

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 Одриным 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

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

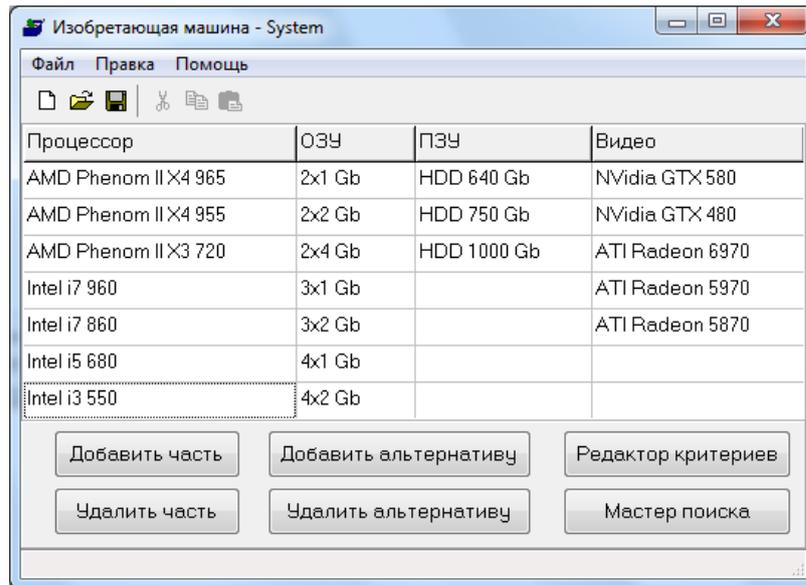
Данный критерий нужно минимизировать, так как чем меньше расстояние до идеала, тем лучше. Таким образом, лучшим вариантом реализации считается тот, который обладает наименьшим значением этого обобщённого критерия.

## **2. Программа автоматизации структурно-параметрического синтеза.**

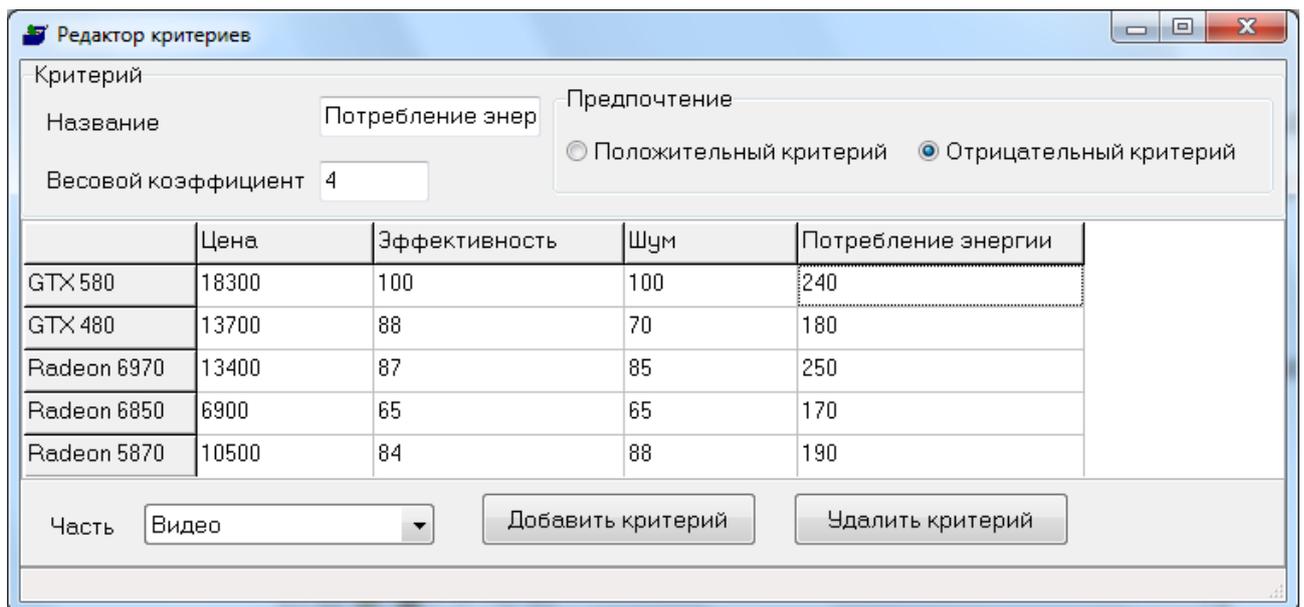
Описанная выше технология реализована в виде программы. Программа автоматически выполняет трудоёмкие операции сокращения числа вариантов реализации и выбора лучшего.

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:

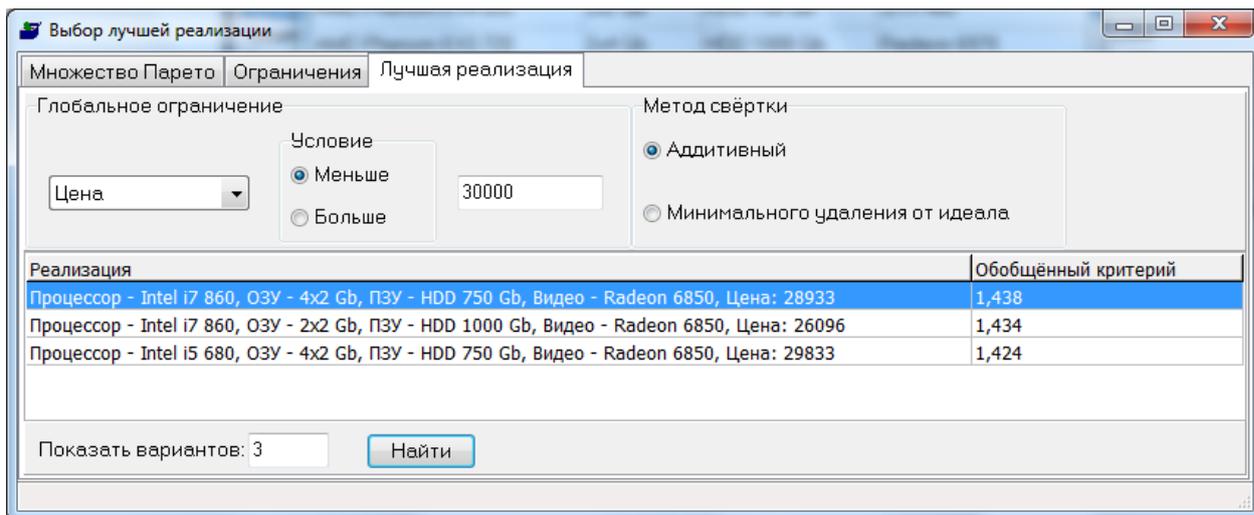


Он содержит  $7 \times 7 \times 3 \times 5 = 735$  вариантов системного блока. Далее определим набор частных критериев, по которым будет производиться выбор лучшего варианта. Например, для видеокарты это могут быть: цена, эффективность, шум вентилятора и потребляемая мощность.

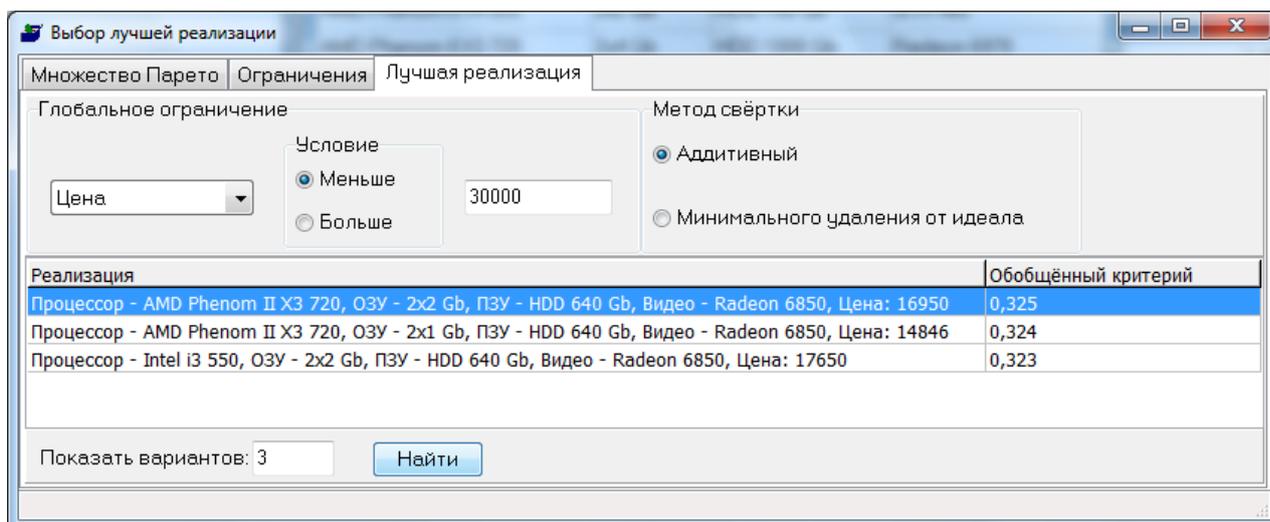


Численные значения частных критериев можно проставлять любым способом: цену можно указать в рублях, мощность в ваттах, а функциональность в баллах, так как нормирование выполняется программой автоматически.

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](mailto:vnil2005@yandex.ru)

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