

# МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД КОМБИНАТОРНОГО СИНТЕЗА МАГИСТРАЛЬНО-МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОАСПЕКТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Г.В. Верхова<sup>1</sup>, Х.М. Кходер<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\*Адрес для переписки: h.khoder@list.ru

## Информация о статье

УДК 004.942, 004.896, 519.85

Статья поступила в редакцию 29.07.2019

**Ссылка для цитирования:** Верхова Г.В., Кходер Х.М. Морфологический метод комбинаторного синтеза магистрально-модульных систем на основе многоаспектных моделей // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 88–98. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-88-98

**Аннотация:** В данной статье представлен разработанный авторами морфологический метод комбинаторного синтеза магистрально-модульных систем, который может быть использован в автоматизированных системах комплексирования электронных средств и телекоммуникационных систем. Изложены полученные авторами оригинальные результаты в области математической постановки задачи синтеза магистрально-модульных систем. Показано, что существующие математические модели не могут быть использованы для эффективного решения задачи синтеза данного класса систем. Предложены оригинальные многоаспектные модели магистрально-модульных систем, учитывающие различные виды совместимостей модулей, из которых синтезируется система. Приведены результаты разработки комплексных и квалитетрических моделей магистрально-модульных систем, а также оригинальные алгоритмы автоматической генерации целевых функций по заданным технико-экономическим требованиям и алгоритмы автоматической фильтрации и ранжирования морфологического множества модулей.

**Ключевые слова:** магистрально-модульные системы, комбинаторный метод синтеза, многоаспектное моделирование, комплексная модель, параметрическая модель, квалитетрическая модель, многокритериальная оптимизация, структурно-параметрический синтез.

## I. Введение

Магистрально-модульные системы (ММС) представляют собой многокомпонентные иерархические структуры со сложными взаимосвязями составляющих модулей [1, 2]. В процессе комплексирования ММС возникают задачи, в которых используется несколько критериев, которые отражают различные аспекты системы (функциональные, конструктивные, технологические и т. д.).

В настоящий момент времени универсальные автоматизированные системы комплексирования ММС отсутствуют, так как для их реализации требуется особый класс моделей, в которых можно учесть различные виды совместимости отдельных компонентов. Существующие системы автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств ориентированы на синтез отдельных модулей, но для решения этих задач ММС, состоящих из отдельных законченных модулей, они не подходят. Несмотря на актуальность решения задачи автоматизации синтеза ММС, теорети-

ческие разработки в данной области отсутствуют. В существующих работах изложены результаты исследований в области общей методологии ММС относительно уровней разукрупнения (рисунок 1) и методов формирования параметрических рядом унифицированных модулей, базовых несущих конструкций, способов достижения различных видов совместимости [2–7], однако отсутствуют работы, в которых исследуются модели, отражающие особенности ММС, которые необходимы для автоматизации их синтеза.

Учитывая актуальность автоматизации комплексирования ММС и отсутствие публикаций, содержащих результаты исследований в данной области, в предлагаемой статье представлен созданный авторским коллективом морфологический метод комбинаторного синтеза ММС на основе многоаспектных моделей. Данный метод может быть положен в основу перспективных САПР магистрально-модульных систем, которые могут применяться при проектировании радиоэлектронных комплексов и систем телекоммуникации.



Рис. 1. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств по конструктивной и функциональной сложности

## II. Математическая постановка задачи синтеза ММС

Задача комплексирования ММС может быть решена с помощью предлагаемого авторами морфологического метода комбинаторного синтеза, базирующегося на многоаспектных моделях. Предполагается поиск решения на морфологическом множестве и требует наличия 1) универсальной математической модели, 2) целевой функции и 3) алгоритма синтеза.

Выполним математическую постановку задачи морфологического синтеза ММС. Однозначное описание структуры системы и параметров модулей, из которых она состоит, будем называть спецификацией системы ( $S$ ), которая может быть представлена тройкой:

$$S = \langle M, R, X \rangle, \quad (1)$$

где  $M$  – множество модулей (подсистем), из которых состоит система;  $R$  – множество связей между  $M$ ;  $X$  – множество параметров.

Если число модулей в системе равно  $n$ , тогда:

$$M = \bigcup_{i=1}^n M_i = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}. \quad (2)$$

Отдельный модуль  $M_i$ , входящий в ММС, может иметь несколько параметров. Число параметров, описывающих  $M_i$ , обозначим  $k(i)$ . Множество параметров всей системы получается путем суммирования числа параметров всех модулей, входящих в систему. В теории оптимального синтеза  $X$  называют вектором рабочих параметров:

$$X = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^{k(i)} X_{i,j}. \quad (3)$$

Множество технико-экономических характеристик (ТЭХ), которые полностью определяют все существенные свойства синтезируемой системы, может быть представлено в следующем порядке:

$$\text{ТЭХ} = F_{Eval}(S) = F_{Eval}(\langle M, R, X \rangle), \quad (4)$$

где  $Eval$  – правила вычисления ТЭХ по (1).

Выражение (4) определяет возможность создания функций, позволяющих вычислять отдельные технико-экономические характеристики системы, отражающие различные аспекты (функциональные, конструктивные, экономические и т. д.):

$$\begin{aligned} \text{ТЭХ}_1 &= F_{Eval1}(S); \\ \text{ТЭХ}_2 &= F_{Eval2}(S); \dots; \text{ТЭХ}_n = F_{Evaln}(S). \end{aligned} \quad (5)$$

При структурно-параметрическом синтезе ММС поиск решения выполняется как в структурном, так и в параметрическом пространстве, следовательно, необходимо моделировать не отдельно взятый проектируемый модуль, а весь класс, для чего необходим специальный вид моделей. Структурное пространство в морфологических методах синтеза называется морфологическим множеством, следовательно, элементы, представляющие данное множество, назовем моделями морфологического множества.

Класс, представляющий собой совокупность всех модулей, выделенных по определенному признаку, назовем универсальным множеством модулей некоторого класса. Тогда множество всех спецификаций модулей, принадлежащих данному классу, которые являются структурно-параметрическими решениями, будет иметь следующий вид:

$$S^u = \langle M^u, R^u, X^u \rangle, \quad (6)$$

где  $M^u$  – множество всех возможных модулей, из которых состоят все возможные структурные решения систем, принадлежащих данному классу;  $R^u$  – множество всех возможных связей между  $M^u$ ,

образующих  $S^u$ ;  $X^u$  – множество всех возможных параметров (номиналов) модулей;  $TЭX^u$  – множество технико-экономических характеристик систем рассматриваемого класса.

Для каждой отдельно взятой ММС, всегда справедливо следующие утверждение:

$$\begin{aligned} M \in M^u; R \in R^u; X \in X^u; \\ TЭX \in TЭX^u; S \in S^u. \end{aligned} \quad (7)$$

Обобщением для случая иерархических модульных систем будет:

$$\begin{aligned} S^u &= \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^{m(i)} S_j^{u(i)}; \\ S_j^{u(i)} &= \langle M_j^{u(i)}, R_j^{u(i)}, X_j^{u(i)} \rangle; \\ S_j^{(i)} &= \langle M_j^{(i)}, R_j^{(i)}, X_j^{(i)} \rangle; \\ S_j^{(i)} &\in S_j^{u(i)}; \\ M_j^{(i)} &\in S_j^{u(i-1)}, i = \overline{2, n}; \\ X_j^{(i)} &\in TЭX_j^{u(i-1)}, i = \overline{2, n}; \end{aligned} \quad (8)$$

где  $n$  – число уровней иерархии;  $i$  – иерархический уровень модуля (подсистемы);  $m(i)$  – число модулей (подсистем) на  $i$ -ом иерархическом уровне.

Выражения  $M_j^{(i)} \in S_j^{u(i-1)}$  и  $X_j^{(i)} \in TЭX_j^{u(i-1)}, i = \overline{2, n}$  отражают тот факт, что каждый модуль, за исключением самого нижнего уровня иерархии, может быть представлен в виде реализации технического решения из множества возможных альтернатив (морфологического множества), а рабочие

параметры такого модуля являются его технико-экономическими характеристиками (рисунок 2).

Обычно иерархические уровни соответствуют уровням разукрупнения ММС (рисунок 1).

Запишем задачу квазиоптимального синтеза ММС, решаемую с помощью морфологического метода комбинаторного синтеза:

$$S^{*(K)} = Opt(S, K), \quad (9)$$

где  $Opt(S, K)$  – оператор оптимизации системы  $S$  по критерию (критериям)  $K$ ,  $S^{*(K)}$  – система оптимальная по  $K$ .

Наиболее адекватным способом синтеза реальных ММС является выбор решения на множестве Парето. Согласно источнику [8], возможна аппроксимация множества Парето путем многократного решения оптимизационных (экстремальных) задач [8–10], с особым образом свернутыми отдельными критериями в единый интегральный критерий.

Сведем процедуру синтеза ММС, выполняемой с помощью морфологических комбинаторных методов, к экстремальной задаче (рисунок 3):

$$\begin{aligned} S^* &= ArgOpt F(\alpha_1 K_1(S), \alpha_2 K_2(S), \dots, \alpha_n K_n(S)); \\ K_i &= F(TЭX_i), i \in \overline{1, n}; TЭX_i = F_{Evali}(S), i \in \overline{1, n}; \\ S &= \langle M, R, X \rangle; \\ S &\in S^u; S^u = \langle M^u, R^u, X^u \rangle; M \in M^{TЭT}; \\ R &\in R^{TЭT}; X \in X^{TЭT}; \\ TЭX &\in TЭX^{TЭT}. \end{aligned} \quad (10)$$

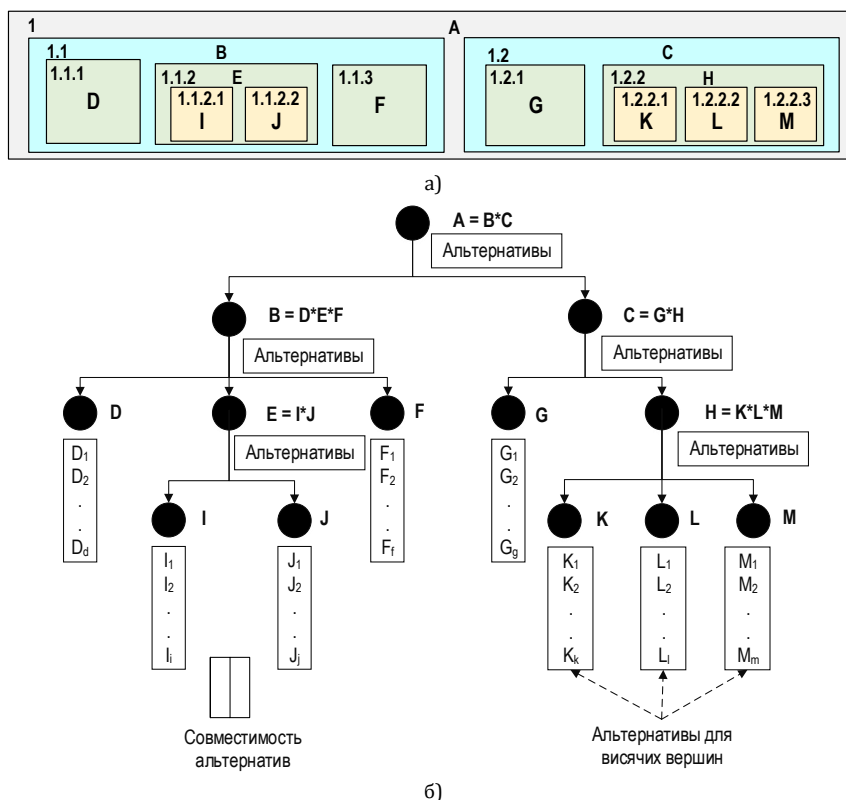


Рис. 2. Иерархическая ММС (а) и ее представление в виде древовидной структуры (б)

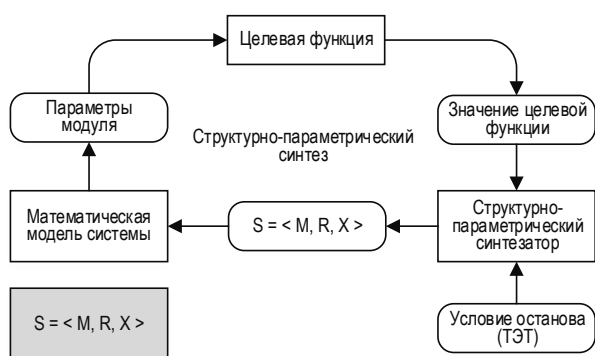


Рис. 3. Схема структурно-параметрического синтеза

Выражения  $M \in M^{TЭТ}$ ,  $R \in R^{TЭТ}$  и  $X \in X^{TЭТ}$  задают ограничения на структурные решения и значения параметров, содержащиеся в технико-экономических требованиях (ТЭТ), что обеспечит  $S^* \in S^{TЭТ}$  и, соответственно,  $TЭХ \in TЭХ^{TЭТ}$ .

### III. Параметрические и квалиметрические модели

Определение технико-экономических характеристик и технико-экономических требований выполним с использованием многоаспектных параметрических и квалиметрических моделей, соответственно. Параметрические и квалиметрические модели входят в состав комплексной модели [11, 12]. Создание многоаспектной модели следует начать с представления обобщенных технико-экономических характеристик  $TЭХ^u$  системы заданного класса, что достигается путем идентификации множества параметров, необходимых для исчерпывающего описания ТЭХ этих систем, определения их типов и областей принимаемых значений.

Для описания технико-экономических характеристик модуля и их обобщения на класс объектов –  $TЭХ^u$ , используем параметры комплексных моделей.

$$TЭХ^u = \{P_i\}, P_i \in P, \quad (11)$$

где  $P$  – множество используемых параметров.

Следующим шагом является формализация технико-экономических требований, предъявляемых к классу модульных систем  $TЭТ^u$  осуществляемая путем задания квалиметрических метрик [13, 14] на множестве  $TЭХ^u$ :

$$TЭТ^u = Q(TЭХ^u) = \{Q_i(P_i)\}, i \in \overline{1, n}. \quad (12)$$

Связь технико-экономических требований  $TЭТ \stackrel{def}{=} \{TЭТ_1, TЭТ_2, \dots, TЭТ_n\}$  и технико-экономических характеристик  $TЭХ \stackrel{def}{=} \{TЭХ_1, TЭХ_2, \dots, TЭХ_n\}$ , представленных параметрами  $\{P_1, P_2, \dots, P_n\} \in P$ , показана на рисунке 4. Метрика, заданная квалиметрическими моделями, позволяет выполнить сортировку и ранжирование морфологического множества (множество альтернативных решений).

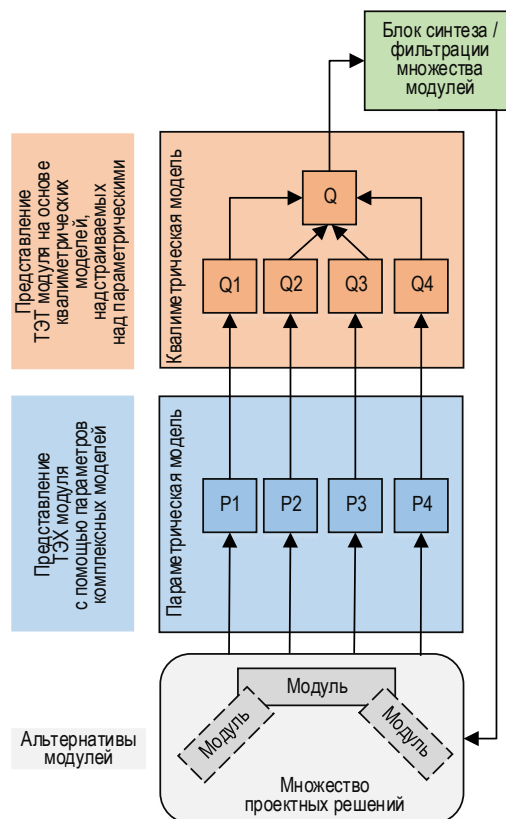


Рис. 4. Слои параметрических и квалиметрических моделей в интегративной модели структурно-параметрического синтеза MMC

Модифицируем выражение 12 для возможности определения степени соответствия ТЭХ синтезируемого модуля ТЭТ и учета степени значимости отдельных ТЭХ:

$$TЭТ \stackrel{def}{=} \begin{cases} TЭТ_1 \stackrel{def}{=} \langle P_1^{TЭТ}, a_1^{TЭТ}, r_1^{TЭТ}, P_1 \rangle; \\ TЭТ_2 \stackrel{def}{=} \langle P_2^{TЭТ}, a_2^{TЭТ}, r_2^{TЭТ}, P_2 \rangle; \\ \dots\dots\dots; \\ TЭТ_n \stackrel{def}{=} \langle P_n^{TЭТ}, a_n^{TЭТ}, r_n^{TЭТ}, P_n \rangle, \end{cases} \quad (13)$$

где  $P_i^{TЭТ}$  – ограничение на  $P_i$ ;  $a_i^{TЭТ}$  – коэффициент значимости  $P_i$ , представляющий собой значение лингвистической переменной  $a^{TЭТ}$  [15];  $r_i^{TЭТ}$  – коэффициент ригидности (степени «жесткости» соответствия  $TЭТ_i$ ).

### IV. Автоматическая генерация целевой функции

Важной особенностью предложенных квалиметрических моделей MMC является возможность автоматической генерации целевой функции по заданным технико-экономическим требованиям. Многоаспектный характер данных моделей обеспечивает естественный процесс свертки критериев.

На основе выражения (13) определим целевую функцию (ЦФ) синтезируемого модуля:

$$ЦФ \stackrel{def}{=} F(TЭТ) = F(F_1(TЭТ_1), F_2(TЭТ_2), \dots, F_n(TЭТ_n)). \quad (14)$$

Представим выражение (14) следующим образом:

$$ЦФ \stackrel{def}{=} F(ТЭТ) = F \left( \begin{matrix} \varphi(a_1^{ТЭТ})[F_1(ТЭТ_1)], \\ \varphi(a_2^{ТЭТ})[F_2(ТЭТ_2)], \\ \dots \\ \varphi(a_n^{ТЭТ})[F_n(ТЭТ_n)] \end{matrix} \right), \quad (15)$$

где  $\varphi(a_i^{ТЭТ})$  – функция, вычисляющая вещественное значение весового коэффициента  $\alpha_i$  по  $a_i^{ТЭТ}$ ;  $F_i(ТЭТ_i)$  – функция, вычисляющая значение  $i$ -го критерия.

Выполним преобразование выражения (15), чтобы получить явную связь между ТЭТ и целевой функцией:

$$\begin{aligned} ЦФ \stackrel{def}{=} F(ТЭТ) &= F(\alpha_1 K_1, \alpha_2 K_2, \dots, \alpha_n K_n); \\ \alpha_i &= \varphi(a_i^{ТЭТ}), i \in \overline{1, n}; \\ K_i &= F_i(ТЭТ_i), i \in \overline{1, n}; \\ ТЭТ_i &= \langle P_i^{ТЭТ}, a_i^{ТЭТ}, r_i^{ТЭТ}, P_i \rangle, i \in \overline{1, n}; \\ &P_i \in P; \end{aligned} \quad (16)$$

где  $K_i$  – нормированная величина  $i$ -го критерия.

На рисунке 5 представлены отношения технико-экономических характеристик, технико-экономических требований и критериев целевой функции.

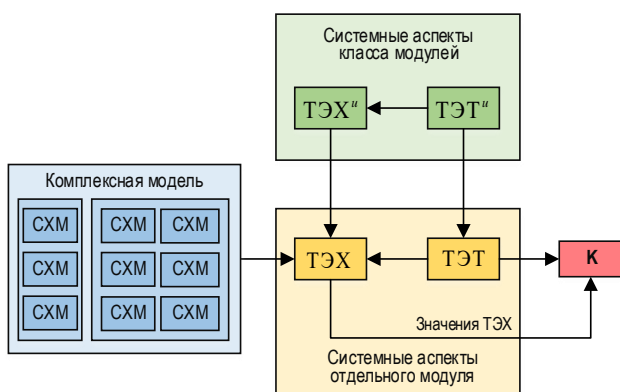


Рис. 5. Отношения технико-экономических характеристик, технико-экономических требований и критериев целевой функции

В выражении (16) для  $F(ТЭТ)$  реализуется один из известных видов свертки критериев в интегральный критерий, наиболее популярными из которых являются аддитивная (17), мультипликативная (18), максиминная (минимаксная) (19) свертки [16]:

$$F(ТЭТ) = \sum_i \alpha_i K_i, i \in \overline{1, n}; \sum_i \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0. \quad (17)$$

$$F(ТЭТ) = \prod_i (K_i)^{\alpha_i}, i \in \overline{1, n}; \sum_i \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0. \quad (18)$$

$$F(ТЭТ) = \max \left\{ \bigcup_i \alpha_i K_i \right\}, i \in \overline{1, n}; \sum_i \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0. \quad (19)$$

В случае применения аддитивной свертки частных критериев в интегральный критерий получим:

$$\begin{aligned} ЦФ \stackrel{def}{=} F(ТЭТ) &= \sum_i \alpha_i K_i \rightarrow \max, i \in \overline{1, n}; \\ \sum_i \alpha_i &= 1, \alpha_i \geq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Для решения задачи максимизации ЦФ, функция  $\alpha_i = \varphi(a_i^{ТЭТ})$  может быть представлена следующим образом:

$$\alpha_i = \varphi(a_i^{ТЭТ}) = \frac{a_i}{\sum_j a_j}, i, j \in \overline{1, n}; 0 \leq a \leq 1, \quad (21)$$

где  $a_i^{ТЭТ}$  – коэффициент значимости  $P_i$ , представляющий собой значение лингвистической переменной  $a^{ТЭТ}$ , определяемой следующим образом:  $a^{ТЭТ} \in T, T = \{\text{нулевой, очень низкий, низкий, средний, высокий, очень высокий}\}$ .

Смысл лингвистического значения [15]  $a_i^{ТЭТ}$  характеризуется функцией совместимости:

$$C: T \rightarrow [0, 1], \quad (22)$$

где  $T$  – множество нечетких переменных.

Таким образом,  $a_i$  в выражение (21) можно вычислить в следующем образом:

$$a_i = C(a_i^{ТЭТ}) = \frac{i - 1}{n - 1}, i \in \overline{1, n}, \quad (23)$$

где  $a_i \in \{0_{\text{нул}}, 0, 2_{\text{оч. низ}}, 0, 4_{\text{низ}}, 0, 6_{\text{ср}}, 0, 8_{\text{выс}}, 1_{\text{оч. выс}}\}$ .

Возможны и другие способы для вычисления значения весового коэффициента [17], в том числе и его непосредственное задание, что может потребоваться, например, для определения множества недоминирующих альтернатив.

Вычисление значений критериев целевой функции требует анализ требований, предъявляемых к модулям (таблица 1). При классическом решении оптимизационных задач вводятся жесткие ограничения на область изменения рабочих параметров. Ограничения на критерии и можно учесть с помощью штрафных и барьерных функций.

ТАБЛИЦА 1. Типы функциональных требований

Тип требования	Назначение
A	$a \leq x \leq b: a, b \in \{\text{Real, Int}\}$
B	$x \geq b: b \in \{\text{Real, Int}\}$
C	$x \leq b: b \in \{\text{Real, Int}\}$
D	$x = b: b \in \{\text{Real, Int}\}$
F	Не имеет значения
0	Отсутствует
1	Присутствует

Морфологический метод комбинаторного структурно-параметрического синтеза допускает использование «плавающих» ограничений, рассматриваемых в качестве критериев [18]. Это позволяет решать задачу в расширенном диапазоне изменений рабочих параметров. Если отойти от жестких огра-

ничений, диктуемых функциональными требованиями, можно получить желаемую направленность изменения функциональных характеристик. В таблице 2 представлены функциональные требования к характеристикам (жесткие ограничения) и их желаемая направленность изменения.

ТАБЛИЦА 2. Жесткие ограничения и желаемая направленность изменения характеристик

Функциональные требования к характеристикам (жесткие ограничения)	Желаемая направленность изменения функциональных характеристик
$A: a \geq x \geq b$	$\leftarrow \rightarrow$ – обеспечить максимальное удаление от границ (снаружи): $\uparrow$ – максимизация значения $\downarrow$ – минимизация значения
$B: x \geq b$	$\uparrow$ – максимизация значения
$C: x \leq b$	$\downarrow$ – минимизация значения
$D: x = b$	$\rightarrow \leftarrow$ – обеспечить минимальное отклонение от заданного значения: $\downarrow$ – минимизация значения $\uparrow$ – максимизация значения

Конкретизируем  $F_i$  из выражения (14) для случая, когда  $P_i | TЭТ_i \stackrel{def}{=} < P_i^{TЭТ}, P_i > \in \{Real, Int\}$ , возможны четыре варианта:

$$v | P_i \leq b_{max}, \text{type} = lt. \quad (24)$$

$$v | P_i \geq b_{min}, \text{type} = gt. \quad (25)$$

$$b_{min} \leq v | P_i \leq b_{max}, \text{type} = gap. \quad (26)$$

$$v | P_i = b, \text{type} = eq. \quad (27)$$

Логично предположить, что в случае выражения (24) выполняется минимизация значения параметра  $P_i$ , в случае выражения (25) – максимизация, для выражения (26) – достижение максимального удаления от границ, задаваемых  $b_{min}$  и  $b_{max}$ , а выражение (27) требует достижения минимально возможного отклонения от  $b$ . Последний вариант для реальных систем должен быть преобразован следующим образом:  $|v | P_i - b| < \delta$ . Выражение (27) может быть сведено к выражению (26):

$$b_{min} = b - \delta, b_{max} = b + \delta. \quad (28)$$

Определим выражения для  $F_i^{type}$  для всех четырех случаев. При этом потребуем, чтобы для значений частных критериев  $K_i$  выполнялось условие  $K_i \in [-1, 1]$ . Такое ограничение даст наглядное представление о выполнении условий ТЭТ для каждого параметра.

В случае максимизации интегрального критерия частные критерии  $K_i$  примут вид:

$$K_i(v) = \begin{cases} -1, v \leq v_{min} \\ -\frac{b-v}{b-v_{min}}, v_{min} < v \leq b \\ \frac{v-b}{v_{max}-b}, b < v \leq v_{max} \\ 1, v \geq v_{max} \end{cases}. \quad (29)$$

В случае минимизации:

$$K_i(v) = \begin{cases} 1, v \leq v_{min} \\ \frac{b-v}{b-v_{min}}, v_{min} < v \leq b \\ -\frac{v-b}{v_{max}-b}, b < v \leq v_{max} \\ -1, v \geq v_{max} \end{cases} \quad (30)$$

На рисунке 6 представлены примеры вычисления значения критерия  $K_i$  соответствия условиям ТЭТ для случаев максимизации и минимизации.

Применение выражений (24–30) позволили нам уйти от жестких ограничений на область изменения параметров, преобразовав их в «плавающие» ограничения. Эти критерии (или часть их) свертываются в один интегральный критерий. Таким образом, наилучшее решение  $A^*$  из множества возможных (допустимых) альтернатив  $A = \{A_j, j \in \overline{1, m}\}$  определяется в виде:

$$A^* = \arg \left( \max_{A \in A} \left\{ \sum_i \alpha_i K_i(A) \right\} \right), i \in \overline{1, n}; \quad (31)$$

$$\sum_i \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0.$$

### V. Алгоритм фильтрации и упорядочивания морфологического множества модулей и ММС по уровню соответствия технико-экономическим требованиям

Предложенные выше многоаспектные модели дают возможность создать алгоритм фильтрации и упорядочивания морфологического множества модулей и ММС по степени соответствия технико-экономическим требованиям, предъявляемым к отдельным модулям или системам. Такой алгоритм в качестве оператора сравнения при ранжировании использует целевую функцию, автоматически получаемую из информации, содержащейся в квалиметрических моделях.

Общее число элементов морфологического множества модулей и ММС может иметь очень большую мощность. Выбор модулей, максимально отвечающих технико-экономическим требованиям, может представлять достаточно трудоемкую задачу, что обуславливает требование наличия алгоритмов, реализующих операции фильтрации и упорядочивания морфологического множества. В результате выполнения данных операций будут отсеяны заведомо неэффективные варианты, а оставшиеся будут отсортированы по уровню соответствия ТЭТ. Блок-схема алгоритма фильтрации и сортировки морфологического множества модулей по соответствию ТЭТ представлена на рисунке 7.

Данный алгоритм будет иметь следующий вид.  
**Шаг 1.** Определение множества модулей (альтернатив), которое заведомо включает искомое решение, т. е. выбор из заданного класса.

**Шаг 2.** Вычисление вещественного значения весового коэффициента  $\alpha_i$ .

**Шаг 3.** Определение числа модулей выборки ( $m$ ).

**Шаг 4.** Вычисление значения критерия  $K_i$  соответствия условиям ТЭТ для каждого модуля (альтернативы).

**Шаг 5.** Вычисление значения ЦФ для каждого варианта.

**Шаг 6.** Анализ и сортировка модулей по критерию соответствия условиям ТЭТ.

В результате фильтрации морфологического множества по критерию соответствия ТЭТ будет получено подмножество альтернативных решений, удовлетворяющих условиям поставленной задачи. Полученное подмножество будет упорядочено в соответствии с технико-экономическими требованиями. Лицу, принимающему решение, будет предоставлен выбор из небольшого числа альтернатив, упорядоченных по критерию оптимальности.

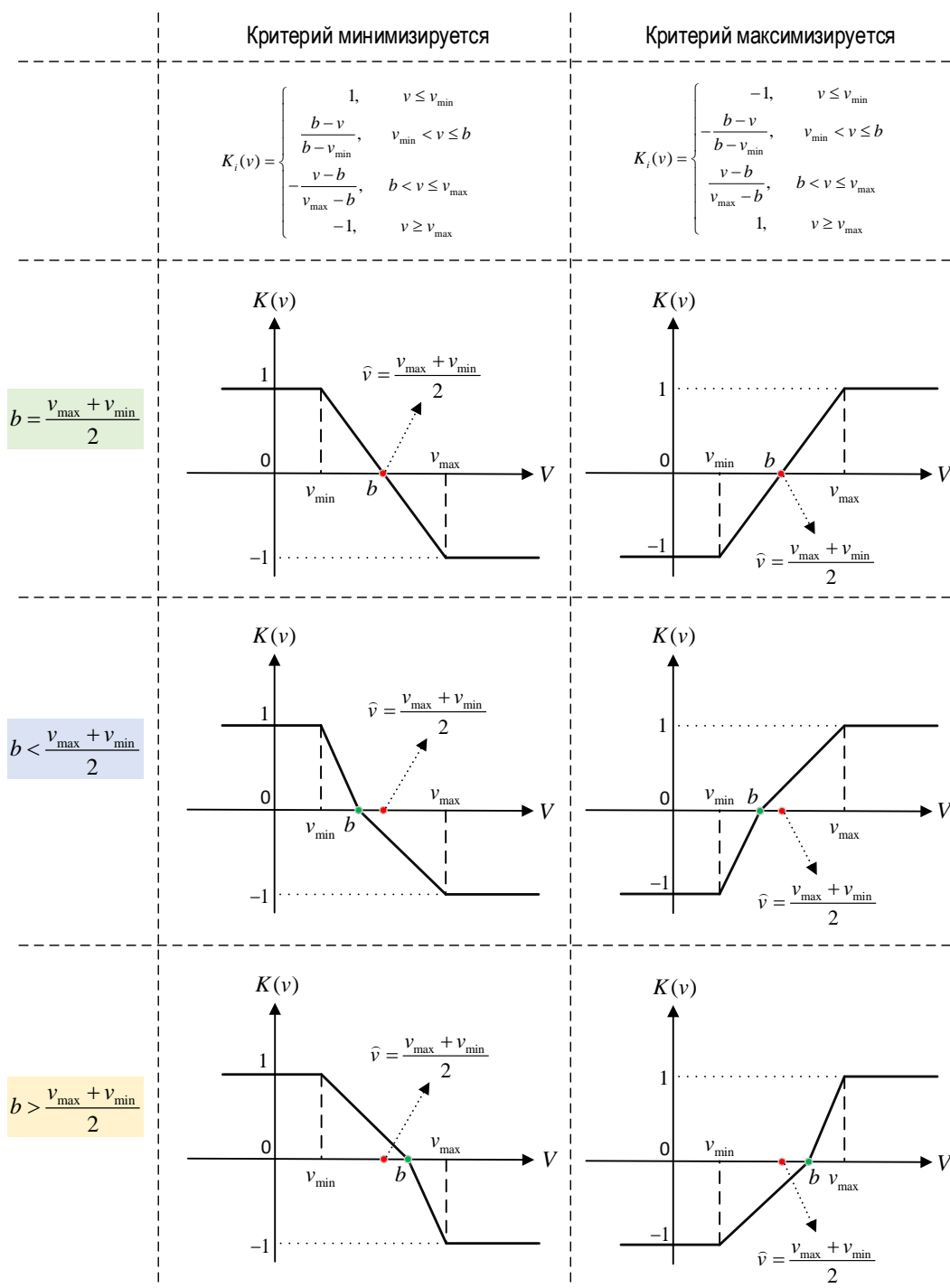


Рис. 6. Вычисление значения критерия соответствия условиям ТЭТ

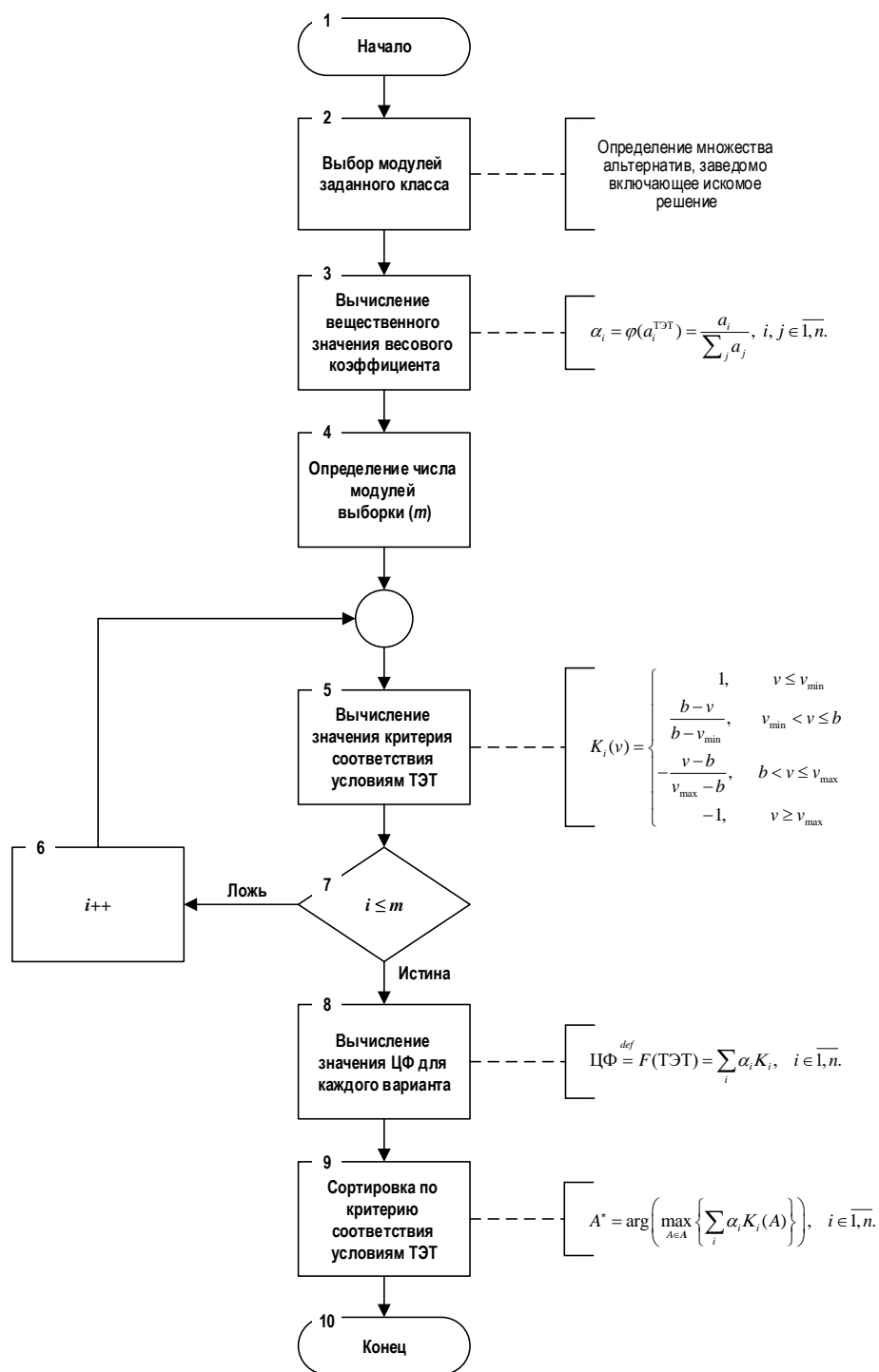


Рис. 7. Блок-схема алгоритма фильтрации и сортировки морфологического множества модулей по критерию соответствия ТЭТ

## VI. Метод каскадной фильтрации при комплексировании ММС

Разработанный авторами метод может быть использован в автоматизированных системах комплексирования ММС. На практике процесс комплексирования радиоэлектронных средств и телекоммуникационных систем осуществляется с использованием стратегии «снизу-вверх». Рассмотрим использование разработанного метода для реализации данной стратегии.

На первом этапе осуществляется фильтрация и упорядочение морфологического множества модулей и ММС. Далее осуществляется процесс комплексирования с использованием механизма каскадной фильтрации [13], которая гарантирует совместимость компонентов (модулей), из которых синтезируется система (рисунок 8).



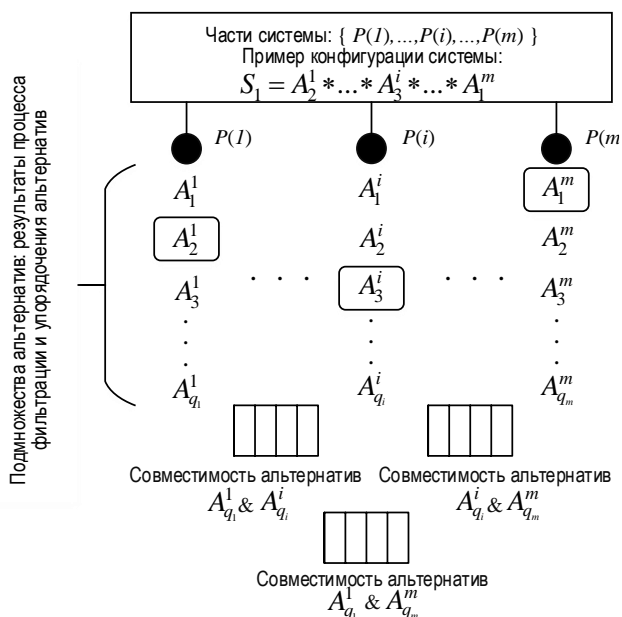


Рис. 8. Схема фильтрации несовместимых между собой модулей при синтезе ММС

Рассмотрим пример определения конфигурации персонального компьютера. Допустим, на первом шаге пользователь выбирает конкретный процессор, что автоматически влечет отфильтровывание системных плат, несовместимых с данным процессором (первая ступень каскада). Полученное множество системных плат позволяет отфильтровать другие компоненты (модули памяти, видеокарты, корпуса и т. д.), которые не совместимы ни с одной из системных плат, совместимых с выбранным процессором.

Допустим, что на втором шаге пользователь выбирает из подмножества множества модулей памяти, полученного в результате каскадной фильтрации на первом шаге, некий конкретный модуль. Это влечет фильтрацию множества печатных плат, совместимых с выбранным на первом шаге процессором. В результате получаем множество системных плат, одновременно совместимых с выбранными процессором и модулями памяти (первый каскад фильтрации). На втором каскаде фильтрации происходит отсев элементов, несовместимых с новым множеством системных плат. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет получена заданная конфигурация.

#### Список используемых источников

1. Ходер Х., Верхова Г.В., Акимов С.В. Модульная технология проектирования гибких сложных систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. № 9. С. 86–90.
2. Шубарев В.А., Меткин Н.П., Зверев В.Н. Магистрально-модульное построение РЭС – стратегическое направление радиоэлектронного приборостроения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. Спецвыпуск. С. 20–23.
3. Шубарев В. Технологические прорывы в создании радиоэлектронной аппаратуры // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. Спецвыпуск. С. 4–8.
4. Ефименко А.А., Карлангач А.П. Несущие конструкции с повышенными компоновочными характеристиками // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2016. № 4–5. С. 23–28. DOI:10.15222/TKEA2015.4-5.23
5. Либенко Ю.Н. Эксплуатационные возможности преобразователей напряжения с магистрально-модульной архитектурой // Практическая силовая электроника. 2012. № 4(48). С. 6–9.

#### VII. Заключение

Представленный в статье разработанный авторами морфологический метод комбинаторного синтеза ММС, базирующийся на многоаспектных моделях, является теоретической базой для перспективных систем автоматизированного проектирования радиоэлектронных и телекоммуникационных систем и комплексов. В данном методе впервые предложено использовать для решения задачи структурного синтеза ММС морфологический подход и методологию многоаспектного моделирования. В отличие от математических моделей, используемых в системах автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств, многоаспектные модели позволяют учесть особенности ММС, включая различные виды совместимости отдельных модулей. Отсутствие универсальных систем, автоматизирующих процесс комплексирования ММС, объясняется отсутствием таких моделей.

Многоаспектные квалиметрические модели ММС и их компонентов позволяют задавать технико-экономические требования к этим системам. Авторами впервые предложен алгоритм автоматической генерации целевой функции на основе информации, которая содержится в квалиметрических моделях, а также разработан и программно реализован алгоритм «мягкой» фильтрации и упорядочивания морфологического множества. Созданные методы, модели и алгоритмы могут быть использованы при комплексировании ММС.

Создание программного обеспечения, в основу которого будет положен разработанный авторами морфологический метод комбинаторного синтеза ММС, базирующийся на многоаспектных моделях, позволит создать новый тип продукта, осуществляющий сквозную информационную поддержку процессом проектирования и распространения модулей и ММС от разных производителей. На сегодняшний день программные продукты такого типа на рынке отсутствуют, но будут востребованы как производителями электронных модулей, так и разработчиками и операторами радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, которые строятся на основе магистрально-модульного принципа.

6. Горностаев А.И., Капустин А.Н., Зубавичус В.А., Колесников С.М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения. 2009. Т. 1. С. 20–22.
7. Либенко Ю.Н., Четин А.Н. Электронные модули первого уровня разукрупнения силовой части системы преобразования электроэнергии с магистрально-модульной архитектурой // Электропитание. 2013. № 3. С. 27–33.
8. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 254 с.
9. Горлач Б.А. Исследование операций. СПб: Лань, 2013. 441 с.
10. Мадера А.Г. Моделирование и принятие решений в менеджменте: Руководство для будущих топ-менеджеров. М.: Изд-во ЛКИ, 2013. 688 с.
11. Акимов С.В., Никифоров О.Г. Методология комплексных моделей системных объектов // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 3. № 2. С. 138–149.
12. Khoder H.M., Verkhova G.V., Akimov S.V. Parametric multi-aspect modeling of distributed bus-modular control systems // Proceedings of the 12nd International Conference on Control in Technical Systems (CTS, St. Petersburg, Russia, 25–27 October 2017). Piscataway, NJ: IEEE, 2017. PP. 259–262. DOI:10.1109/CTS.2017.8109540
13. Акимов С.В., Меткин Н.П., Верхова Г.В. Многоаспектные квалиметрические модели системных объектов // Радиопромышленность. 2017. № 1. С. 13–21.
14. Кириллов В.И. Квалиметрия и системный анализ. Минск: Новое знание, Москва: ИНФРА-М, 2014. 439 с.
15. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва: Мир, 1976. 165 с.
16. Алексеев А.В., Борисов А.Н., Вилюмс Э.Р., Слядзь Н.Н., Фомин Н.Н. Интеллектуальные системы принятия проектных решений. Рига: Зинатне, 1997. 320 с.
17. Кини Р.Л., Райффа Г. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва: Радио и связь, 1981. 560 с.
18. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Москва: Наука, 1981. 110 с.

\* \* \*

## MORPHOLOGICAL METHOD OF COMBINATORIAL SYNTHESIS OF BUS-MODULAR SYSTEMS BASED ON MULTI-ASPECT MODELS

G. Verkhova<sup>1</sup> , H. Khoder<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

### Article info

The article was received 29th July 2019

**For citation:** Verkhova G., Khoder H. Morphological Method of Combinatorial Synthesis of Bus-Modular Systems Based on Multi-Aspect Models. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):88–98. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-88-98>

**Abstract:** *This article presents morphological method of combinatorial synthesis of bus-modular systems developed by the authors, which can be used in automation systems for aggregating electronic means and telecommunication systems. Original results obtained by the authors in the field of mathematical formulation of the synthesis problem of bus-modular systems are presented. It is shown that existing mathematical models cannot be used to effectively solve the synthesis problem of this class of systems. Original multi-aspect models of bus-modular systems are proposed that take into account the different types of compatibility of the modules from which the system is synthesized. The results of the development of complex and qualimetric models of bus-modular systems, as well as original algorithms for automatic generating of objective function according to given technical-economic requirements and algorithms for automatic filtering and ranking of the morphological set of modules are presented.*

**Keywords:** *Bus-modular systems, combinatorial synthesis method, multi-aspect modeling, complex model, parametric model, qualimetric model, multi-criteria optimization, structural-parametric synthesis.*

## References

1. Khoder H., Verkhova G.V., Akimov S.V. Modular technology in design of flexible complex systems. *T-Comm*. 2017;11(9): 86–90.
2. Shubarev V.A., Metkin N.P., Zverev V.N. Magistralno-modulnoe postroenie RJeS – strategicheskoe napravlenie radiojel-ektronnogo priborostroeniia [Bus-Modular Construction Radio Electronic Means – Strategic Direction of Radio Electronic Instrument Making]. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2008:20–23. (in Russ.)
3. Shubarev V. Tekhnologicheskie proryvy v sozdanii radioelektronnoi apparatury – Strategicheskoe napravlenie radiojel-ektronnogo priborostroeniia [Technological Breakthroughs in the Creation of Electronic Equipment]. *Electronics: Science, Technology, Business*. 2008:4–8. (in Russ.)
4. Yefimenko A.A., Karlangach A.P. Mechanical structures with enhanced layout characteristics. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*. 2016;4–5:23–28. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.15222/TKEA2015.4-5.23>
5. Libenko Y.N. Operational Capabilities of Voltage Converters with Highway-Module Architecture. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. 2012;4(48):6–9. (in Russ.)
6. Gornostaev A.I., Kapustin A.N., Zubavichus V.A., Kolesnikov S.M. Application of Mainline-Modular Principle During the Construction of Onboard Equipment of Spacecrafts Onboard Control System. *Reshetnevskie chteniya*. 2009;1:20–22. (in Russ.)
7. Libenko Y.N., Chetin A.N. Elektronnyye moduli pervogo urovnya razukrupneniia silovoi chasti sistemy preobrazovaniia elektroenergii s magistralno-modulnoi arhitekturoi. *Power Supply*. 2013;3:27–33. (in Russ.)
8. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimalnye resheniia mnogokriterialnykh zadach* [Pareto-Optimal Solutions of the Multiobjective Problems]. Moscow: Nauka; 1982. 254 p. (in Russ.)
9. Gorchakov B.A. *Issledovanie operatsii* [Operations Research]. St. Petersburg: Lan Publ.; 2013. 441 p. (in Russ.)
10. Madera A.G. *Modelirovaniye i prinyatie reshenii v menedzhmente: Rukovodstvo dlia budushchikh top-menedzherov* [Modeling and Decision Making in Management: A Guide for Future Top Managers]. Moscow: LKI Publ.; 2013. 688 p. (in Russ.)
11. Akimov S.V., Nikiforov O.G. Metodologiya kompleksnykh modelei sistemnykh obektov [Methodology of complex models of system objects]. *Voprosy radioelektroniki*. 2012; 3(2): 138–149. (in Russ.)
12. Khoder H.M., Verkhova G.V., Akimov S.V. Parametric multi-aspect modeling of distributed bus-modular control systems. *Proceedings of the 11th International Conference on Control in Technical Systems, CTS, 25–27 October 2017, St. Petersburg, Russia*. Piscataway, NJ: IEEE; 2017. p.259–262. Available from: <https://doi.org/10.1109/CTS2017.8109540>
13. Akimov S.V., Metkin N.P., Verkhova G.V. Multiple Qualimetric Models of System Objects. *Radio industry*. 2017;1:13–21. (in Russ.)
14. Kirillov V.I. *Kvalimetriya i sistemnyi analiz* [Qualimetry and System Analysis]. Minsk: Novoe znanie Publ., Moscow: INFRA-M Publ.; 2014. 439 p. (in Russ.)
15. Zadeh L.A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* [The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Making Approximate Decisions]. Moscow: Mir Publ.; 1976. 165 p. (in Russ.)
16. Alekseev A.V., Borisov A.N., Vilyums E.R., Slyadz N.N., Fomin N.A. *Intellektualnye sistemy prinyatiia proektnykh reshenii* [Intelligent Decision-Making Systems]. Riga: Zinatne Publ.; 1997. 320 p. (in Russ.)
17. Kini R.L., Rayffa G. *Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriiakh: predpochteniia i zameshcheniia* [Decision Making under Many Criteria: Preferences and Substitutions]. Moscow: Radio and Communication Publ.; 1981. 560 p. (in Russ.)
18. Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [The Choice of Optimal Parameters in Problems with Many Criteria]. Moscow: Science Publ.; 1981. 110 p. (in Russ.)