manufacturing*, 2001, 12(4), pp. 393-401.
- [37] Levin M.Sh., Sokolova L.V. Hierarchical combinatorial planning of medical treatment. *Comp. Meth. and Progr. in Biomedicine*, 2004, 73(1), pp. 3-11.
- [38] Levin M.Sh., Firer M. Hierarchical Morphological Design of Immunoassay Technology. *Computers in Biology and Medicine*, 2005, 35(3), pp. 229-245.
- [39] Levin M.Sh., Danieli M.A. Hierarchical Decision making framework for evaluation and improvement of composite systems (example for building). *INFORMATICA*, 2005, 16(2), pp. 213-240.