

# Проектирование и перепроектирование конфигурации оборудования коммуникационной сети

М.Ш. Левин, А.В. Сафонов

**Аннотация.** Предлагается подход к задачам проектирования и перепроектирования (upgrade) коммуникационных сетей на основе многокритериального выбора конфигурации оборудования при размещении сетевой аппаратуры (с учетом предварительной группировки сетевых узлов). В качестве базовых оптимизационных «блоков» используются задача многокритериального ранжирования, задача кластеризации и блочная задача о рюкзаке (multiple choice problem). Анализ оборудования и проектирование сетей базируется на системах требований/критериев (четыре группы: эффективность, управляемость, надежность, другие характеристики и требования). В качестве ресурсного ограничения используются затраты. Для блочной задачи о рюкзаке рассмотрены различные алгоритмические схемы: (i) схема динамического программирования, (ii) эвристика («жадный» алгоритм) и (iii) приближенная алгоритмическая схема, включая использование «решетки качества» составных решений. В работе приведены численные расчеты для примера реалистичной корпоративной сети (задачи проектирования и перепроектирования).

## Введение

В последние годы особое внимание уделяется исследованиям в области построения конфигураций сложных многокомпонентных систем (Рис. 1). Например:

- 1) производственные системы [19, 20],
- 2) электронные системы [25],
- 3) программные комплексы [14-16, 21, 25],
- 4) алгоритмические системы [15, 16],
- 5) коммуникационные системы [21],
- 6) системы сервиса для интернета (web services) [2, 17],
- 7) семейства промышленных изделий [6],
- 8) профили среды открытых систем [1],
- 9) системы цепочек поставок (supply chains) [3, 4, 32].

Можно указать следующие основные подходы к решению задач проектирования конфигураций:

- многокритериальная блочная задача о рюкзаке (multicriteria multiple choice problem) [25, 27, 28],
- технология интеллектуальных агентов [31],
- иерархический морфологический подход [1, 12-15],

- методы на основе размытых множеств [32].

Кроме того, применяются методы искусственного интеллекта [20].

Данная статья посвящена проектированию конфигурации коммуникационной сети. Обычно процесс проектирования включает три этапа выбора [22]: (a) топологии сети, (b) реализуемых технологий и (c) применяемого оборудования. Задачи выбора топологии сети рассматриваются во многих работах [10, 22-24]. На втором этапе (выбор технологии) в последнее время часто отдается предпочтение технологии на базе протокола IP. Таким образом, особый интерес представляет проблема выбора оборудования.

В нашей работе выбор конфигурации оборудования (проектирование и перепроектирование) базируется на использовании многокритериальной блочной задачи о рюкзаке [27, 28]. Анализ оборудования основывается на системах требований/критериев (четыре группы: эффективность, управляемость, надежность, другие характеристики и требования).

В качестве ресурсного ограничения используются затраты. Для многокритериальной блочной задачи о рюкзаке рассмотрены различные алгоритмические схемы: (i) схема динамического программирования [8, 9, 18], (ii) эвристика («жадный» алгоритм) [9, 18, 27] и (iii) приближенная алгоритмическая схема, включая новый подход на основе использования «решетки качества» составных решений [1, 12-15, 28]. Численные расчеты для примера реалистичной корпоративной сети иллюстрируют предлагаемые схемы решения. Расчеты проводились на основе разработанных программ (в среде MatLab [34]).



Рис. 1. Иллюстрация конфигурации системы

## 2. Коммуникационная сеть

### 2.1. Описание сети

Здесь рассматривается типичная сеть филиала предприятия или просто небольшого офиса (Рис. 2) [27]. Исследуемый пример сети основан на материалах фирмы Cisco, представленных на соответствующем сайте [33]. В рассматриваемом примере сети можно выделить 4 точки, требующие установки следующего оборудования:

- коммутатор 3+ уровня, имеющий не менее 8 1G портов,
- маршрутизатор для безопасного подключения к Интернету,
- коммутаторы, имеющие не менее 30 портов (VLAN3),
- коммутаторы, имеющие не менее 30 портов (VLAN7).

### 2.2. Требования и критерии оценки оборудования

В Таб. 1 приведен список основных требований (параметров, характеристик, критериев). Множество параметров разбивается на 4 группы (кластеры):

- производительность ( $C_1$ );
- управляемость (т.е. эффективность управления,  $C_2$ );
- надежность ( $C_3$ );
- прочие особенности ( $C_4$ ).

Дополнительно обозначен требуемый для устройства ресурс R (цена в долларах США).

Табл. 1. Соответствие параметров оценки и кластеризованных групп

Параметр оценки	Группа кластеризованных критериев
Базовая гарантированная надежность	Надежность
Избыточность	Надежность
Прогнозируемое время между ошибками	Надежность
Базовые средства безопасности	Надежность
Современные средства безопасности	Надежность
Базовая поддержка технологий QoS	Производительность
Расширенная поддержка технологий QoS	Производительность
Базовые возможности по управлению	Управляемость
Легкость внедрения и эксплуатации	Управляемость
Поддержка ПО "Network Assistant"	Управляемость
Максимально возможная для линии скорость	Производительность
Масштабируемость	Производительность
Скорость аплинков (uplinks)	Производительность
Поддержка технологии Power over the Ethernet	Прочие особенности
Возможность объединения в кластер (стэк)	Прочие особенности

### 2.3. Список сетевого оборудования

Здесь список оборудования рассматривается как предварительное множество возможных вариантов (Таб. 2; указаны индексы устройств, полный список рассматриваемого оборудования фирмы Cisco Systems [33]). В каждой точке сети используется определенная группа устройств (имеется 4 группы). Рассмотрим группы устройств:

## Enterprise Branch Office

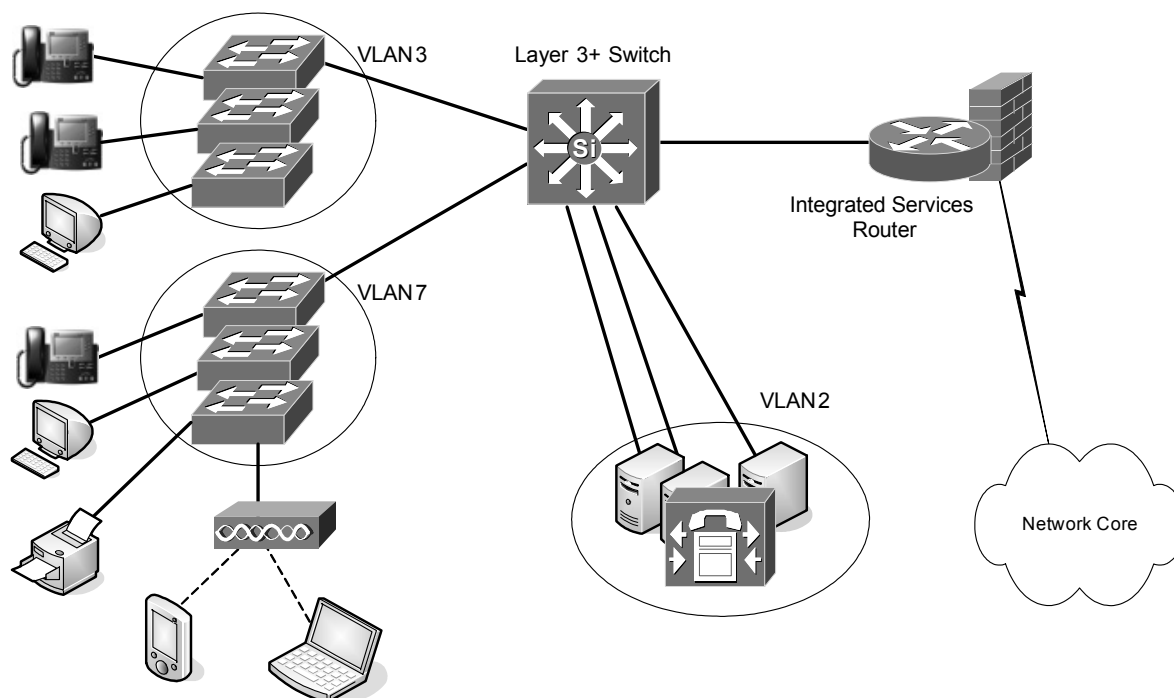


Рис. 2. Схема примера корпоративной сети

*Группа 1.* Коммутатор третьего уровня или выше, имеющий не менее 8 портов. Требования: 8 гигабитных (1G) Ethernet-портов для медных линий, поддержка маршрутизации между виртуальными сетями и некоторые другие сервисы, относящиеся к третьему и четвертому уровню (согласно модели OSI).

*Группа 2.* Маршрутизатор для безопасного доступа к сети головного офиса и к Интернету. Требования: желательно, чтобы это был маршрутизатор с поддержкой интегрированных сервисов, поддержка множества различных средств обеспечения безопасности, в т.ч. VPN-туннелирования, и обеспечение G.SHDSL подключения к Интернет. Также желательна расширенная поддержка технологий QoS для обеспечения высокого качества работы, как голосовых сервисов, так и сервисов передачи данных.

*Группа 3.* Коммутаторы, предоставляющие не менее 30 портов (VLAN 3). Требования: 30 Ethernet-портов, причем они должны быть как минимум - 100-мегабитными, предпочтительно – гигабитными (далее такое требование будем

указывать как 100M+). Также желательна поддержка технологии Power Over The Ethernet.

*Группа 4.* Коммутаторы, предоставляющие не менее 70 портов (VLAN 7). Требования: 70 100-мегабитных Ethernet-портов. Также желательна поддержка технологии Power Over The Ethernet. Предполагается, что разумно рассматривать конфигурации из пар почти идентичных (за исключением количества портов) коммутаторов, предоставляющих соответственно 24 и 48 портов – 72 порта. В итоге это удовлетворяет выдвинутому требованию. В Табл. 2 эти пары обозначены индексом одного виртуального устройства.

Отметим, все вышеприведенные оценки по критериям  $C_1, C_2, C_3, C_4$  основаны на степени соответствия технических характеристик устройств (согласно спецификациям, предоставленным корпорацией Cisco Systems [33]).

### 2.4. Задачи: проектирование и перепроектирование

Задача проектирования конфигурации оборудования коммуникационной сети может быть

сформулирована следующим образом: выбрать один элемент (т.е. устройство) из каждой группы таким образом, чтобы было получено наилучшее соответствие требованиям (чтобы выбранные устройства имели наивысшие оценки по критериям) и не было нарушено общее бюджетное ограничение [27]. Задача перепроектирования предполагает улучшение существующего решения (существующей конфигурации) [27, 28].

Табл. 2. Список устройств с оценками

#	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	R	#	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	R
1.1	7	4	6	5	4795	3.7	4	7	6	5	4790
1.2	7	6	6	6	8790	3.8	4	7	6	4	3590
1.3	7	4	6	5	5595	3.9	9	5	7	7	13995
1.4	7	6	6	6	9590	3.10	9	7	7	7	21990
1.5	8	5	8	6	5995	3.11	9	5	6	8	15495
1.6	8	7	8	7	9990	3.12	9	7	6	8	23490
1.7	8	5	7	6	7495	3.13	8	5	8	6	6995
1.8	8	7	7	7	11490	3.14	8	7	8	6	8990
1.9	8	5	8	7	6995	3.15	8	5	7	7	8495
1.10	8	7	8	8	10990	3.16	8	7	7	7	10490
1.11	8	5	7	6	7795	3.17	8	5	7	7	7995
1.12	8	7	7	7	11790	3.18	8	7	7	7	11990
1.13	7	5	7	8	11995	3.19	8	5	6	8	9495
1.14	7	7	7	9	15990	3.20	8	7	6	8	13490
1.15	6	5	9	7	7995	3.21	7	5	9	6	4995
1.16	6	7	8	8	8995	3.22	7	7	9	6	6990
2.1	3	4	4	4	949	3.23	7	5	7	7	6495
2.2	4	4	4	4	1049	3.24	7	7	7	7	8490
2.3	5	5	5	4	1695	4.1	8	5	8	7	10990
2.4	5	6	7	5	1895	4.2	8	7	8	7	14980
2.5	6	7	8	6	2495	4.3	8	5	7	8	13290
2.6	6	7	8	6	2995	4.4	8	7	7	8	17280
2.7	6	7	8	7	4845	4.5	7	5	9	7	7990
2.8	6	7	8	7	7445	4.6	7	7	9	7	11980
2.9	8	7	8	6	2995	4.7	7	5	7	8	10290
2.10	8	7	8	7	4845	4.8	7	7	7	8	14280
2.11	8	7	8	7	7445	4.9	5	4	6	5	6990
3.1	5	4	6	5	4495	4.10	5	4	6	5	3590
3.2	5	4	6	5	2495	4.11	5	5	5	5	5790
3.3	6	4	5	6	6590	4.12	5	7	6	6	6990
3.4	5	5	5	5	3995	5.1	6	4	5	6	3295
3.5	5	5	5	5	2495	5.2	5	3	5	3	1995
3.6	5	7	6	5	4495	5.3	4	7	6	5	2495

### 3. Задачи комбинаторной оптимизации

#### 3.1. Многокритериальное ранжирование

Рассмотрим альтернативы  $A = \{A_1, \dots, A_j, \dots, A_n\}$ , критерии  $C = \{C_1, \dots, C_p, \dots, C_r\}$ . Для каждой  $A_j$  задан вектор оценок  $z_j = (z_{j1}, \dots, z_{jp}, \dots, z_{jr})$  по критериям  $C_1, \dots, C_p, \dots, C_r$ . Пусть  $\mu_p$  - вес (важность) критерия  $C_p$ . Задача состоит в сравнении альтернатив (по векторам оценок  $z_j$  с учетом весов критериев  $\mu_p$ ) и формировании для каждой аль-

тернативы порядковой оценки качества – приоритета. В работе использован метод порогов несравнимости Electre [26].

#### 3.2. Блочная задача о рюкзаке

##### 3.2.1. Базовая версия блочной задачи о рюкзаке

Данная задача является расширением задачи о рюкзаке [5, 9, 11, 18]:

$$\max \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{при условиях } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} a_{ij} x_{ij} \leq b$$

$$\sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1 \forall i = 1, \dots, m$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Эта задача является NP-трудной ([5], [9], [18]). Укажем несколько основных алгоритмов решений данной задачи:

#### А. Схема динамического программирования

Приведем схему динамического программирования [8, 9, 18]. Рассматриваются  $m$  стадий:  $1, \dots, \beta, \dots, m$  ( $\beta$  является индексом группы элементов). На каждой стадии  $\beta$  результатом является множество допустимых (выполняются ограничения по ресурсу  $b$ ) решений  $X^\beta$ . Каждое решение представляет собой бинарный вектор,

в котором число компонентов равно  $\sum_{i=1}^{\beta} q_i$ .

Стадия 1 (исходная).

Имеется множество решений:

$$X^1 = \{y_1 = (1, 0, \dots, 0), y_2 = (0, 1, 0, \dots, 0), y_3 = (0, 0, 1, 0, \dots, 0), \dots, y_{q_1} = (0, \dots, 0, 1)\},$$

$$|X^1| = q_1, \text{ т.е., } x_{11} = 1, x_{12} = 1, \dots, x_{1q_1} = 1.$$

Стадия  $\beta$ .

1. Операция расширения:  $\forall u \in X^{\beta-1}$  проводится расширение (конкатенация) справа на основе следующих правых частей:  $z_1 = (1, 0, \dots, 0)$ ,  $z_2 = (0, 1, 0, \dots, 0)$ ,  $z_3 = (0, 0, 1, 0, \dots, 0)$ , ...,  $z_{q_\beta} = (0, \dots, 0, 1)$ . Получается  $q_\beta$  расширенных решений, основанных на каждом  $u$  и результирующее множество решений обозначается  $X^{+\beta}$ .

2. Операция отбора по ресурсному ограничению.  $\forall u \in X^{+\beta}$  вычисляется требуемый ресурс

и исключаются те решения, для которых ограничение не выполняется.

Результирующее множество решений обозначается  $X^{*\beta} \subseteq X^{+\beta}$ .

3. Операция отбора по доминированию. Отбирается множество решений

$X^\beta \subseteq X^{*\beta}$ . Здесь  $X^\beta$  является множеством Парето - эффективных решений по двум критериям: (а) требования по ресурсу (на минимум) и (б) целевая функция (на максимум).

*Стадия m.*

1. Операция расширения.

2. Операция отбора по ресурсному ограничению.

3. Операция отбора по доминированию (по максимуму целевой функции).

В результате получается оптимальное решение (или несколько оптимальных решений с максимальным значением целевой функции). Алгоритм представляет собой переборную схему.

### **Б. Приближенная полиномиальная схема с гарантированной погрешностью**

Приближенная (по целевой функции) схема разбиения на интервалы заключается в следующем ([7], [9], [18], [29]). Пусть  $M$  будет оценкой целевой функции сверху (для всех допустимых решений)  $M \geq \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij} x_{ij}$ ,  $\varepsilon$  - относительная погрешность по целевой функции ( $\varepsilon \in [0,1]$ ). Интервал  $[0, M]$  разбивается на  $v = v(\varepsilon, M)$  интервалов и используется схема динамического программирования. На каждой стадии  $\beta$  ( $\beta = 1, \dots, m$ ) для каждого интервала выбирается решение с минимальным ресурсным требованием. Временная сложность данного алгоритма:  $O(m^2 q_0 / \varepsilon)$ , где  $q_0 = \max \{q_i\}$ .

### **В. Эвристика («жадный» алгоритм).**

*Стадия 1.* Здесь вычисляется для каждого элемента  $(i, j)$  следующее:  $w_{ij} = c_{ij} / a_{ij}$  и элементы упорядочиваются по невозрастанию указанного отношения.

*Стадия 2.* Рассматриваются элементы в полученном линейном упорядочении и упаковываются в рюкзак с учетом следующего: (а) существование упакованного ранее элемента в соответствующей группе (индекс группы  $i$ ), (б)

ограничение по ресурсу. Остановка процесса базируется на окончании списка элементов.

### **3.2.2. Многокритериальная блочная задача о рюкзаке**

Пусть вместо полезности элемента  $c_{ij}$  используется вектор из  $r$  компонент:

$(c_{ij}^1, \dots, c_{ij}^p, \dots, c_{ij}^r)$ . Оптимизация (поиск эффективных по Парето решений) осуществляется по векторной целевой функции:

$$\left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij}^1 x_{ij}, \dots, \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij}^p x_{ij}, \dots, \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij}^r x_{ij} \right)$$

при условиях  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{q_i} a_{ij} x_{ij} \leq b$

$$\sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1 \forall i = 1, \dots, m$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

Очевидно, что можно использовать схемы решения, аналогичные приведенным выше.

### **А. Схема динамического программирования**

Здесь используется версия схемы динамического программирования, описанная выше с учетом отбора Парето-эффективных решений по  $(r+1)$  критериям: (а) требуемый ресурс (минимум) и (б)  $r$  критериев по векторной целевой функции [8].

### **Б. Эвристика**

Предварительное сведение многокритериальной задачи следующим образом [27, 28]:

*Стадия 1.* Многокритериальное ранжирование элементов  $(c_{ij}^1, \dots, c_{ij}^p, \dots, c_{ij}^r)$  для получения приоритета  $t_{ij}$  для каждого элемента (приоритет 1 является лучшим).

Далее используется рассмотренная выше эвристика с учетом приоритетов элементов  $t_{ij}$  ( $t_{ij} \in [1, k]$ ) вместо  $w_{ij} = c_{ij} / a_{ij}$ .

*Стадия 2.* Использование эвристики с упорядочением элементов по неубыванию приоритетов.

### **В. Схема с «решеткой качества»**

Здесь применяется приближенный алгоритм на основе динамического программирования, но вместо интервалов по целевой функции используются элементы «решетки качества» (для

каждого элемента «решетки качества» оставляем одно решение с минимальным требованием по ресурсу [28]. Примеры решетки качества приведены на Рис. 3. Рис. 4 иллюстрирует процесс решения задачи. На Рис. 5 приведены примеры решений. Оценка временной сложности данной схемы решения имеет вид:  $O(m^3k^2q_0)$ .

#### 4. Задача проектирования конфигурации оборудования

Здесь для решения задачи проектирования применены многокритериальная блочная задача о рюкзаке и эвристический подход эвристический подход (с предварительным многокритериальным ранжированием оборудования на основе метода Electre для получения порядковых оценок качества - приоритетов). Результаты, полученные при разных ресурсных ограничениях (бюджетах), приведены в Табл. 3.

Табл. 3. Первоначальные конфигурации оборудования

	Бюджет	выбор в группе №			
		1	2	3	4
1	12000	1.1	2.01	3.05	4.10
2	15500	1.5	2.05	3.05	4.10
3	20000	1.9	2.05	3.21	4.10
4	30000	1.6	2.09	3.21	4.06
5	40000	1.6	2.09	3.10	4.10
6	50000	1.6	2.10	3.10	4.06

#### 5. Задача перепроектирования

##### 5.1. Описание задачи

Для задачи перепроектирования конфигурации оборудования предложены три схемы решения: (а) полного перепроектирования, (б) частичного перепроектирования, (в) гибридного подхода. Наилучший комплект оборудования – это набор, включающий по одному элементу (устройству) из каждой группы альтернативных вариантов, выбранному таким образом, чтобы было получено наилучшее соответствие требованиям (т.е., чтобы выбранные устройства имели наивысшие оценки по критериям) при условии выполнения бюджетного ограничения. Исследуется следующая практическая ситуация: рассматриваемый в качестве примера офис расширяется, и это приводит к

новым требованиям к сетевой инфраструктуре. В частности, необходимо добавить 10 1GE портов (UTP) в VLAN 3 (группа №3). Возможны два принципиально различных подхода к решению этой задачи с помощью перепроектирования существующей сети:

- перепроектирование лишь для узлов, к которым предъявляются новые требования
- перепроектирование для всех узлов (с учетом изменившихся требований).

##### 5.2. Описание схемы решения

Как видно из требований, необходимо 10 1GE портов в дополнение к старым 30 портам, которые обеспечивают как минимум 100-мегабитную скорость подключения. В результате требуется 30 100M+ портов и 10 1G портов. Этому требованию отвечают следующие варианты выбора устройств: 48 1G/24 100M+ 24 1G/48 100M+ и 24 1G/48 100M+ и 12 1G портов. Таким образом, возможны следующие варианты действий для выполнения новых требований:

- установленное оборудование им уже удовлетворяет и никаких мер предпринимать не надо;
- приобрести новое оборудование в дополнение к уже установленному устройству;
- приобрести новое и заменить им установленное ранее устройство.

##### 5.3. Частичное перепроектирование конфигурации

Частичное перепроектирование представляет собой наиболее популярный подход к улучшению сети в реальных ситуациях, т.к. позволяет сохранить ранее сделанные инвестиции в оборудование и достаточно экономно расходовать бюджет. При частичном перепроектировании затраты естественным образом фокусируются на узлах сети, действительно требующих улучшения для того, чтобы удовлетворить новым требованиям. В нашем случае (Табл. 4) требуется рассмотреть в соответствии с алгоритмом все возможные варианты выбора устройств в группе 3, не нарушающие наложенного ресурсного ограничения. Рассмотрим случаи № 2, 4 и 6 из таблицы 3 (с бюджетами в 15500, 30000 и 50000). Случай №6 удовлетворяет также и новым требованиям, а №2 и 4 - не удовлетворяют и требуют добавления нового устрой-

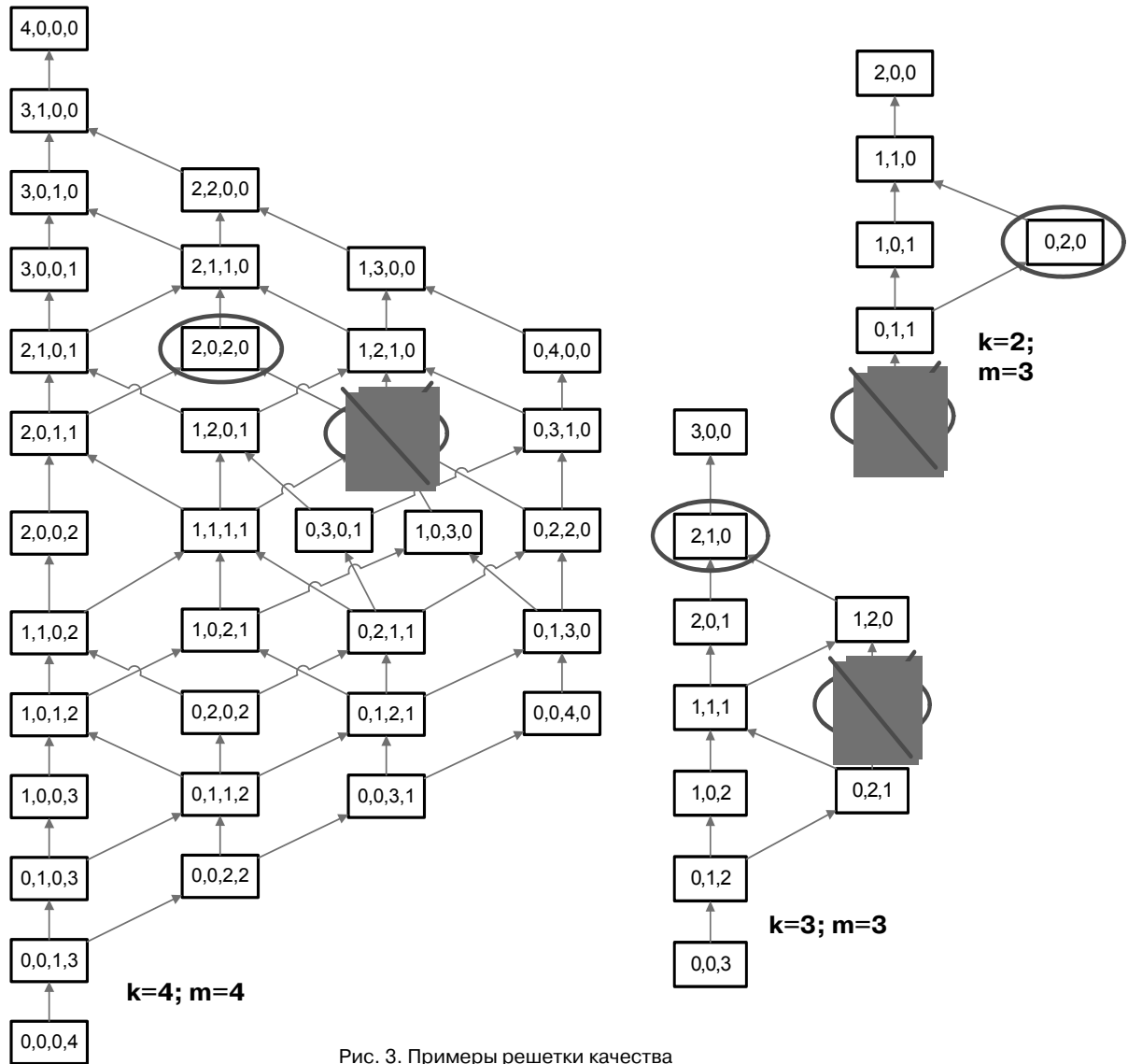


Рис. 3. Примеры решетки качества

ства или замены старого более совершенным. Как было отмечено, для них возможны различные варианты улучшения. Следующие результаты были получены для случаев № 2, 4 и 6 (Табл. 4) с несколькими ресурсными ограничениями (новое ограничение - выделенный новый бюджет + неизрасходованная часть старого). В них попали лишь варианты добавления нового устройства, т.к. во всех случаях они оказались предпочтительней замены. В других условиях может быть выгоднее провести замену, чем присоединять еще одно устройство.

Табл. 4. Выбранные устройства при различных бюджетах (частичное п/п)

Случай №	Бюджет	Устройство, выбранное в группе №				
		1	2	3	Добавляемое #	
2	2000				5,2	4,10
	4000	1,5	2,5	3,5	5,1	
	6000				1,5	
4	3500				5,1	4,6
	6000	1,6	2,9	3,21	1,5	
	8000				1,11	
6	-	1,6	2,10	3,10	-	4,6

#### 5.4. Полное перепроектирование конфигурации

На практике полное перепроектирование ограничено применимо ввиду чрезвычайно больших (в сравнении с частичным перепроектированием) затрат, но представляется целесообразным провести расчеты и для этого случая (Табл. 5). Их результаты могут помочь в анализе нашей конфигурации. Необходимо решить задачу проектирования, состоящую из нового набора для группы №3, а для остальных (№1, 2 и 4) – из старых наборов (соответствующие разделы Табл. 2). Следующие результаты были получены при разных ресурсных ограничениях (бюджетах) для случаев № 2, 4 и 6 (Табл. 5).

Табл. 5. Выбранные устройства при различных бюджетах (полное п/п)

№	Бюджет	# выбранное в группе №			
		1	2	3	4
2	17500	1.5	2.09	5.02+3.05	4.10
	19500	1.9	2.09	5.02+3.05	4.10
	21500	1.9	2.09	5.01+5.03	4.10
4	33500	1.6	2.10	3.18	4.11
	36000	1.6	2.10	3.18	4.05
	38000	1.6	2.09	3.18	4.06
6	50000	1.6	2.10	3.10	4.06

#### 5.5. Гибридный подход к перепроектированию

Как уже было отмечено выше, в практических ситуациях зачастую проведение полного перепроектирования невозможно ввиду ресурсных ограничений. Однако, именно полное перепроектирование обычно дает наилучшее возможное решение. Таким образом, имеется следующие множества вариантов решений: (1) множество всех возможных вариантов, (2) множество наилучших вариантов, полученных при полном перепроектировании и (3) множество наилучших вариантов, полученных при частичном перепроектировании. Сущность гибридного подхода к проектированию заключается в детальном изучении этих множеств для анализа возможных наборов устройств и нахождения наилучшего реализуемого варианта.

Выполнение алгоритма,  $k = r^*$

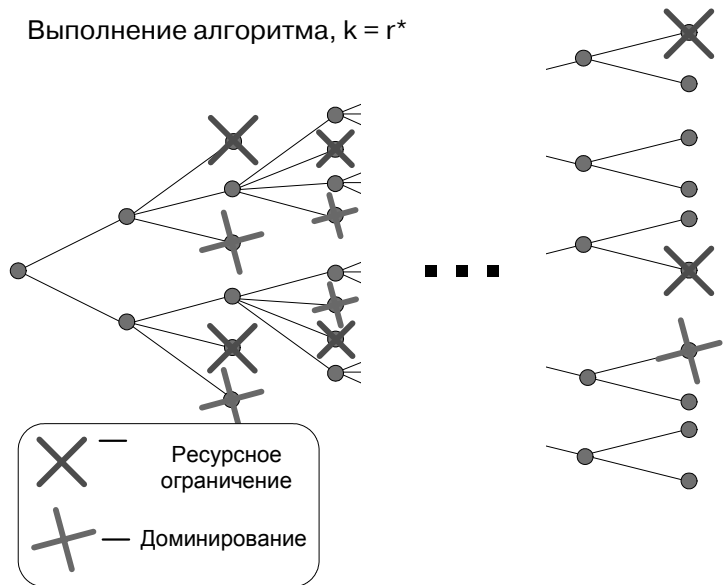


Рис. 4. Иллюстрация алгоритмической схемы (динамическое программирование)

##### 5.5.1. Описание схемы решения

Рассмотрим множества наилучших вариантов, полученных при полном и частичном перепроектировании. Эти множества могут: а) не пересекаться; б) иметь непустое пересечение; в) полностью совпадать (Рис. 6). Во-первых, самым простым является случай в): можно произвести частичное перепроектирование и быть уверенным в том, что получили наилучший вариант. Далее, в случае б) необходимо считать результатом элементы, принадлежащие обоим множествам. Наконец, случай в): в нем должны рассматриваться близость реализуемых вариантов к наилучшим (полученным при полном перепроектировании). Таким образом, возникает задача нахождения решений, наиболее близких к множеству “идеальных” решений. Подход к этой задаче основывается на следующем: вернуться к оценкам элементов по группе критериев  $C$ , изучить оценки реализуемых вариантов, а далее попытаться найти наиболее “близкие” к “идеальным” решениям.

##### 5.5.2. Анализ численных результатов

Рассмотрим варианты, отвечающие ресурсным ограничениям в 17500 и 19500. Для первого варианта имеется лишь одно отличие – в группе № 2 при частичном перепроектировании выбрано устройство 2.5 вместо 2.9.



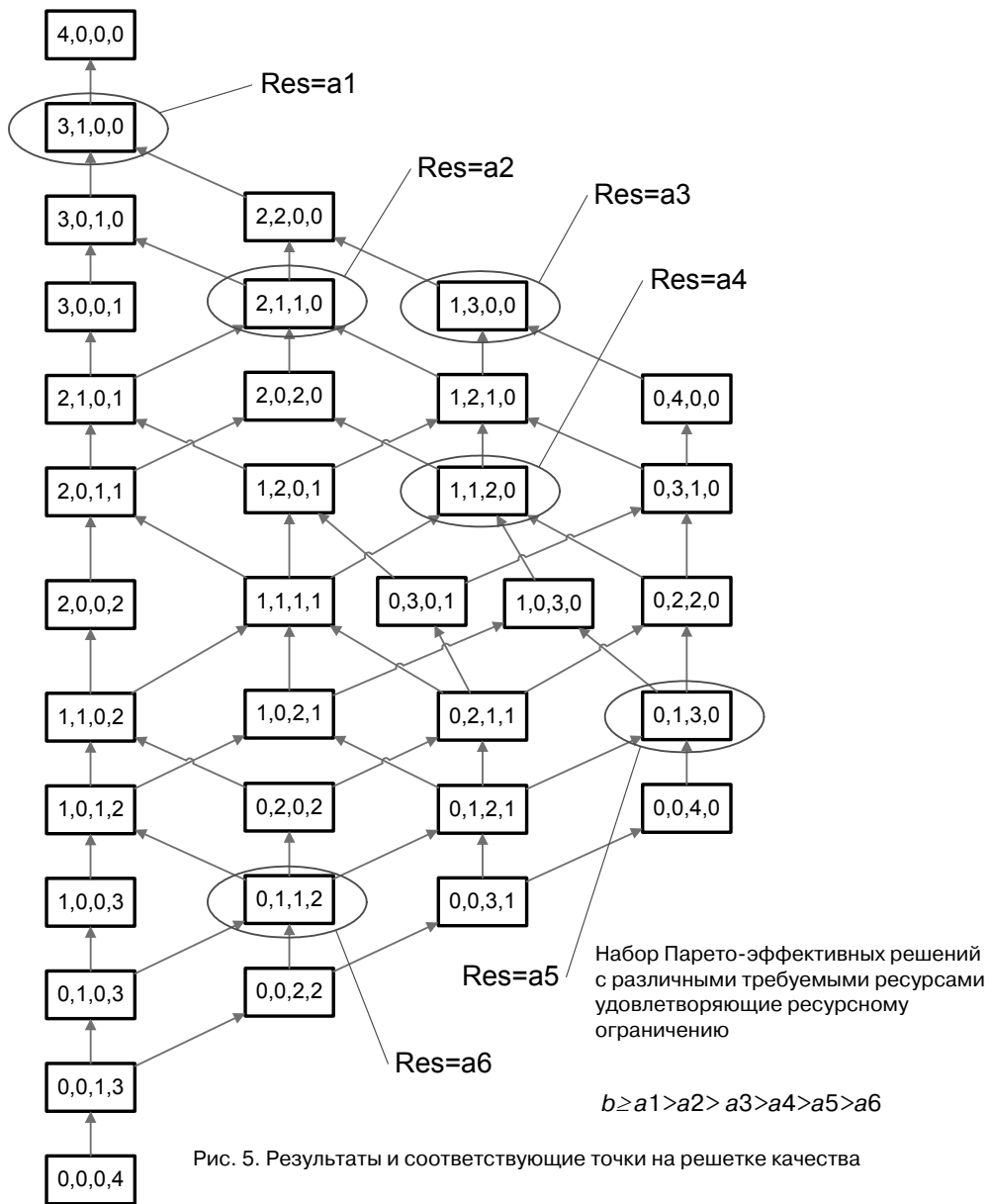


Рис. 5. Результаты и соответствующие точки на решетке качества

Их оценки очень слабо отличаются, разница в ценах – также невелика. Таким образом, можно сказать, что реализуемый вариант почти совпадает с наилучшим. Для второго варианта имеется существенное отличие выбранного набора от наилучшего (полученного при полном перепроектировании). Следовательно, можно сделать вывод о том, что такой вариант улучшения не очень эффективен и расходование дополнительных средств не дает ожидаемого выигрыша в качестве.

## Заключение

В работе предложены комбинаторные схемы проектирования и перепроектирования конфигурации оборудования в коммуникационной сети. При этом используются задача многокритериального ранжирования и многокритериальной блочной задачи о рюкзаке. Для последней задачи рассмотрены алгоритмические схемы для решения: (i) схема динамического программирования, (ii) эвристика («жадный» алгоритм и (iii) приближенная схема, включая

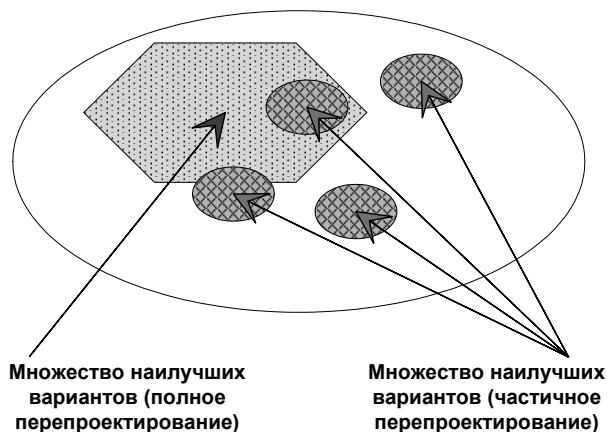


Рис. 6. Иллюстрация для гибридного подхода

«решетку качества» составных решений. В качестве перспективных исследований можно указать следующие направления:

1. Модификация алгоритмических схем для случая нескольких ресурсных ограничений.
2. Использование нечетких множеств для оценки параметров задачи.
3. Проведение дополнительного анализа критериев оценивания оборудования.
4. Дальнейшее исследование алгоритмических схем для многокритериальной блочной задачи о рюкзаке, в частности, проведение сравнительных численных экспериментов.
5. Рассмотрение многостадийного варианта задачи проектирования / перепроектирования оборудования.
6. Учет оценок совместимости компонентов оборудования в постановке задачи.
7. Использование предложенных подходов в проектировании сетевых систем других типов (например, электрических сетей).

## Литература

1. В.К. Батоврин, М.Ш. Левин. Использование метода морфологического проектирования в открытых информационных системах. Информационные технологии и вычислительные системы, 4, 47-57, 2005.
2. B. Benatallah, Q.Z. Sheng, M. Dumas, The self-serv environment for web services composition, IEEE Internet Computing, 7(6), 40-48, 2003.
3. Blomqvist, E., Levashova, T., Öhgren, A., Sandkuhl, K., Smirnov, A., Tarassov V. Configuration of dynamic SME supply chains based on ontologies. In: Marik, V., Brennan R.W., Pechoucek M. (eds.) Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. LNAI 3593, Springer, 246-256, 2005.
4. C. Chandra, J. Grabis, Supply Chain Configuration: Concepts, Solutions, and Applications. Springer, 2007.
5. M.R. Garey and D.S. Johnson. Computers and Intractability. The Guide to the Theory of NP-Completeness. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979.
6. L. Hotz, K. Wolter, T. Krebs, Configuration in Industrial Product Families, IOS Press, 2006.
7. O.H. Ibarra, C.E. Kim. Fast approximation algorithms for the knapsack and sum of subset problems. J. of ACM, 22, 463-468, 1975.
8. K. Klamroth, M. Wiecek, Dynamic programming approaches to the multiple criteria knapsack problem. Naval Research Logistics, 47, 57-76, 2000.
9. H. Keller, U. Pferschy, D. Pisinger, Knapsack Problems, Springer, Berlin, 2004.
10. N. A. Kuznetsov, M.Sh. Levin, V. M. Vishnevsky. Some combinatorial optimization schemes for multi-layer network topology. IMACS 2005, Paris, July 2005.
11. М.Ш. Левин, Комбинаторные оптимизационные модели рюкзака. «Измерение, контроль, автоматизация», 4(68), 51-63, 1988.
12. М.Ш. Левин, Комбинаторное проектирование систем. Автоматизация проектирования, 4, 14-19, 1997.
13. M.Sh. Levin. Combinatorial Engineering of Decomposable Systems, Kluwer, Boston, 1998.
14. M.Sh. Levin, System synthesis: example for composite packaged software, IEEE Trans. on SMC - Part C, 35(4), 544-553, 2005.
15. M.Sh. Levin. Composite Systems Decisions, Springer, 2006.
16. L. Li, J. Garibaldi, N. Krasnogor, Automated self-assembly programming paradigm: initial investigation, Proc. of the Third IEEE Int. Workshop on Engineering of Autonomic and Autonomous Systems EASe2006, IEEE Press, 25-36, 2006.
17. T. Madhusudan, N. Uttamsingh, A declarative approach to composing web services in dynamic environments. Decision Support Systems, 41(2), 325-357, 2006.
18. S. Martello and P. Toth, Knapsack Problem: Algorithms and Computer Implementation. New York: J.Wiley & Sons, 1990.
19. M.G. Mehrabi, A.G. Ulsoy, Y. Koren, Reconfigurable manufacturing systems, J. of Intell. Manufact., 11(4), 403-419, 2000.
20. J. McDermott, R1: a rule-based configurator of computer systems. Artificial Intelligence, 19(2), 39-88, 1982.
21. P.K. McKeenly, S.M. Sadjadi, E.P. Kasten, B.H.C. Cheng, Composing adaptive software, IEEE Computer, 37(7), 56-64, 2004.
22. M.W. Murhammer, K.-K. Lee, P. Motallebi, P. Borghi, K. Wozabal, IP Network Design Guide, IBM RedBook, 1999.
23. H. Noltermeier, H.-C. Wirth, S.O. Krumke, Network design and improvement. ACM Computing Surveys, 32(3es), Article No. 2, Sept. 1999.
24. P.M. Pardalos, D. Du, (Eds.) Network Design: Connectivity and Facilities Location. AMS, Providence, 1998.
25. V. Poladian, J.P. Sousa, D. Garlan, B. Schmerl, M. Shaw, Task-based adaptation for ubiquitous computing, IEEE Trans. on SMC - Part C, 36(3), 328-340, 2006.
26. B. Roy. Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer, 1996.

27. А.В. Сафонов, М.Ш. Левин, Проектирование конфигураций сетевого оборудования. Доклады 6-й междунар. конф. по системам проектирования (CAD/CAM/PDM-2006), ИПУ РАН, 21-22, 2006.
28. А.В. Сафонов, М.Ш. Левин, О комбинаторном проектировании конфигураций оборудования в телекоммуникационной сети. Тезисы докладов 49-й научн. конф. МФТИ, 21-22, 2006.
29. S. Sahni. Approximate algorithms for the 0-1 knapsack problem. J. of ACM, 22, 115-124, 1975.
30. A.V. Smirnov, Manufacturing systems configuration management: technology for business process reengineering. Large Scale Systems: Theory & Applications: Proceedings of the 8th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium LSS'98. Patras, Greece, 518-521, 1998.
31. А.В. Смирнов, Л.Б. Шереметов. Конфигурирование сложных систем на основе технологии интеллектуальных агентов. Автоматика и вычислительная техника. 4, 18-29, 1998.
32. A. Smirnov, L. Sheremetov, N. Chilov, J.R. Cortes, Soft-computing technologies for configuration of cooperative supply chain. Applied Soft Computing, 4, 87-107, 2004.
33. Cisco Systems corp. official website <http://www.cisco.com/>
34. The MathWorks website <http://www.mathworks.com/>

**Левин Марк Шмуилович.** Родился в 1948 году. Окончил Московский электротехнический институт связи в 1970 году и мех.-мат. факультет МГУ в 1975. Кандидат технических наук, автор более 100 научных работ и трех монографий. Круг научных интересов: системный анализ, проектирование систем, комбинаторная оптимизация, многокритериальное принятие решений, инженерное образование. Проводил научные исследования в России, Японии, Израиле и Канаде. Старший научный сотрудник Института проблем передачи информации РАН и доцент МФТИ.

**Сафонов Александр Валерьевич.** Родился в 1985 году. Студент магистратуры Московского физико-технического института (государственного университета), автор 3 научных работ. Круг научных интересов: системный анализ, проектирование систем, коммуникационные системы, комбинаторная оптимизация, многокритериальное принятие решений.