

# Модульное проектирование и улучшение системы управления в умном доме с использованием интервальных оценок в виде мультимножеств

Марк Ш. Левин

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук  
Большой Каретный пер. 19, Москва 127994, Россия  
email: mslevin@acm.org*

Поступила в редколлегию 05.06.2012

**Аннотация**—В статье рассматривается модульное проектирование и улучшение / расширение системы управления в умном доме и системе автоматизированного здания (BAS). Процесс проектирования основан на методе Иерархического Морфологического Многокритериального Проектирования (ИММП): (а) построение древовидной модели системы, (б) генерация проектных вариантов (альтернатив) для всяких вершин модели системы, (в) процесс “снизу-вверх”: (i) выбор проектных вариантов для частей системы, (ii) композиция отобранных проектных вариантов в результирующую комбинацию. В работе используется метод ИММП с интервальными оценками в виде мультимножеств. Схема улучшения системы основана на следующем: (а) улучшение компонентов системы (стратегия 1), (б) расширение системы за счет дополнительной части (стратегия 2). Блочная задача о рюкзаке с интервальными оценками в виде мультимножеств используется в рамках процесса улучшения системы. Рассмотрены два базовых прикладных примера: (1) модульная система управления для умного дома, (2) модульная автоматизированная система для здания, состоящая из четырех частей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** умный дом, система автоматизации здания, система управления, модульное проектирование, комбинаторный синтез, улучшение, интервальная оценка, мультимножества

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматизации зданий (building design automation systems BASs) становятся все более и более популярны ([5],[6],[16],[23]). BAS обеспечивают управление аппаратурой здания (включая функции мониторинга, выявления неисправностей, уменьшения потребления энергии и др.) с учетом надежности и уменьшения стоимости технического обслуживания. В последние два десятилетия, многие усилия направлены на исследования в области умных домов (smart homes): (1) архитектура ([3],[5],[19],[25]); (2) проектирование ([1],[5]); (3) управление ([21],[26]); (4) динамика [20]; (5) радиосвязь [24]; (6) сенсоры [18]; (7) интеграция данных ([4],[26]). В данной статье рассматривается модульное проектирование и улучшение системы управления умного дома и автоматизированной системы управления зданием. Рис. 1 иллюстрирует структуру нашего исследования: (1) модульное проектирование как композиция конфигурации системы; (2) модульное улучшение системы: (i) улучшение частей/компонентов системы, (ii) улучшение совместимости компонентов системы, (iii) изменение архитектуры системы. Таким образом, рассматриваются две задачи модульного проектирования: (а) иерархический комбинаторный синтез, (б) улучшение системы (в частности, upgrade).

Комбинаторный синтез системы основан на методе Иерархического Морфологического Многокритериального Проектирования (ИММП) (иерархическая схема проектирования “снизу-вверх”) ([9],[10],[11],[13]): 1. построение древовидной модели системы (предварительная стадия); 2. генерация проектных вариантов (альтернатив) для висячих вершин модели системы; 3. отбор и композиция проектных вариантов в составные проектные варианты ПВ более высокого иерархического уровня (задача морфологической клики); 4. анализ и улучшение результирующих составных проектных вариантов для системы (результирующих решений). Упрощенная версия комбинаторного синтеза (без учета совместимости компонентов системы) соответствует задаче блочного рюкзака. В статье используются версии метода ИММП и задачи блочного рюкзака с интервальными оценками в виде мультимножеств [14].

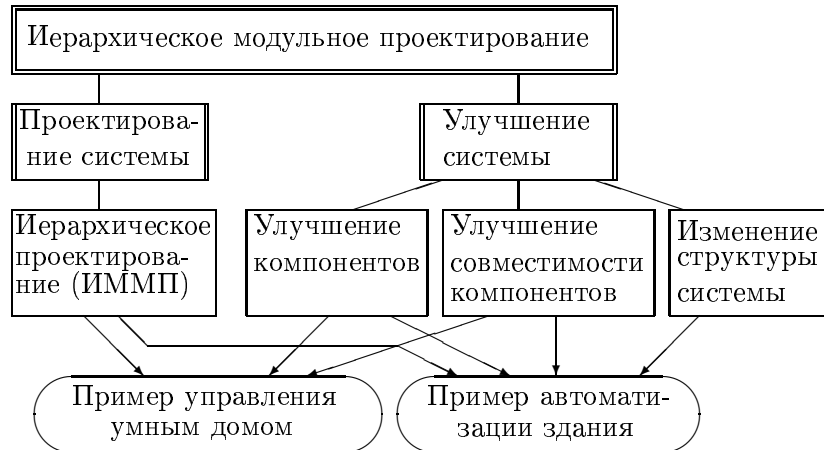


Рис. 1. Схема исследования

Следует отметить, что в последние годы существенно возросла важность вопросов перепроектирования систем (reengineering), т.е., процессы улучшения, трансформации, реконфигурации, расширения ([1],[9],[10],[12],[15],[22]). В данной работе рассматриваются две схемы улучшения ([9],[10],[12],[15],[17]): (1) стратегия улучшения узких мест как улучшение некоторого подмножества компонентов системы или совместимости между компонентами системы (стратегия 1); (2) расширение системы за счет добавления дополнительной подсистемы (стратегия 2).

В данной статье подробно исследованы два реальных прикладных примера: (а) модульная система управления для умного дома (Рис. 2, [16]), (б) модульная система автоматизации здания [17]. Структура системы автоматизации здания представлена на Рис. 3 (“SAC” соответствует “сенсору, актуатору, контроллеру” (“sensor, actuator, controller”) [23]). Рассматриваемый пример системы автоматизации здания включает четыре части: (1) IP/KNX Gateway, (2) IP/WSN 6LoWPAN Gateway, (3) ZigBee Wireless Sensor Network, (4) KNX Field Bus Infrastructure.

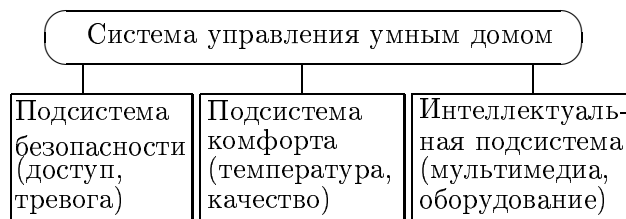


Рис. 2. Структура системы управления [16]

Примеры включают следующее: иерархическая (древовидная) структура системы, проектные варианты (альтернативы) ПВ для частей/компонентов системы, процесс решения. Экспертное оценивание использовано для оценки ПВ (интервальные оценки на основе мультимножеств (interval multiset estimates [14]). Отметим, все оценки и примеры вычислений имеют иллюстративный характер, но могут быть успешно использованы как основа для реальных приложений.

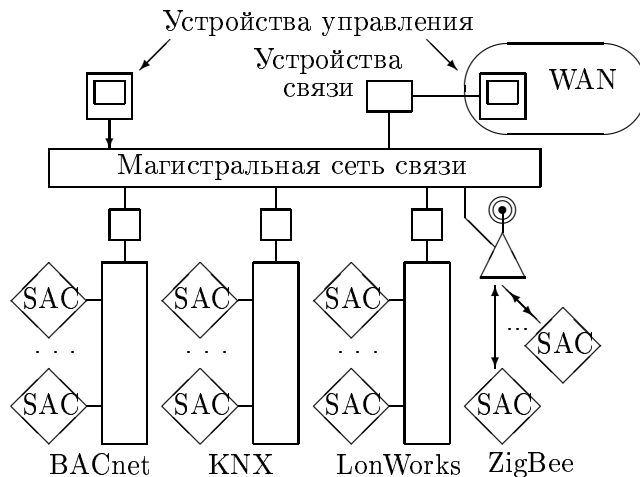


Рис. 3. Пример системы автоматизации здания [17]

Данная статья базируется на следующих предварительных публикациях: (а) проектирование системы управления для умного дома [16], (б) улучшение системы автоматизации здания [17], (в) интервальные оценки в виде мультимножеств и их использование в комбинаторном синтезе систем [14].

## 2. СИНТЕЗ С ИНТЕРВАЛЬНЫМИ ОЦЕНКАМИ В ВИДЕ МУЛЬТИМНОЖЕСТВ

### 2.1. Интервальные Оценки в Виде Мультимножеств

Интервальные оценки в виде мультимножеств были предложены в [14]. Данный подход заключается в назначении элементов  $(1, 2, 3, \dots)$  на уровне порядковой шкалы  $[1, 2, \dots, l]$ . 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 каждого объекта, альтернативы) заключается в выборе мультимножества над множеством  $\Omega$  с учетом двух условий:

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

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

Таким образом, оценка  $e$  для альтернативы  $A$  имеет вид:  $e(A) = (\eta_1, \dots, \eta_l, \dots, \eta_l)$ , где  $\eta_l$  - число элементов на уровне  $l$  ( $l = \overline{1, l}$ ), 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  $\eta$  с элементами из исходного конечного множества мощности  $l$ , называется “коэффициент мультимножества” ([8],[27]):  $\mu^{l,\eta} = \frac{l(l+1)(l+2)\dots(l+\eta-1)}{\eta!}$ . Это число соответствует числу возможных оценок (без условия 2). В случае выполнения условия 2 число оценок 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. Данная задача оценивания будет использована далее.

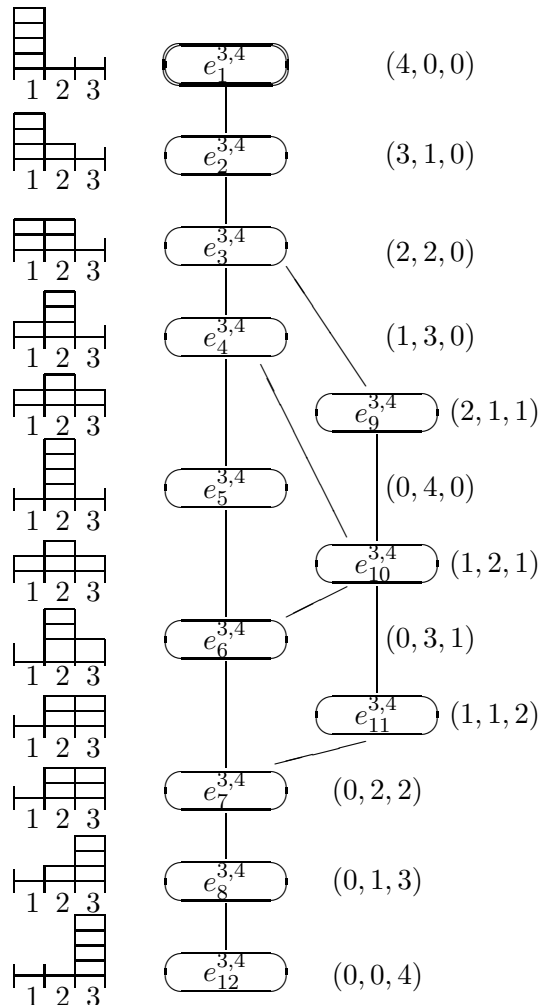


Рис. 4. Шкалы, оценки ( $P^{3,4}$ ) [14]

Дополнительно, следующие операции над введенными оценками в виде мультимножеств могут быть рассмотрены [14]: интеграция, близость (в виде вектора), агрегация, выравнивание. В данной работе будут использованы операции интеграции, агрегации и близости.

Интеграция оценок основана на суммировании по компонентам. Пусть имеется  $n$  оценок: оценка  $e^1 = (\eta_1^1, \dots, \eta_l^1, \dots, \eta_l^1), \dots$ , оценка  $e^\kappa = (\eta_1^\kappa, \dots, \eta_l^\kappa, \dots, \eta_l^\kappa), \dots$ , оценка  $e^n = (\eta_1^n, \dots, \eta_l^n, \dots, \eta_l^n)$ . Тогда интегрированная оценка имеет вид:  $e^I = (\eta_1^I, \dots, \eta_l^I, \dots, \eta_l^I)$ , где  $\eta_l^I = \sum_{\kappa=1}^n \eta_l^\kappa \quad \forall l = \overline{1, l}$ . Фактически, используется операция  $\uplus$ :  $e^I = e^1 \uplus \dots \uplus e^\kappa \uplus \dots \uplus e^n$ .

Теперь рассмотрим близость оценок для двух альтернатив  $A_1, A_2$  с соответствующими оценками  $e(A_1), e(A_2)$ . Близость определяется так:  $\delta(e(A_1), e(A_2)) = (\delta^-(A_1, A_2), \delta^+(A_1, A_2))$ , где компоненты вектора имеют вид (i)  $\delta^-$  - число одношаговых изменений элемента  $\iota + 1$  в элемент  $\iota$  ( $\iota = \overline{1, l-1}$ ) (это соответствует “улучшению”); (ii)  $\delta^+$  - число одношаговых изменений элемента  $\iota$  в элемент  $\iota + 1$  ( $\iota = \overline{1, l-1}$ ) (это соответствует “ухудшению”). Предполагается следующее:  $|\delta(e(A_1), e(A_2))| = |\delta^-(A_1, A_2)| + |\delta^+(A_1, A_2)|$ .

Теперь рассмотрим построение оценки-медианы (операция агрегации). Пусть имеется исходное множество оценок  $E = \{e_1, \dots, e_\kappa, \dots, e_n\}$ , пусть  $D$  - множество всех возможных оценок ( $E \subseteq D$ ). Тогда оценка-медиана имеет вид (два случая: “обобщенная медиана”  $M^g$  и “медиана множества”  $M^s$ ):

$$M^g = \arg \min_{M \in D} \sum_{\kappa=1}^n |\delta(M, e_\kappa)|; \quad M^s = \arg \min_{M \in E} \sum_{\kappa=1}^n |\delta(M, e_\kappa)|.$$

2.2. Морфологическое Проектирование с Интервальными Оценками в Виде Мультимножеств

Сначала приведем краткое описание для базовой версии комбинаторного синтеза на основе метода ИММП (с порядковыми шкалами для оценивания ПВ). Рассматриваемая система состоит из компонентов и их совместимости (IC). Предположения: (а) системы имеет древо-видную структуру; (б) оценка качества системы включает оценку качества входящих компонентов и оценку качества их совместимости IC; (в) критерии оценки системы и ее компонентов являются монотонными; (г) качество компонентов систем и IC оцениваются на основе скоординированных шкал. Введем обозначения: (1) проектный вариант (альтернатива) для компонента/части системы ПВ; (2) приоритет ПВ ( $\iota = \overline{1, l}$ ; 1 соответствует наилучшему качеству); (3) порядковая совместимость для каждой пары ПВ ( $w = \overline{1, \nu}$ ;  $\nu$  соответствует наилучшему качеству). Пусть система  $S$  состоит из  $m$  частей (компонентов):  $R(1), \dots, R(i), \dots, R(m)$ . Для каждой части генерируется множество ПВ. Задача имеет вид:

Найти составной проектный вариант для системы  $S = S(1) \star \dots \star S(i) \star \dots \star S(m)$  (один ПВ  $S(i)$  для каждой части  $R(i)$ ,  $i = \overline{1, m}$  с ненулевой совместимостью между отобранными ПВ).

При этом используется дискретное “пространство” качества системы (частично упорядоченное множество) на основе вектора:  $N(S) = (w(S); e(S))$ , где  $w(S)$  - наименьшее значение совместимости между парой компонентов (т.е.,  $\forall R_{j_1}$  and  $R_{j_2}$ ,  $1 \leq j_1 \neq j_2 \leq m$ ) в  $S$ ,  $e(S) = (\eta_1, \dots, \eta_l, \dots, \eta_l)$ , где  $\eta_l$  - число ПВ качества  $\iota$  в  $S$ . Теперь приведем формальную постановку задачи:

$$\begin{aligned} \max e(S), \quad \max w(S), \\ \text{s.t.} \quad w(S) \geq 1. \end{aligned}$$

В результате, ищется составное решение, которое недоминируемо по  $N(S)$  (т.е., Парето эффективное решение). “Максимизация”  $e(S)$  основана на использовании соответствующего частично упорядоченного множества. Приведенная комбинаторная задача относится к классу NP-сложных задач, поэтому используются переборные алгоритмы.

В данной статье комбинаторный синтез основан на использовании интервальных оценок в виде мультимножеств для оценивания ПВ. 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 входящих в решение компонентов. 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:

$$\begin{aligned} \max e(S) = M^g = \arg \min_{M \in D} \sum_{i=1}^m |\delta(M, e(S_i))|, \quad \max w(S), \\ \text{s.t.} \quad w(S) \geq 1. \end{aligned}$$

2.3. Задача Блочного Рюкзака с Интервальными Оценками в Виде Мультимножеств

Базовая задача блочного рюкзака имеет вид ([2], [7]):

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

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

При использовании оценок в виде мультимножеств для оценивания “полезности” элементов  $e_i, i \in \{1, \dots, i, \dots, m\}$  (вместо  $c_i$ ), следующая агрегированная оценка в виде мультимножества может рассматриваться в виде целевой функции (“максимизация”): (а) агрегированная оценка в виде мультимножества как “обобщенная медиана”, (б) агрегированная оценка в виде мультимножества как “медиана множества”, (в) интегрированная оценка в виде мультимножества.

Рассмотрим следующий вариант блочной задачи о рюкзаке:

(1) оценки в виде мультимножеств для “полезности” элементов  $e_{i,j}, i \in \{1, \dots, i, \dots, m\}, j = \overline{1, q_i}$  (вместо  $c_{ij}$ ),

(2) агрегированная оценка как “обобщенная медиана” (или “медиана множества”) используется как целевая функция (“максимизация”).

Пусть имеется исходное множество элементов:

$$\{(1, 1), (1, 2), \dots, (1, q_1), \dots, (i, 1), (i, 2), \dots, (i, q_i), \dots, (m, 1), (m, 2), \dots, (m, q_m)\}.$$

Булева переменная  $x_{i,j}$  соответствует выбору элемента  $(i, j)$ . Решение представляет собой подмножество исходного множества элементов:  $S = \{(i, j) | x_{i,j} = 1\}$ . Задача имеет вид:

$$\max e(S) = \max M = \arg \min_{M \in D} \sum_{(i,j) \in S = \{(i,j) | x_{i,j} = 1\}} |\delta(M, e_{i,j})|,$$

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

Очевидно, эта задача похожа на рассмотренную выше постановку, но без учета совместимости отобранных элементов.

### 3. ПРИМЕР ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УМНЫМ ДОМОМ

#### 3.1. Иерархическая Модель

Рассматривается следующая иерархическая структура системы управления умным домом (Рис. 5, из [16]; интервальные оценки в виде мультимножеств представлены в круглых скобках):

0. Система управления  $S = A \star B \star C$ .

1. Подсистема безопасности  $A = D \star E$ .

1.1. Управление доступом  $D = G \star H \star I$ .

1.1.1. Оконные ставни  $G$ : ручной режим  $G_1$ , электрический режим  $G_2$ .

1.1.2. Дверной замок  $H$ : типовой  $H_1$ , электрический  $H_2$ .

1.1.3. Точка идентификации  $I$ : ключ  $I_1$ , PIN-код  $I_2$ , RFID  $I_3$ , биометрический способ  $I_4$ .

1.2. Управление тревогами  $E = J \star K \star L$ .

1.2.1. Сигнал тревоги  $J$ : сирена  $J_1$ , свет  $J_2$ .

1.2.2. Детектор присутствия  $K$ : инфракрасные лучи  $K_1$ , ультразвук  $K_2$ , движение  $K_3$ .

1.2.3. Способ сигнализации  $L$ : городской телефон  $L_1$ , радио  $L_2$ , Интернет  $L_3$ , GSM/SMS  $L_4$ .

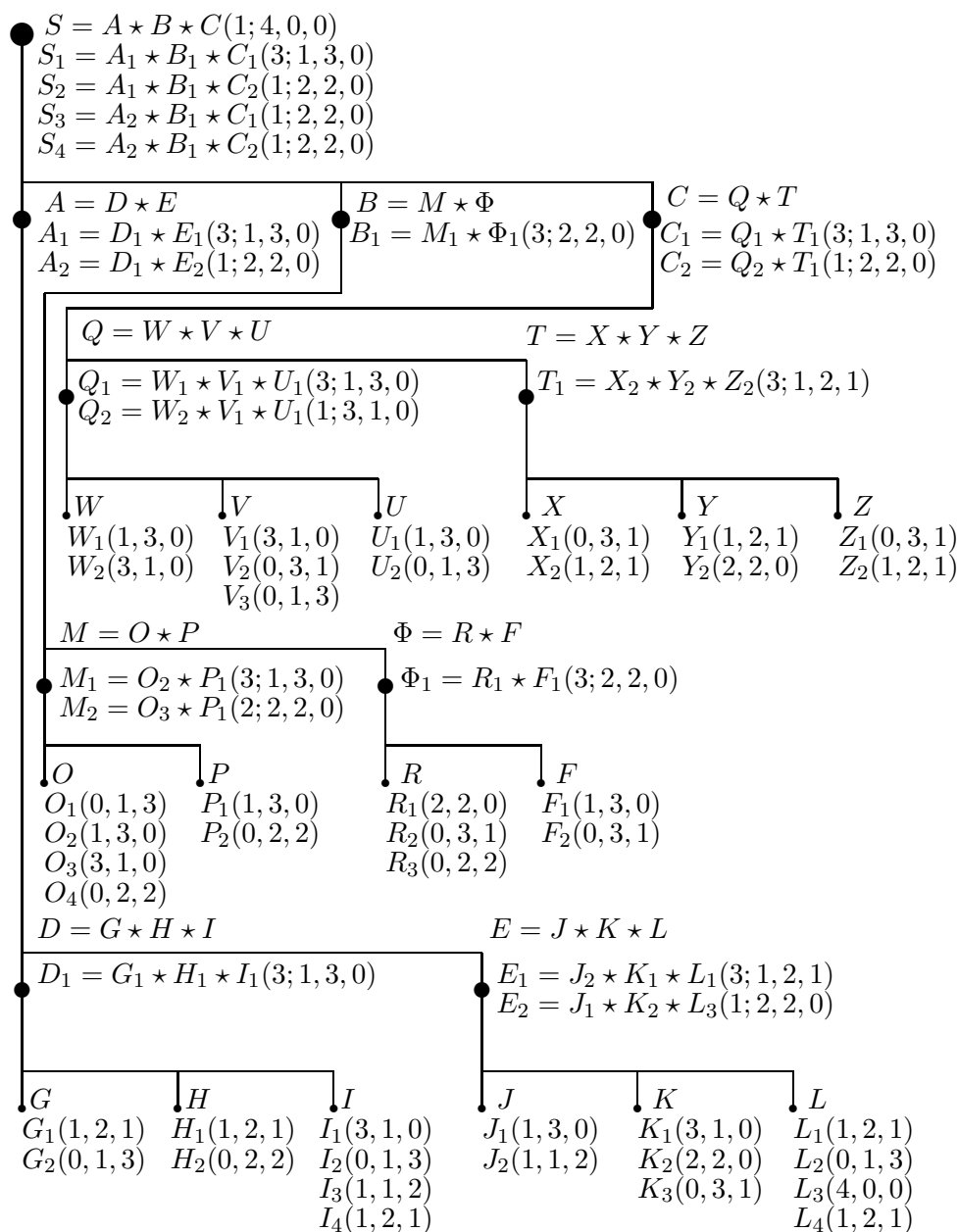


Рис. 5. Структура системы управления

**2. Подсистема комфорта**  $B = M \star N$ .

**2.1. Температура**  $M = O \star P$ .

**2.1.1. Подогрев**  $O$ : пол  $O_1$ , радиаторы  $O_2$ , потолок  $O_3$ , стена с подогревом  $O_4$ .

**2.1.2. Кондиционер**  $P$ : внешний  $P_1$ , внутренний  $P_2$ .

**2.2. Качество среды**  $N = R \star F$ .

**2.2.1. Вентиляция**  $R$ : по перекрытиям  $R_1$ , на рабочих местах  $R_2$ , центральная  $R_3$ .

**2.2.2. Фильтрация воздуха**  $F$ : локальная  $F_1$ , центральная  $F_2$ .

**3. Интеллектуальная подсистема**  $C = Q \star T$ .

**3.1. Мультимедиа**  $Q = W \star V \star U$ .

**3.1.1. Видесистема**  $W$ : монитор  $W_1$ , мультимедийный проектор  $W_2$ .

**3.1.2. Аудио-система**  $V$ : "2:1"  $V_1$ , "5:1"  $V_2$ , схема шумподавления Долби  $V_3$ .

3.1.3. Домашний сервер/ПК  $U$ : распределенный  $U_1$ , интегрированный  $U_2$ .

3.2. Домашнее оборудование  $T = X \star Y \star Z$ .

3.2.1. Духовой шкаф  $X$ : газовый  $X_1$ , электрический  $X_2$ .

3.2.2. Рефрижератор  $Y$ : с морозильником  $Y_1$ , с связью по Интернет  $Y_2$ .

3.2.3. Вакуумный очиститель  $Z$ : центральный  $Z_1$ , iLoc  $Z_2$ .

Использованные оценки в виде мультимножеств основаны на нескольких критериях (стоимость, потребление энергии, надежность, длительность жизненного цикла [16]). Оценки совместимости между ПВ представлены в Таблицах 1, 2, 3, 4, 5, 6 (порядковая шкала, экспертное оценивание, из [16]).

Таблица 1. Совместимость

	$H_1$	$H_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
$G_1$	3	3	3	2	1	1
$G_2$	3	3	3	3	3	3
$H_1$			3	1	1	1
$H_2$			1	3	3	3

Таблица 2. Совместимость

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
$J_1$	2	1	3	2	1	1	3
$J_2$	3	3	3	3	3	3	2
$K_1$				3	2	0	2
$K_2$				2	1	1	2
$K_3$				2	3	2	2

Таблица 3. Совместимость

	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$
$P_1$	3	3	2	1
$P_2$	2	3	1	2

Таблица 4. Совместимость

	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$F_1$	3	3	2
$F_2$	2	2	3

Таблица 5. Совместимость

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$U_1$	$U_2$
$W_1$	3	2	1	3	2
$W_2$	1	2	3	2	3
$V_1$				3	1
$V_2$				3	2
$V_3$				2	3

Таблица 6. Совместимость

	$Y_1$	$Y_2$	$Z_1$	$Z_2$
$X_1$	2	2	3	2
$X_2$	3	3	2	3
$Y_1$			3	2
$Y_2$			3	3

### 3.2. Составные Решения

Получены следующие Парето эффективные ПВ:

(1) для части  $A$  (Рис. 6 иллюстрирует качество  $E$ ):

$$D_1 = G_1 \star H_1 \star I_1, N(D_1) = (3; 1, 3, 0);$$

$$E_1 = J_2 \star K_1 \star L_1, N(E_1) = (3; 1, 2, 1); \quad E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3, N(E_2) = (1; 2, 2, 0);$$

$$A_1 = D_1 \star E_1 (3; 1, 3, 0), \quad A_2 = D_1 \star E_2 (1; 2, 2, 0).$$

(2) для части  $B$ :

$$\Phi_1 = R_1 \star F_1, N(\Phi_1) = (3; 2, 2, 0);$$

$$M_1 = O_2 \star P_1, N(M_1) = (3; 1, 3, 0); \quad M_2 = O_3 \star P_1, N(M_2) = (2; 2, 2, 0);$$

$$B_1 = \Phi_1 \star M_1 (3; 2, 2, 0).$$

(3) для части  $C$ :

$$Q_1 = W_1 \star V_1 \star U_1, N(Q_1) = (3; 1, 3, 0); \quad Q_2 = W_2 \star V_1 \star U_1, N(Q_2) = (1; 3, 1, 0);$$

$$T_1 = X_2 \star Y_2 \star Z_2, N(T_1) = (3; 1, 2, 1);$$

$$C_1 = Q_1 \star T_1 (3; 1, 3, 0), \quad C_2 = Q_2 \star T_1 (1; 2, 2, 0).$$

Таким образом, получены следующие четыре составные решения (как комбинации):

$$S_1 = A_1 \star B_1 \star C_1, \quad S_2 = A_1 \star B_1 \star C_2, \quad S_3 = A_2 \star B_1 \star C_1, \quad S_4 = A_2 \star B_1 \star C_2,$$

Следует заметить, что исходное множество комбинаций включает 1179648 возможных решений (т.е.,  $(2 \times 2 \times 4) \times (2 \times 3 \times 4) \times (4 \times 2) \times (3 \times 2) \times (2 \times 2 \times 2) \times (2 \times 2 \times 2)$ ).



3.3. Анализ и Улучшение Узких Мест

Таблица 7 содержит примеры улучшения: узкие места (по элементам, по совместимости между элементами) и операции улучшения для составных решений (для компонента  $E$ ).

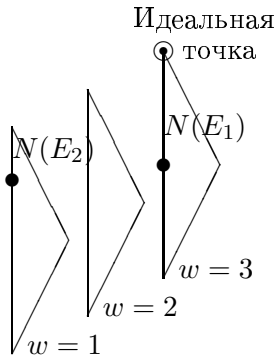


Рис. 6. Качество  $E$

Таблица 7. Узкие места, операции улучшения

Составые ПВ	Узкие места		Операции улучшения $w/r$
	ПВ	IC	
$E_1 = J_2 \star K_1 \star L_1$	$L_1$		$(1, 2, 1) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$E_1 = J_2 \star K_1 \star L_1$	$J_2$		$(1, 1, 2) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3$	$J_1$		$(1, 3, 0) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3$	$K_1$		$(3, 1, 0) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3$		$(J_1, L_3)$	$1 \Rightarrow 3$
$E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3$		$(J_1, K_2)$	$1 \Rightarrow 3$
$E_2 = J_1 \star K_2 \star L_3$		$(K_2, L_3)$	$1 \Rightarrow 3$

4. ПРИМЕР ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗДАНИЯ

4.1. Структура Системы и Проектирование

В качестве примера рассматривается следующая иерархическая структура (Рис. 7, из [17]; интервальные оценки в виде мультимножеств представлены в круглых скобках):

Система. Пример системы автоматизации здания  $S = G \star Q \star T \star I$ .

Подсистема 1. IP/KNX Gateway  $G$ : Gira HS3  $G_1$ , EibPort  $G_2$ , EibPC  $G_3$ .

Подсистема 2. IP/WSN 6LoWPAN Gateway  $Q$ : Sensinode Nanorouter  $Q_1$ , Jennic Border-Router  $Q_2$ , Arch Rock PhyNet Router  $Q_3$ , Crossbow Ethernet Gateway (MIB600)  $Q_4$ .

Подсистема 3. ZigBee Wireless Sensor Network  $T$ : TI  $T_1$ , Ember  $T_2$ , Jennic  $T_3$ , Freescale  $T_4$ , Microchip  $T_5$ .

Подсистема 4. KNX Field Bus Infrastructure  $I$ : ABB  $I_1$ , Siemens  $I_2$ , SCHNEIDER Electric  $I_3$ , BOSCH  $I_4$ .

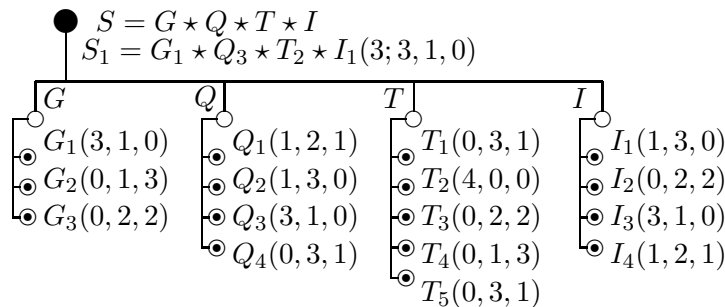


Рис. 7. Иерархическая структура системы

Использованные оценки в виде мультимножеств основаны на нескольких критериях (надежность, производительность, масштабируемость, техническое обслуживание, стоимость [17]). Оценки совместимости между ПВ представлены в Таблице 8 (порядковая шкала, экспертное оценивание, из [17]). Получены следующие Парето эффективные составные ПВ:  $S_1 = G_1 \star Q_3 \star T_2 \star I_1$ ,  $N(S_1) = (3; 3, 1, 0)$ . Рис. 8 иллюстрирует качество указанного результирующего ПВ.

Таблица 8. Совместимость

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
$G_1$	3	3	3	3	2	3	3	3	2	3	3	2	3
$G_2$	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	2	2	3
$G_3$	2	2	3	3	3	3	2	2	3	3	2	2	3
$Q_1$					2	3	3	2	2	3	2	2	3
$Q_2$					2	3	3	2	2	3	2	2	3
$Q_3$					2	3	3	2	2	3	3	2	3
$Q_4$					2	3	3	2	2	3	2	2	3
$T_1$										3	2	2	3
$T_2$										3	3	2	3
$T_3$										3	2	2	3
$T_4$										3	2	2	3
$T_5$										3	2	2	3

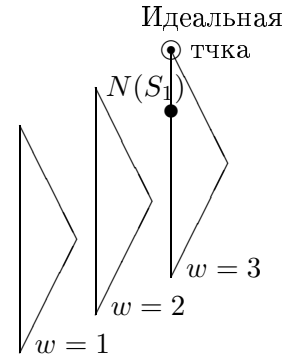


Рис. 8. Качество  $S$

4.2. Расширение Системы

Расширение системы реализуется как добавление пятой подсистемы HomeServer SW  $H$ : Domovea SW  $H_1$ , Eisbaer SW  $H_2$ , Misterhouse SW  $H_3$ , and Eibd-linKNX-KNXweb  $H_4$ . Расширенная структура системы представлена на Рис. 9. Таблица 9 содержит оценки совместимости (порядковая шкала, экспертное оценивание, из [17]).

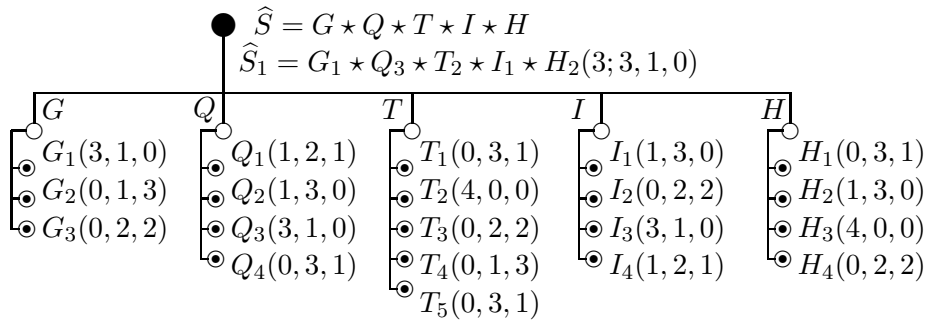


Рис. 9. Расширенная иерархическая структура системы

Таблица 9. Совместимость

	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$
$H_1$	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$H_2$	3	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	3	3	1	2
$H_3$	3	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	1	2	1	1	1
$H_4$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

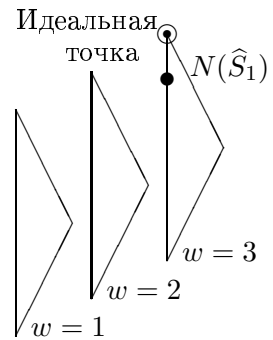


Рис. 10. Качество  $\hat{S}$

Получено следующее результирующее Парето эффективное составное решение:

$$\hat{S}_1 = G_1 * Q_3 * T_2 * I_2 * H_2, N(\hat{S}_1) = (3; 3, 1, 0).$$

Рис. 10 иллюстрирует полученное составное ПВ. Заметим, решение  $\hat{S}_1$  является расширением составного ПВ  $S_1$  (стратегия 2).

4.3. Улучшение Частей Системы

Улучшение Компонентов

Таблица 10 иллюстрирует процесс улучшения на основе компонентов решения (Рис. 7):  $S_1$ .

Таблица 10. Узкие места и операции улучшения

Составные ПВ	Узкие места		Операции улучшения $w/r$
	ПВ	IC	
$S_1 = G_1 \star Q_3 \star T_2 \star I_1$	$G_1$		$(3, 1, 0) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$S_1 = G_1 \star Q_3 \star T_2 \star I_1$	$Q_3$		$(3, 1, 0) \Rightarrow (4, 0, 0)$
$S_1 = G_1 \star Q_3 \star T_2 \star I_1$	$I_1$		$(1, 3, 0) \Rightarrow (4, 0, 0)$

Улучшение на Основе Задачи Блочного Рюкзака

Улучшение системы может быть реализовано как улучшение (upgrade) системных компонентов с учетом общего бюджетного ограничения. Такой подход основан на задаче блочного рюкзака. Здесь рассматривается исходное решения, включающее пять компонентов:  $\bar{S} = G_2 \star Q_1 \star T_4 \star I_2 \star H_1$  (Рис. 11). Соответствующая задача блочного рюкзака имеет вид:

$$\max e(S) = \max M = \arg \min_{M \in D} \sum_{(i,j) \in S = \{(i,j) | x_{i,j}=1\}} |\delta(M, e_{i,j})|,$$

$$s.t. \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{q_i} a_{ij} x_{ij} \leq b, \sum_{j=1}^{q_i} x_{ij} = 1, i = \overline{1,5}; \quad x_{ij} \in \{0, 1\}.$$

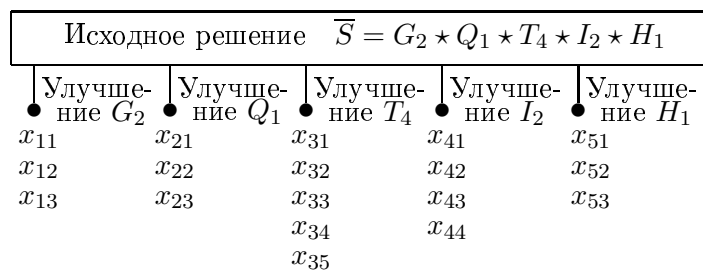


Рис. 11. Улучшение на основе задачи блочного рюкзака

Таблица 11 содержит бинарные переменные ( $x_{ij}$ ), операции улучшения и их оценки (иллюстративные, экспертное оценивание). Приведем два примера решений:

- (1)  $b = 14$ :  $x_{32} = 1 (T_4 \rightarrow T_3)$ ,  $\bar{S} \Rightarrow \tilde{S}_1 = G_2 \star Q_1 \star T_3 \star I_2 \star H_1$ ,  $e(\tilde{S}_1) = (0, 2, 2)$ ;
- (2)  $b = 73$ :  $x_{13} = 1 (G_2 \rightarrow G_3)$ ,  $x_{22} = 1 (Q_1 \rightarrow Q_2)$ ,  $x_{33} = 1 (T_4 \rightarrow T_1)$ ,  $x_{32} = 1 (I_2 \rightarrow I_4)$ ,  $x_{52} = 1 (H_1 \rightarrow H_2)$ ,  $\bar{S} \Rightarrow \tilde{S}_2 = G_3 \star Q_2 \star T_1 \star I_4 \star H_2$ ,  $e(\tilde{S}_2) = (1, 2, 1)$ .

Таблица 11. Оценки

Операции улучшения	Оценка $e_{ij}$	Цена ( $a_{ij}$ )
$x_{11}$ (none)	(0, 1, 3)	0
$x_{12}$ ( $G_2 \rightarrow G_1$ )	(3, 1, 0)	26
$x_{13}$ ( $G_2 \rightarrow G_3$ )	(0, 2, 2)	16
$x_{21}$ (none)	(1, 2, 1)	0
$x_{22}$ ( $Q_1 \rightarrow Q_2$ )	(1, 3, 0)	16
$x_{23}$ ( $Q_1 \rightarrow Q_3$ )	(3, 1, 0)	20
$x_{31}$ (none)	(0, 3, 1)	0
$x_{32}$ ( $T_4 \rightarrow T_1$ )	(0, 3, 1)	17
$x_{33}$ ( $T_4 \rightarrow T_2$ )	(4, 0, 0)	28
$x_{32}$ ( $T_4 \rightarrow T_3$ )	(0, 2, 2)	14
$x_{33}$ ( $T_4 \rightarrow T_5$ )	(0, 3, 1)	17
$x_{41}$ (none)	(0, 2, 2)	0
$x_{42}$ ( $I_2 \rightarrow I_1$ )	(1, 3, 0)	23
$x_{43}$ ( $I_2 \rightarrow I_3$ )	(3, 1, 0)	27
$x_{44}$ ( $I_2 \rightarrow I_4$ )	(1, 2, 1)	20
$x_{51}$ (none)	(0, 3, 1)	0
$x_{52}$ ( $H_1 \rightarrow H_2$ )	(1, 3, 0)	21
$x_{53}$ ( $H_1 \rightarrow H_3$ )	(4, 0, 0)	31

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены схемы модульного проектирования и улучшения/расширения, включая примеры для двух прикладных систем: управление умным домом, система автоматизации здания. Используются две задачи комбинаторной оптимизации (морфологическая клика, задача блочного рюкзака). Данные оптимизационные модели базируются на интервальных оценках в виде мультимножеств, предложенных впервые автором в [14]. Полученные численные решения, в основном, близки к решениям, полученным на основе проектных схем с использованием порядковых оценок ([16],[17]). Следует отметить, что представляется целесообразным применять более сложные шкалы на основе задач оценивания, например:  $P^{3,5}$ ,  $P^{4,5}$ . Можно указать следующие направления для исследований в будущем: 1. построение траекторий улучшений системы; 2. анализ рассмотренных задач проектирования в режиме on-line; 3. рассмотрение других прикладных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balasubramaian K., Cellatoglu A., Improvements in home automation strategies for designing apparatus for efficient smart home. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2008, vol. 54, no. 4, pp. 1681–1687.
2. Garey M.R., Johnson D.S., *Computers and intractability. The Guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1979.
3. Harper R., (Ed.), *Inside the smart home*. London: Springer, 2003.
4. Hong X., Nugent C., Mulvenna M., McClean S., Scotney B., Devlin S., Evidential fusion of sensor data for activity recognition in smart homes. *Pervasive and Mobile Computing*, 2009, vol. 5, no. 3, pp. 236–252.
5. Intille S.S., Designing a home of the future. *IEEE Pervasive Computing*, 2002, vol. 1, no. 2, pp. 80–86.
6. Kastner W., Neuschwindtner G., Soucek S., Newman H.M., Communication systems for building automation and control. *Proc. of the IEEE*, 2005, vol. 93, no. 6, pp. 1178–1203.

7. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D., *Knapsack problems*, Berlin: Springer, 2004.
8. Knuth D.E., *The Art of Computer Programming. Vol. 2, Seminumerical Algorithms*. Addison Wesley, Reading, 1998.
9. Levin M.Sh., *Combinatorial Engineering of Decomposable Systems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.
10. Levin M.Sh., *Composite Systems Decisions*. New York: Springer, 2006.
11. Levin M.Sh., Combinatorial optimization in system configuration design, *Autom. & Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 3, pp. 519–561.
12. Levin M.Sh., Towards communication network development (structural system issues, combinatorial models). In: *2010 IEEE Region 8 Int. Conf. "SIBIRCON-2010"*, Irkutsk, vol. 1, 204–208, 2010.
13. 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]
14. Levin M.Sh., Multiset estimates and combinatorial synthesis. Electronic preprint. 30 pp., May 9, 2012. <http://arxiv.org/abs/1205.2046> [cs.SY]
15. Levin M.Sh., Safonov A.V., Towards improvement of regional telecommunications network. *J. of Communications Technology and Electronics*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 770–778.
16. Levin M.Sh., Andrushevich A., Klapproth A., Composition of management system for smart homes. *Information Processes*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 78–86. <http://www.jip.ru/2010/78-86-2010.pdf>
17. Levin M.Sh., Andrushevich A., Klapproth A., Improvement of building automation system. In: Mehrotra K.G. et al. (Eds.) *Proc. of 24th Int. Conf. IEA/AIE 2011*, LNCS 6704, Part II, Springer, pp. 459–468, 2011.
18. Oh H., Chae K., An energy-efficient sensor routing with low latency, stability for smart home network. *Int. J. of Smart Home*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 71–82.
19. Para J., Hossain M.A., Uribarren A., Jacob E., Saddik A.E., Flexible smart home architecture using device profile for web services: a peer-to-peer approach. *Int. J. of Smart Home*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 39–56.
20. Peine A., Understanding the dynamics of technological configurations: A conceptual framework and the case of smart home. *Technological Forecasting and Social Change*, 2009, vol. 76, no. 3, pp. 396–409.
21. Rashidi P., Cook D.J., Keeping the resident in the loop: Adapting the smart home to the user. *IEEE Trans. SMC, Part A*, 2009, vol. 39, no. 5, pp. 949–959.
22. Rouse W.B., A theory of enterprise transformation. *Systems Engineering*, 2005, vol. 8, no. 4, pp. 279–295.
23. Schein J., An information model for building automation systems. *Automation in Construction*, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 125–139.
24. Song G., Ding F., Zang W., Song A., A wireless power outlet system for smart homes. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2008, vol. 54, no. 4, pp. 1688–1691.
25. Valtchev D., Frankov I., Service gateway architecture for a smart home. *IEEE Communication Magazine*, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 126–132.
26. Wang Y.-H., Yang L., Smart home information: A framework for integration and management. *Measurement and Control*, 2008, vol. 41, no. 10, pp. 300–304.
27. Yager R.R., On the theory of bags. *Int. J. of General Systems*, 1986, vol. 13, no. 1, pp. 23–37.

## Modular Design and Improvement of Management in Smart Homes with Interval Multiset Estimates

Levin M.Sh.

The paper addresses modular system design and system improvement/extension for management system in smart home and building automation system (BAS). The design solving process is based on Hierarchical Morphological Multicriteria Design (HMMD) approach: (a) design of a tree-like system model, (b) generation of design alternatives for leaf nodes of the system model, (c) Bottom-Up process: (i) selection of design alternatives for system parts/components and (ii) composing the selected alternatives into a resultant combination. Here HMMD approach with interval multiset estimates for design alternatives is used. The system improvement design schemes are based on the following: (a) upgrade of system components (strategy 1), (b) extension by adding an additional part (strategy 2). Multiple choice problem with interval multiset estimates for improvement operations is used for system improvement process. Two basic applied illustrative numerical examples are considered: (1) modular management system for smart home and (2) modular building automation system consisting of four parts.

**KEYWORDS:** smart home, building automation system, management system, modular design, combinatorial synthesis, improvement, interval estimates, multisets