

# АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ СТРУЙНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ СЕТЕЙ

**А.М. Касимов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [kasimov@ipu.ru](mailto:kasimov@ipu.ru)

**А.В. Балабанов**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [fca07@mail.ru](mailto:fca07@mail.ru)

**Ключевые слова:** струйная техника, анализ, синтез, многомерная сеть, 3D-модель

**Аннотация:** Предложен метод анализа и синтеза 3D-моделей устройств струйной техники на основе многомерных сетей, представляющих 3D-модели в виде упорядоченных множеств объектов структурных классов. Выполнена обобщенная формальная постановка задач анализа и синтеза 3D-моделей. Разработано формальное описание структурных классов. Разработаны операции геометрической, конструкционной и функциональной декомпозиций, которые являются основой для формирования множества возможных вариантов построения 3D-моделей устройств струйной техники с требуемыми характеристиками. Сформулированы правила построения многомерных сетей, предназначенных для систематизации множества возможных вариантов построения 3D-моделей, оценки качества этих вариантов и выбора варианта, наиболее удовлетворяющего заданным критериям.

## 1. Введение

Экспериментальные исследования, проведенные в ИПУ РАН, показали достижимость высоких рабочих характеристик струйных элементов [1, 2 и др.], что является предпосылкой разработки быстродействующих, энергетически эффективных и высоконадежных струйных схем. Поэтому, важной задачей является сохранение преимуществ элементарных струйных модулей при их работе в составе функциональных узлов и системы управления в целом.

Важным этапом разработки струйной техники является построение электронных 3D-моделей, структура которых должна отражать все требуемые характеристики реального объекта. При этом качество построения 3D-моделей в значительной степени определяет качество разрабатываемого изделия. Разработка устройств струйной техники с требуемыми характеристиками представляет собой сложную эвристическую задачу, полная формализация которой, в настоящее время, возможна лишь в исключительных случаях, когда объект разработки является относительно простым и хорошо изученным. Однако применение эффективных формальных методов анализа и синтеза конструкций может существенно расширить область поиска инженерных решений и упростить выбор лучшего решения из числа рассматриваемых. В этой связи,

в настоящей работе предложен метод анализа и синтеза 3D-моделей устройств струйной техники на основе многомерных сетей.

## 2. Обобщенная структура 3D-моделей

Анализ и синтез 3D-моделей при помощи многомерных сетей основаны на выделении классов структурных единиц в общей структуре 3D-модели и систематизации этих структурных единиц в виде многомерной сети (*многомерная сетевая модель – MCM* [3, 4]) на основе их классификационных характеристик и количественных значений параметров каждого класса. С этой целью, введены понятия и формальные определения структурного класса, объекта структурного класса и параметрического вектора объекта структурного класса 3D-модели.

$$(1) \quad S_c^i = \left\{ s_c^{ij} \mid s_c^{ij} = F_i(\overline{E}_i(e_1^{ij}, \dots, e_n^{ij})) \right\}$$

Согласно (1), структурный класс  $S$  представляет собой множество объектов  $s$ , каждый из которых связан функционалом  $F$  с параметрическим вектором  $E$ , компонентами которого являются геометрические, конструкционные, функциональные и др. характеристики 3D-модели. В соответствии с этим, базовые структурные классы подразделяются на геометрические, конструкционные и функциональные.

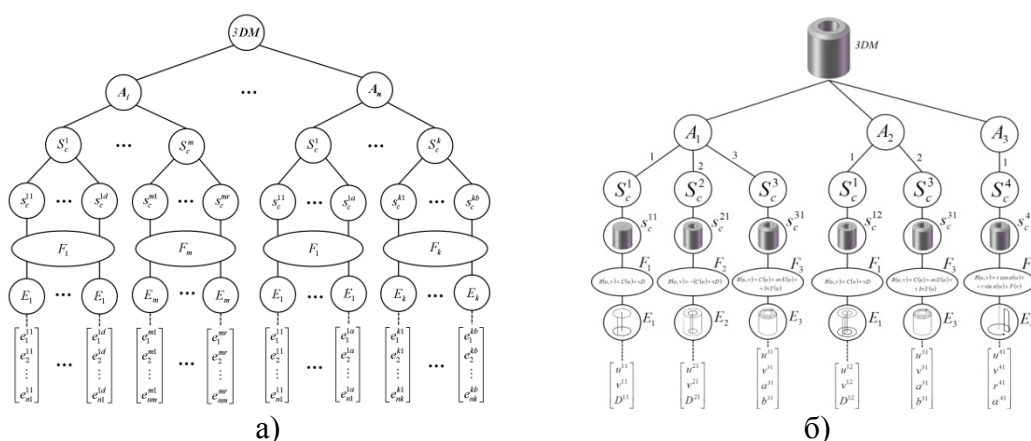


Рис. 1. а – Обобщенная формальная постановка задач анализа и синтеза 3D-моделей; б – пример формальной постановки задачи.

## 3. Декомпозиция моделируемых изделий

Исходная декомпозиция моделируемых изделий выполняется на базовые структурные классы, которые являются основой для последующего преобразования структуры 3D-модели, в том числе, при помощи формирования более сложных (комплексных) структурных классов. В соответствии с этим, введены понятия геометрической, конструкционной и функциональной декомпозиций.

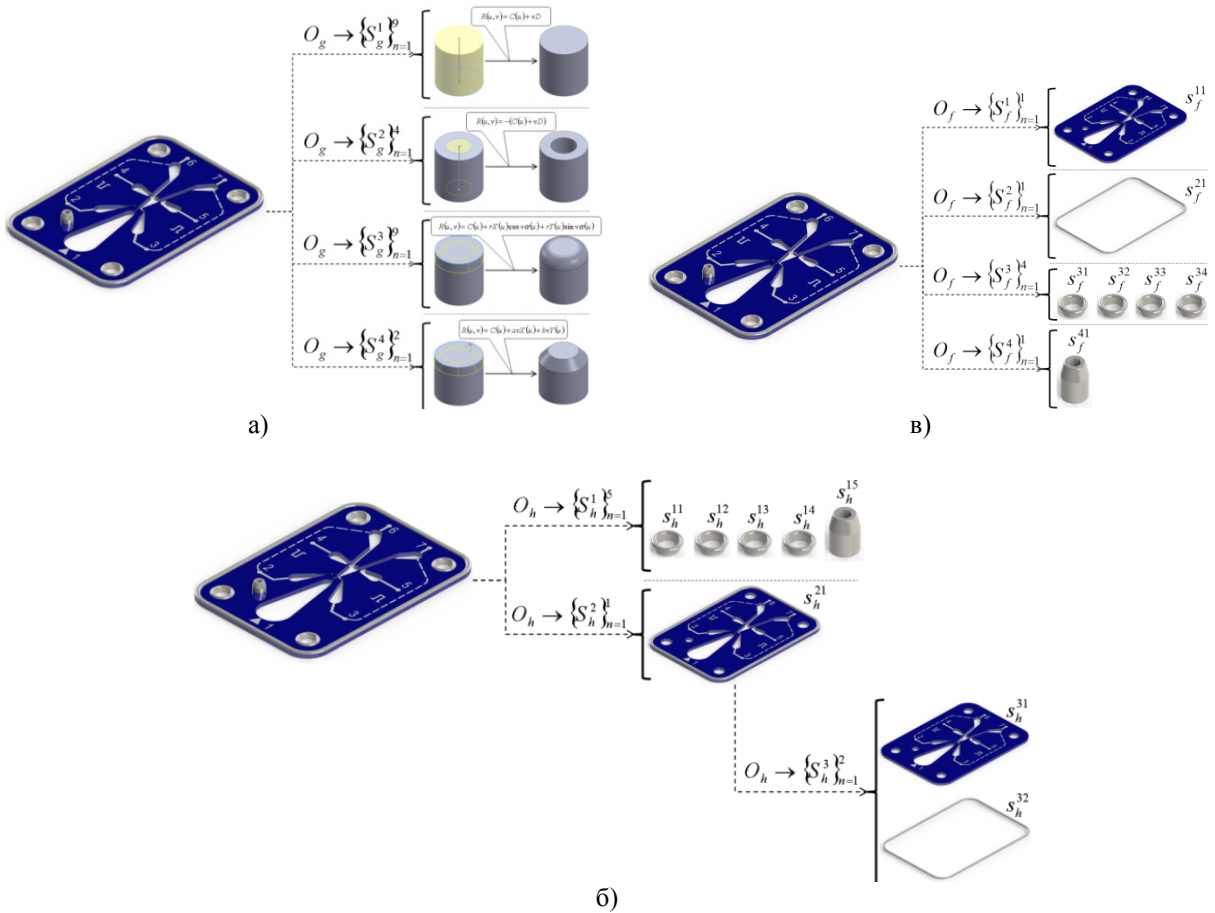


Рис. 2. Пример геометрической (а), конструкционной (б) и функциональной (в) декомпозиций струйного триггера.

$$(2) \quad O_g : 3DM \rightarrow \{S_g^i\}_{i=1}^m \mid \forall (s_g^{ia}, s_g^{ib}) \in S_g^i, \left| F_i(\bar{E}_i^a) - F_i(\bar{E}_i^b) \right| \leq \delta_g$$

На рис. 2а приведен пример геометрической декомпозиции струйного триггера. Геометрическая декомпозиция позволяет сформировать множество вариантов построения 3D-модели и может быть представлена выражением (2). Результатом операции геометрической декомпозиции является множество структурных классов таких, что для любой пары объектов одного структурного класса значения геометрического функционала, определенного на параметрическом векторе класса, отличаются не больше, чем на заданную величину  $\delta_g$ .

$$(3) \quad O_h : 3DM \rightarrow \{S_h^i\}_{i=1}^n \mid \forall (s_h^a, s_h^b) \in S_h^i, |h_a - h_b| \leq \delta_h$$

Выражение (3) отражает операцию конструкционной декомпозиции, которая выполняется по принципу иерархической структуризации изделия. Результатом декомпозиции является множество структурных классов таких, что для любой пары объектов одного структурного класса иерархические уровни, полученные при помощи вычисления конструкционных функционалов, отличаются не больше, чем на заданную величину  $\delta_h$ . Пример конструкционной декомпозиции, приведенный на рис. 2б, выполнен на основе деления струйного триггера на составные части. Для структурного класса  $S_1$  сформировано пять объектов в виде четырех втулок и одного штифта ( $s_{11}$ - $s_{15}$ ). На основе описания структурного класса  $S_2$  сформирован один объект  $s_{21}$  в виде промежуточный сборочной единицы, последующая декомпозиция которой приводит к формированию структурного класса  $S_3$  с объектами  $s_{31}$ ,  $s_{32}$  в виде рабочего профиля струйного триггера и металлического контура. Задавая различные требования к

классификационным характеристикам, можно получить качественно различные множества структурных классов, что является источником формирования множества вариантов построения иерархической структуры изделия. Например, иерархические уровни конструкции также могут быть выделены по критериям стандартизации элементов конструкции, по принципу организации технологических процессов их изготовления и др.

$$(4) \quad O_f : 3DM \rightarrow \left\{ S_f^i \right\}_{i=1}^k \mid \forall (s_f^a, s_f^b) \in S_f^i, \left( (D(f_a) - D(f_b) \leq \delta_D^i) \wedge (E(f_a) - E(f_b) \leq \delta_E^i) \right)$$

Операция функциональной декомпозиции может быть представлена выражением (4). Результатом декомпозиции является множество структурных классов таких, что для любой пары объектов одного структурного класса области определений и области значений их передаточных функций отличаются не больше, чем на заданные величины  $\delta_D$ ,  $\delta_E$ . Функциональная декомпозиция обеспечивает формирование множества структурных классов, определяющих функциональную структуру моделируемого изделия. На рис. 2в приведен пример функциональной декомпозиции струйного триггера. На основе структурного класса  $S_1$  сформирован один объект  $s_{11}$ , который соответствует струйному элементу с рабочим профилем и выполняет функцию преобразования информационных сигналов. На основе структурного класса  $S_2$  также сформирован один объект  $s_{21}$  – металлический контур, функциональное назначение которого заключается в обеспечении защиты от электростатических разрядов. Объекты  $s_{31}$ - $s_{34}$  класса  $S_3$  соответствуют четырем втулкам под крепежные винты, которые фиксируют струйный триггер в устройстве после его позиционирования при помощи штифта  $s_{41}$  (класс  $S_4$ ).

## 4. Построение многомерных сетей

Для разработки 3D-моделей струйного триггера с требуемыми характеристиками необходимо систематизировать множества объектов структурных классов, полученных в результате геометрической, конструкционной и функциональной декомпозиций, при помощи многомерных сетевых моделей (МСМ). На рис. 3 приведен пример однородной МСМ с тремя измерениями  $(i, j, k)$ , в которой отражены только функциональные структурные классы. В общем случае, количество измерений и классов МСМ может быть различным и выбирается исходя из требований к разрабатываемой конструкции. МСМ, в которой представлено несколько типов структурных классов, называется неоднородной. Вершинами МСМ являются объекты структурных классов. Количество вершин в направлении  $i$  соответствует количеству рассматриваемых структурных классов (в данном случае – функциональных). В направлении  $j$  внутри эллипсоидов расположены вершины, отражающие возможные реализации объектов соответствующего структурного класса. Петли МСМ в виде одинарных линий соответствуют операциям построения объектов структурных классов (ребра 2, 9, 11 – построение рабочего профиля, металлического контура и штифта, соответственно). Петли в виде двойных линий соответствуют множеству операций построения одинаковых объектов (ребра 4-7 – построение четырех втулок). Остальные ребра (кроме входного и выходного) отражают операции переходов между объектами структурных классов (например, конструктивно-технологические или технико-экономические показатели последовательного формирования двух объектов, соответствующих концевым вершинам ребра). Ребра по входу и выходу представляют собой комплексные операции по формированию терминальных элементов изделия (например, элементов сопряжения с внешними устройствами). Каждый уровень МСМ в

направлении  $k$  (сечение  $ij$ ) включает множество независимых операций построения объектов структурных классов, которые могут быть выполнены в любой последовательности. Всем ребрам МСМ присваиваются веса, отражающие влияние соответствующей операции на качественные характеристики разрабатываемого изделия. Лучшая реализация определяется при помощи вычисления кратчайшего пути в МСМ.

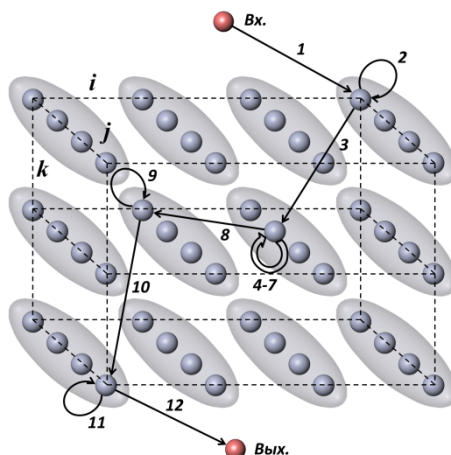


Рис. 3. Пример многомерной сетевой модели струйного триггера.

## 5. Заключение

Представленные в работе теоретические основы анализа и синтеза обеспечивают возможность разработки устройств струйной техники на основе многомерных сетей. Формирование требуемых характеристик устройств выполняется по принципам единства геометрических, конструктивных и функциональных признаков разрабатываемого изделия. Основные этапы анализа и синтеза заключаются в декомпозиции изделий на объекты структурных классов, систематизации этих объектов при помощи МСМ, оценке качества возможных реализаций изделия и выборе наилучшей реализации при помощи поиска кратчайшего пути в МСМ.

## Список литературы

1. Kasimov A.M., Mamedli E.M., Mel'nikov L.I. Issues of Design and Production of Heterogeneous Control System of Aircrafts // Sensors & Systems. 2012. No 5. P. 2-6.
2. Belyaev M.M., Kasimov A.M., Popov A.I. Measurements of Physical Parameters by Means of Pneumatic Devices with Frequency Output // Sensors & Systems. 2017. No 1. P. 49-56.
3. Балабанов А.В. Структурный синтез 3D-моделей с базовыми конструктивными элементами // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2. С. 50-54.
4. Балабанов А.В. Структурный синтез динамических 3D-моделей пространственных механизмов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 3. С. 44-46.