

УДК 004.414.28

Технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика

В.Н. Ильин, А.В. Лепёхин.

Аннотация

Структурно-параметрический синтез является одной из основных процедур при проектировании различных устройств и систем. Как правило, эта процедура из-за сложности её формализации выполняется вручную. В статье предложена технология автоматизации структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика, позволяющая существенно ускорить реализацию этой процедуры и синтезировать вариант проектируемого объекта, близкий к оптимальному.

Ключевые слова

структурно-параметрический синтез; морфологический анализ; морфологический ящик; систематизированный поиск

1. Метод морфологического ящика.

Структурно-параметрический синтез является одной из важнейших процедур проектирования различных объектов, от успешности реализации которого в значительной степени зависит конечный результат проектирования. Существуют разные подходы к реализации процедуры структурно-параметрического синтеза: метод фокального объекта [1], метод матрицы цели-средства [2], метод конструирования Коллера [3] и др. Но одним из наиболее эффективных считается метод морфологического ящика (ММЯ). На основе ММЯ было создано множество методов направленного поиска [8, 9], в СССР метод активно развивался Одриним и Картавовым [6]. Описанию метода морфологического ящика посвящено достаточно много работ [4-6, 13], однако в этих работах в основном указываются

возможности метода, а технология их использования либо не описывается, либо описывается неформально, словесно. К тому же, за исключением [7], в работах по ММЯ не проводилось попыток компьютеризации данного метода, что на современном этапе развития вычислительной техники выглядит упущением.

Целью данной статьи является изложение последовательности основных операций, входящих в процедуру структурно-параметрического синтеза на основе морфологического ящика и образующих в совокупности технологию этой процедуры, а также анализ особенностей их реализации. Следует заметить, что предлагаемый метод является именно «методом на основе морфологического ящика», а не самим методом морфологического ящика. В частности, используются способы сокращения вариантов реализации и выбора лучшего решения, дополняющие ММЯ.

Основателем ММЯ считается австрийский астроном Фриц Цвикки. Помимо ММЯ, Цвикки так же сформулировал метод отрицания и конструирования и метод систематического покрытия поля, но эти методы не алгоритмизированы, и не нашли широкого применения в области структурно-параметрического синтеза.

В [10] Цвикки предлагает следующий алгоритм работы ММЯ:

Формулировка задачи.

- 1) Выявление всех составляющих частей решения данной задачи (морфологический анализ).
- 2) Определение возможных решений для каждой части из п.2 и построение морфологического ящика.
- 3) Анализ всех возможных решений.
- 4) Выбор лучшего решения.

Определённую сложность для автоматизации вызывает недостаточная функциональная полнота ММЯ на завершающих стадиях – сокращения пространства поиска и выбора лучшего решения. Следовательно, требуется каким-либо образом расширить возможности метода. Если первые три этапа однозначно должны проводиться инженером "вручную" (по крайней мере способы автоматизации морфологического анализа задачи далеко не очевидны), то применительно к двум последним этапам в рамках их автоматизации можно предложить ряд усовершенствований. К ним относятся способ сокращения числа вариантов реализации, чтобы уже на начальной стадии синтеза отбросить заведомо бесперспективные варианты, и способ выбора лучшего решения на основании предпочтений ЛПР (лица, принимающего решение) при оценке важности интересующих его характеристик объекта

Основными укрупнёнными операциями указанной проектной процедуры синтеза являются следующие:

- Построение морфологического ящика.
- Сокращение количества возможных реализаций
- Определение лучшей альтернативы по обобщённому критерию.

Рассмотрим эти операции подробнее.

1.1. Построение морфологического ящика.

Перед построением морфологического ящика выделяются два множества: множество M значимых для объекта морфологических частей объекта и множество A альтернатив (способов) реализации каждой морфологической части. В качестве значимых частей объекта можно рассматривать элементы конструкции, материалы, форму, тип, способ функционирования, принцип действия и т. д. Степень подробности морфологии объекта во многом определяет конечный успех синтеза.

Морфологическим ящиком называется множество $\{A^*M, R\}$, где A^*M – декартово произведение множеств A и M ; R – множество значений элементов декартова произведения. Обычно для удобства использования это множество представляют в виде таблицы, строки которой соответствуют альтернативам, столбцы – значимым морфологическим частям проектируемого объекта, а в каждой клетке R_{ij} записывается значение j -й морфологической части объекта при выборе i -й альтернативы. Морфологический ящик позволяет представить в компактной форме все способы построения объекта. Если объект содержит N морфологических частей (N – количество элементов множества M), а каждая j -я часть может быть реализована K_j способами, то в морфологическом ящике содержится $K_1 \times K_2 \times \dots \times K_N$ способов реализации объекта. В качестве примера проведём морфологический анализ компьютерной мыши, то есть определим составляющие её части (множество M) и способы реализации этих частей (множества A). К ним можно отнести размер, разрешение, разъём, количество кнопок, длина кабеля, и т.д.

Выявим всевозможные сочетания этих частей и способов их реализации. Для этого составим матрицу “морфологическая часть компьютерной мыши – способы её реализации”, называемую морфологическим ящиком.

Таблица 1. Морфологический ящик для компьютерной мыши.

Размер	Разъём	Длина кабеля	Принцип действия	Количество кнопок	Разрешение
Небольшая	PS/2	1 м	Оптомеханическая	2	800 dpi
Средняя	USB	1,5 м	Светодиодная	3	1200 dpi

Большая		2 м	Лазерная	4	1600 dpi
				5	2000 dpi
					3200 dpi

Комбинируя элементы матрицы, можно получить самые разные варианты компьютерных мышей, например, большая, лазерная, с разрешением 2000 dpi, с 4 кнопками, с разъёмом USB и длиной кабеля 2 м. Любая линия, проведённая через любые элементы этой матрицы слева направо, даёт один из возможных вариантов компьютерной мыши.

Общее число таких вариантов равно произведению числа строк в каждом столбце: $3 \times 2 \times 3 \times 3 \times 4 \times 5 = 2160$ вариантов.

1.2. Сокращение количества реализаций.

Обычно количество возможных реализаций, содержащееся в морфологическом ящике, достаточно велико и составляет несколько сотен или даже тысяч. Проанализировать такое количество реализаций вручную и выбрать из них лучшую достаточно сложно. Однако, эти реализации не эквивалентны друг другу: одни заведомо хуже других, другие не удовлетворяют разработчика по техническим требованиям к объекту. В связи с этим целесообразно сократить общее количество реализаций. Для этого используются нижеследующие методы.

1.2.1. Построение множества Парето для каждой морфологической части объекта.

Множество Парето – это подмножество всего множества реализаций, содержащее те из них, которые не имеют друг перед другом преимущества по всем частным критериям, характеризующим данное множество реализаций [11]. Построение множества Парето позволяет исключить из рассмотрения реализации, заведомо худшие тех, которые вошли в множество Парето, и тем самым значительно сократить количество реализаций для последующего рассмотрения. Множество Парето строится для каждой части морфологического ящика.

Для составления множества Парето необходимо:

- каждую j -ю часть объекта охарактеризовать набором количественных и/или качественных частных критериев $u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{rj}$;
- для каждого частного критерия указать характер его предпочтительности, а именно: если чем больше значение критерия, тем лучше для объекта, то критерий считается хорошим, в противном случае – плохим;

- составить множество Парето для данной j-й части объекта с учётом предпочтительности частных критериев.

Альтернатива K_j принадлежит множеству Парето P , если:

$$K_j \in P: \forall K_n \exists j (y_{ij} \text{ better } y_{in}) \quad (1)$$

т. е. если для любой альтернативы K_n существует такой частный критерий y_j , что y_{ij} лучше y_{in} , то альтернатива K_j принадлежит множеству P . Критерий принадлежности альтернативы множеству Парето можно ужесточать с целью уменьшения его состава.

Отметим, что состав множества Парето не зависит от характера частных критериев – количественного или качественного. В обоих случаях для построения множества Парето можно использовать один и тот же стандартный алгоритм, но в первом случае значения частных критериев описываются в шкале отношений, а во втором – в ранговой шкале. В результате этой операции достигается значительное уменьшение значений чисел K_j и, соответственно, общее число реализаций объекта, содержащихся в морфологическом ящике.

1.2.2. Учёт глобальных ограничений.

Глобальными ограничениями будем называть требования к частным критериям y_i всего объекта творчества в целом. Такими частными критериями могут быть общий вес объекта, его габариты, стоимость и т. д. Эти требования включаются в состав технического задания на проектируемый объект и в общем случае имеют вид:

$$y_{i \text{ мин}} < y_i < y_{i \text{ макс}}, \quad i = 1, 2 \dots \quad (2)$$

В частных случаях ограничения могут быть односторонними. Например, такими ограничениями могут быть требования, чтобы объект стоил не более 1000 рублей, весил не более 1 кг, потреблял мощности не более 10 ватт и др. Очевидно, стоимость объекта, также как его вес и потребляемая мощность, есть сумма соответствующих характеристик его частей. Поэтому зависимость таких характеристик Y объекта от соответствующих характеристик X_i его частей описывается аддитивной (в виде суммы) линейно возрастающей функцией: $Y = X_1 + X_2 + \dots + X_N$

Все варианты объекта, для которых значения Y не удовлетворяют глобальным ограничениям, должны быть отброшены.

1.3. Определение лучшей альтернативы.

Для выбора лучшего варианта реализации объекта используются обобщённые критерии, т.к. в одном обобщенном критерии можно сочетать частные критерии, представляющие различные физические величины (электрические, массогабаритные и др.). Вычисление обобщённого критерия называется свёрткой частных критериев. Перед свёрткой разноразмерные частные критерии нужно привести к безразмерным величинам. Это достигается *нормированием* частных критериев. Оно выполняется делением нормируемой величины на некоторую заданную величину, называемую нормирующим множителем, с той же размерностью, что и размерность нормируемой величины. Выбор нормирующего множителя определяется разработчиком.

Существует несколько способов свёртки, например: аддитивный или минимального удаления от идеала [12].

1.3.1. Аддитивный способ свертки.

Критерий формируется в виде взвешенной суммы:

$$Q = \sum a_i \cdot y_i \quad (3)$$

где a_i - весовые коэффициенты, y_i – нормированные частные критерии.

Весовые коэффициенты a_i , могут быть разных знаков. Для “хороших” критериев (быстродействие, производительность) $a_i > 0$, для “плохих” (цена, вес) критериев $a_i < 0$. Модуль $|a_i|$ тем больше, чем важнее критерий.

1.3.2. Критерий минимального удаления от идеала.

В этом критерии качество каждой альтернативы оценивается расстоянием между этой альтернативой и некоторой идеальной альтернативой. Идеальной называется альтернатива, в которой каждый частный критерий принимает свое наилучшее достижимое значение с учетом современного состояния техники, причем все частные критерии должны принимать свои наилучшие значения одновременно, что практически невозможно (отсюда название альтернативы – идеальная). Идеальная альтернатива Y^n имеет идеальные значения частных критериев:

$$Y^n = y_1^n, y_2^n \dots y_n^n \quad (4)$$

Если идеальные значения частных критериев неизвестны, то в качестве идеальных можно взять наилучшие значения частных критериев на множестве рассматриваемых альтернатив.

Критерий минимального удаления от идеала имеет следующий вид

$$Y = \sum |y_i - y_i^H| \cdot a_i \quad (5)$$

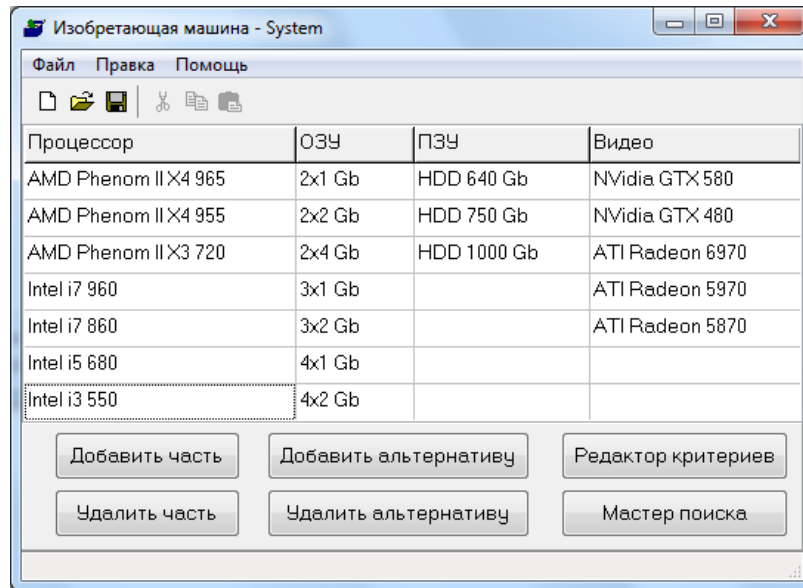
Данный критерий нужно минимизировать, так как чем меньше расстояние до идеала, тем лучше. Таким образом, лучшим вариантом реализации считается тот, который обладает наименьшим значением этого обобщённого критерия.

2. Программа автоматизации структурно-параметрического синтеза.

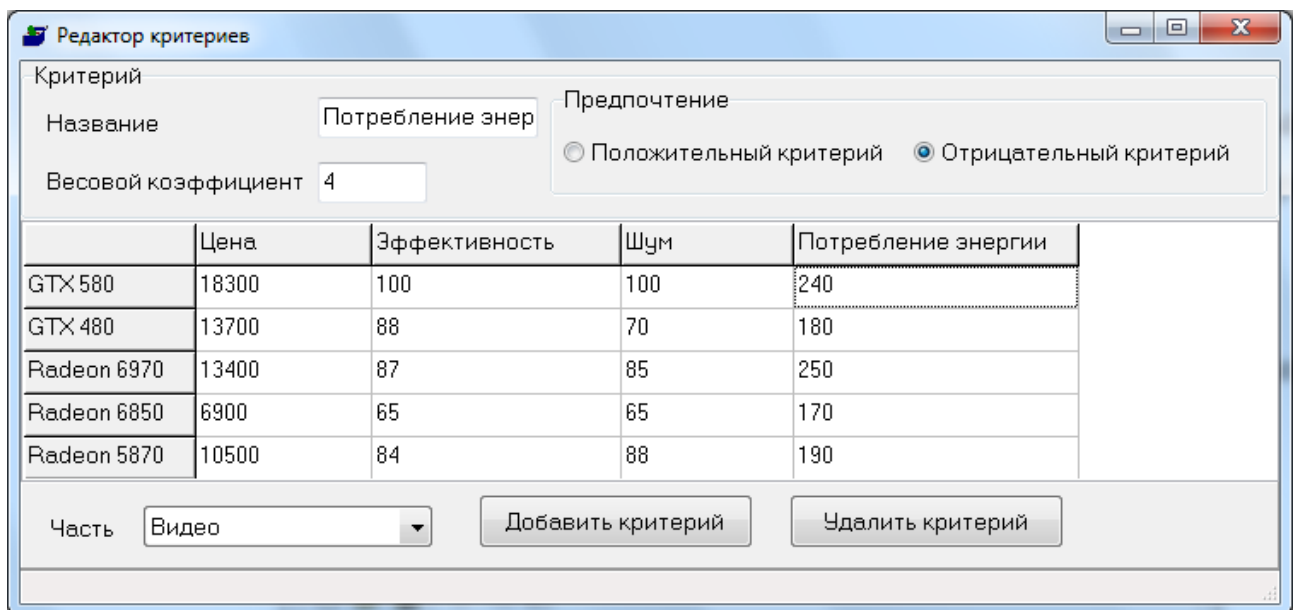
Описанная выше технология реализована в виде программы. Программа автоматически выполняет трудоёмкие операции сокращения числа вариантов реализации и выбора лучшего.

Последовательность действий при работе с программой соответствует описанной выше технологии: сначала вручную формируется морфологический ящик, далее вводятся значения частных критериев, после чего программа автоматически выполняет операции сокращения числа вариантов с помощью построения множества Парето и учёта наложенных разработчиком глобальных ограничений и затем определяет лучший вариант по выбранному разработчиком обобщённому критерию. В модуле "редактор критериев" можно манипулировать характеристиками критериев, а именно: названиями критериев, значениями, правилами предпочтения и весовыми коэффициентами.

Рассмотрим пример использования программы. В примере мы сконфигурируем состав системного блока компьютера с учётом наших предпочтений. Морфологический ящик данной задачи будет состоять из четырёх частей: процессор, оперативная память, жёсткий диск и видеокарта. Для каждой части выберем несколько вариантов реализации. В итоге морфологический ящик будет выглядеть так:

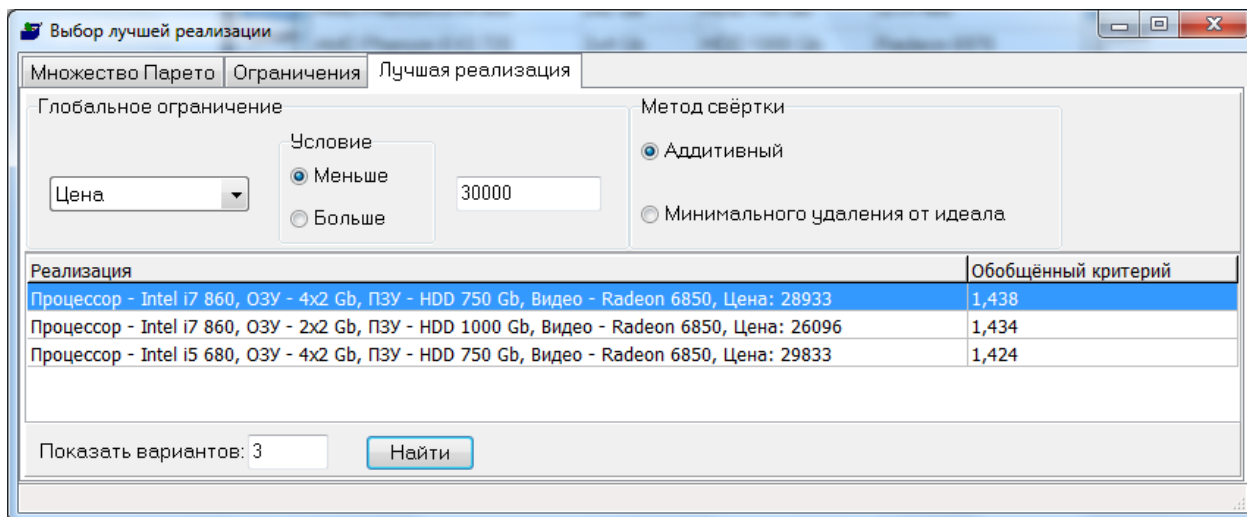


Он содержит $7 \times 7 \times 3 \times 5 = 735$ вариантов системного блока. Далее определим набор частных критериев, по которым будет производиться выбор лучшего варианта. Например, для видеокарты это могут быть: цена, эффективность, шум вентилятора и потребляемая мощность.

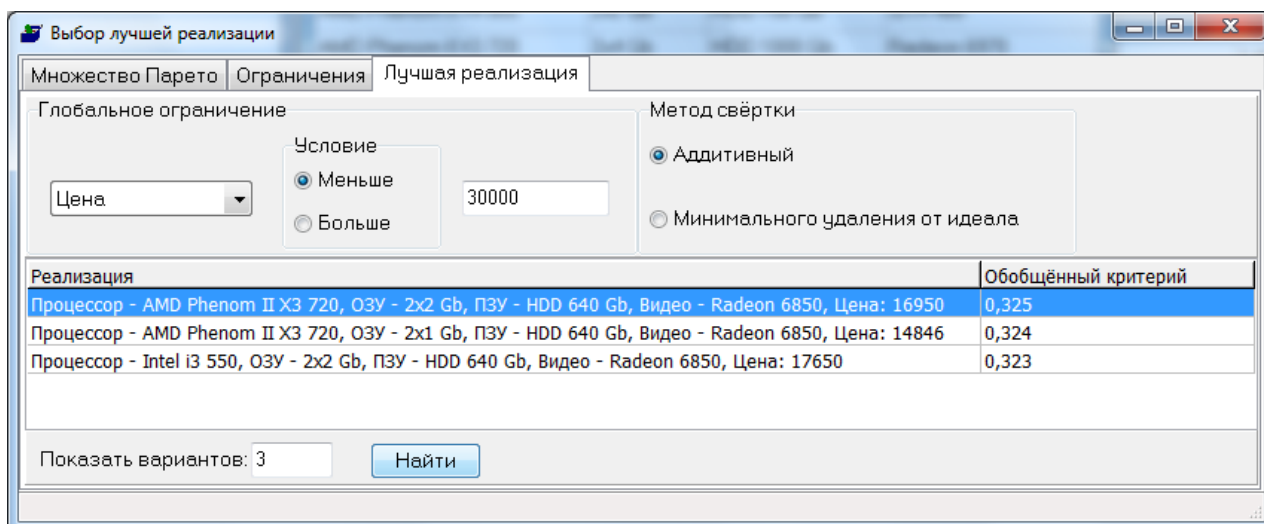


Численные значения частных критериев можно проставлять любым способом: цену можно указать в рублях, мощность в ваттах, а функциональность в баллах, так как нормирование выполняется программой автоматически.

После означивания критериев программа составляет множество Парето и учитывает наложенное глобальное ограничение на максимальную цену, равное 30000. В результате количество рассматриваемых вариантов сократилось с 735 до трёх. Далее можно выбрать лучшее решение.



На верхнем рисунке весовые коэффициенты, учитываемые в выбранном аддитивном обобщённом критерии, равны: для цены – 5, для эффективности – 10, т.е. для нас важнее эффективность. В этом случае лучшим оказывается первый (верхний) вариант.



Изменим значения весовых коэффициентов на обратные: для цены – 10, для эффективности – 5. Теперь для нас важнее низкая стоимость; в результате оптимальным оказывается более дешёвое по сравнению с первым вариантом решение.

В статье рассмотрена модернизированная технология структурно-параметрического синтеза на основе метода морфологического ящика, позволяющая последовательно автоматизировать эту проектную процедуру в виде предложенного маршрута проектирования.

Основными особенностями технологии являются этапы сокращения вариантов решения посредством построения множества Парето и введения глобальных ограничений, а так же выбор лучшей реализации с помощью различных обобщённых критериев. Эти дополнения позволяют повысить проектные возможности ММЯ при его последующей

автоматизации. Сформулированы математические формализмы для описания морфологического ящика и множества Парето. Предложена структура экранных форм для представления каждого этапа и разработана программа, реализующая описанную технологию.

Библиографический список

1. Whiting Ch. S. Creative thinking.-New-York, Reinhold, 1958.
2. Тьялве Э. Краткий курс промышленного дизайна.-М.: Машиностроение, 1984.
3. Koller R. Konstruktions method fur den Maschinen-, Gerate- und Apparatenbau. Springer. Berlin [West.], Heideberg, New- York, 1976.
4. Титов В.В. Системно-морфологический подход в технике, науке, социальной сфере. <http://www.metodolog.ru/00039/00039.html>
5. Кудрявцев А.В. обзор методов создания новых технических решений. <http://serendip.narod.ru/voir/metod/obzor/obzor.html>
6. Одрин В. М., Картавов С. С. Морфологический анализ систем.-Киев: Наукова думка, 1977.
7. Ritchey, T. *Problem Structuring using computer-aided morphological analysis*, Journal of the Operational Research Society (2006) 57,792–801 <http://www.palgrave-journals.com/jors/journal/v57/n7/abs/2602177a.html>.
8. Moles A. Roland caude Creativite et methodes d'innovat. Fayard-Hame, 1970.
9. Чяпяле Ю. М. Метод технического творчества.-Вильнюс: Мокслас, 1985.
10. Zwicky, F. (1969) *Discovery, Invention, Research - Through the Morphological Approach*, Toronto: The Macmillan Company.
11. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями.- М.: Дрофа, 2006.
12. Черноуцкий И.Г. Методы принятия решений. –СПб.: БХВ-Петербург. 2005.
13. Потёмкин И. С. Методы поиска технических решений. М.: МЭИ, 1989

Сведения об авторах

Ильин Валерий Николаевич, профессор Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., МАИ Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; e-mail: vnil2005@yandex.ru

Лепёхин Александр Владимирович, аспирант Московского авиационного института
(государственного технического университета), e-mail: avl@mastercad.ru