

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КОНСТРУКЦИЙ ДИСКРЕТНОЙ МИКРОФЛЮИДИКИ

А.В. Балабанов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: balabanov@ipu.ru

А.А. Мамонтова

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: amamontova97@gmail.com

А.А. Сухоруков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: alex1102msk@yandex.ru

Ключевые слова: многомерная сетевая модель, анализ, синтез, конструкция, дискретная микрофлюидика.

Аннотация: Выполнено развитие метода анализа и синтеза конструкций на основе многомерных сетевых моделей применительно к устройствам дискретной микрофлюидики. Предложено формальное описание процедур декомпозиции конструкций. В качестве примера, построена многомерная сетевая модель трехкаскадного микроструйного генератора.

1. Введение

В настоящее время, одним из основных этапов создания устройств дискретной микрофлюидики (УДМ) является разработка их конструкции, которая, как правило, оказывает существенное влияние на обеспечение заданных требований к показателям назначения. Однако создание УДМ с требуемыми геометрическими, структурно-иерархическими и функциональными характеристиками представляет собой сложную эвристическую задачу, что делает актуальным разработку формальных процедур анализа и синтеза возможных вариантов конструктивного исполнения изделия, а также выбора лучшего варианта по заданным критериям. Для решения указанной задачи авторами выполнено развитие метода анализа и синтеза конструкций на основе многомерных сетевых моделей (метод МСМ) [1-3]. При помощи специально разработанных формальных порождающих процедур декомпозиции метод обеспечивает возможность формирования множества элементарных структурных единиц – объектов структурных классов – для построения обобщенной структуры разрабатываемой конструкции. Объединение полученных элементов структуры в единую конструкцию выполняется по принципам единства их геометрических, структурно-иерархических и функциональных характеристик при помощи операций построения и анализа свойств многомерной сети.

2. Описание метода

При анализе и синтезе конструкций УДМ необходимо рассматривать множества вариантов их исполнения с целью выбора лучшей структуры изделия на основе заданных требований к его характеристикам. Согласно методу МСМ, основным источником формирования множества возможных вариантов конструкции является декомпозиция множества заданных характеристик изделия по принципу их принадлежности к различным структурным классам. Исходная декомпозиция разрабатываемых конструкций УДМ выполняется на основе базовых структурных классов: геометрических, иерархических и функциональных. Таким образом, выделение в конструкции УДМ множеств объектов базовых структурных классов выполняется при помощи геометрической, иерархической и функциональной декомпозиций. При этом, полученные в результате декомпозиции множества могут быть преобразованы в более сложные (комплексные) структурные классы.

$$(1) \quad O_g: \text{УДМ} \rightarrow \{S_g^i\}_{i=1}^m \mid \forall (s_g^{ia}, s_g^{ib}) \in S_g^i, E(F_g^{ia}) - E(F_g^{ib}) \leq \Delta_g$$

В результате выполнения операции геометрической декомпозиции (1) формируется множество структурных классов S_g^i таких, что для любой пары объектов (s_g^{ia}, s_g^{ib}) одного структурного класса области значений их функционалов F_g^{ia}, F_g^{ib} отличаются не больше, чем на заданную величину Δ_g – геометрическая структура разрабатываемого изделия. На рис. 1 приведен пример геометрической декомпозиции микроструйного триггера. Результатом геометрической декомпозиции являются четыре структурных класса S_g^1 - S_g^4 . Стрелками обозначены типовые геометрические операции построения триггера; над стрелками приведено математическое описание этих операций.

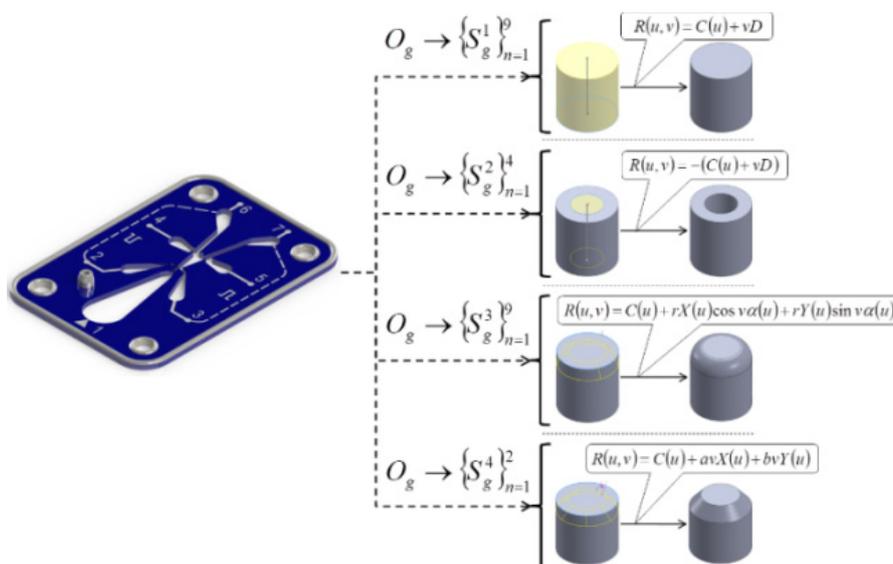


Рис. 1. Геометрическая декомпозиция микроструйного триггера.

Рассматриваемая геометрия конструкции миструйного триггера имеет множество возможных вариантов иерархического построения.

$$(2) \quad O_h: \text{УДМ} \rightarrow \{S_h^i\}_{i=1}^n \mid \forall (s_h^{ia}, s_h^{ib}) \in S_h^i, D(F_h^{ia}) - D(F_h^{ib}) \leq \Delta_h$$

Выражение (2) отражает операцию иерархической декомпозиции, которая выполняется с целью построения иерархической структуры изделия. Результатом этой декомпозиции является множество структурных классов S_h^i таких, что для любой пары объектов (s_h^{ia}, s_h^{ib}) одного структурного класса области определения их функционалов F_h^{ia}, F_h^{ib} отличаются не больше, чем на заданную величину Δ_h . На рис. 2 приведен пример иерархической декомпозиции, выполненной по принципу деления

микроструйного триггера на составные части, определенные как стандартные виды изделий. Для структурного класса S_h^1 сформировано пять объектов в виде четырех втулок и одного штифта (s_h^{11} - s_h^{15}). На основе описания структурного класса S_h^2 сформирован один объект s_h^{21} в виде промежуточный сборочной единицы, последующая декомпозиция которой приводит к формированию структурного класса S_h^3 с объектами s_h^{31} , s_h^{32} в виде рабочего профиля микроструйного триггера и металлического (антистатического) контура. Задавая различные требования к классификационным характеристикам, можно получить качественно разные множества иерархических классов, что является источником формирования множества вариантов иерархической структуры изделия. Например, иерархические классы конструкции могут быть объединены при помощи перехода от сборочной единицы к интегральному исполнению в виде детали. Также выделение иерархических классов может быть выполнено по критериям стандартизации элементов конструкции, по принципу организации технологических процессов их изготовления и др.

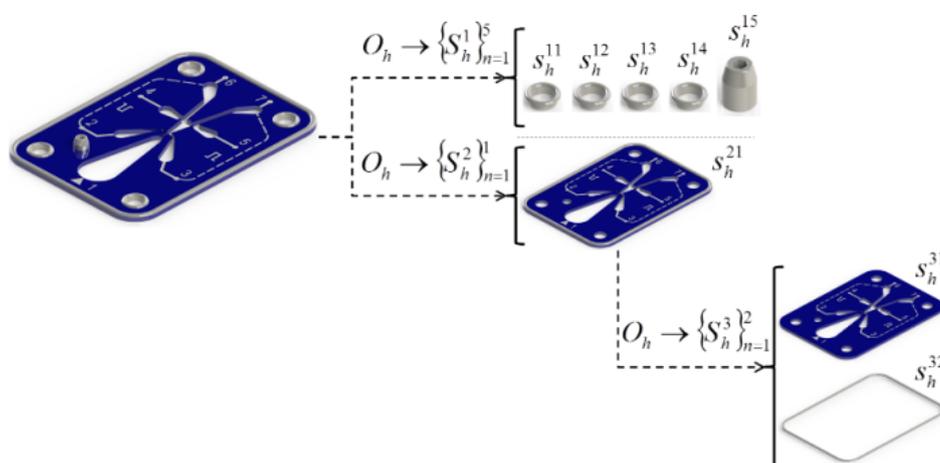


Рис. 2. Структурно-иерархическая декомпозиция микроструйного триггера.

$$(3) \quad O_f: \text{УДМ} \rightarrow \{S_f^i\}_{i=1}^k \mid \forall (s_f^{ia}, s_f^{ib}) \in S_f^i, (D(F_f^{ia}) - D(F_f^{ib}) \leq \Delta_{fD} \wedge E(F_f^{ia}) - E(F_f^{ib}) \leq \Delta_{fE}).$$

Операция функциональной декомпозиции представлена выражением (3). Результатом декомпозиции является множество структурных классов S_f^i таких, что для любой пары объектов (s_f^{ia}, s_f^{ib}) одного структурного класса области определений и области значений их функционалов F_f^{ia}, F_f^{ib} отличаются не больше, чем на заданные величины $\Delta_{fD}^D, \Delta_{fE}^E$, соответственно. Функциональная декомпозиция обеспечивает формирование множества структурных классов, определяющих функциональную структуру разрабатываемого изделия. На рис. 3 приведен пример функциональной декомпозиции микроструйного триггера. На основе структурного класса S_f^1 сформирован один объект s_f^{11} , который соответствует рабочему профилю триггера и выполняет функцию преобразования информационных сигналов. На основе структурного класса S_f^2 также сформирован один объект s_f^{21} – металлический контур, функциональное назначение которого заключается в обеспечении защиты от электростатических разрядов, которые могут оказать негативное влияние на электронные преобразователи пневматических сигналов. Объекты s_f^{31} - s_f^{34} класса S_f^3 соответствуют четырем втулкам под крепежные винты, которые фиксируют микроструйный триггер в устройстве после его позиционирования при помощи штифта s_f^{41} (класс S_f^4).

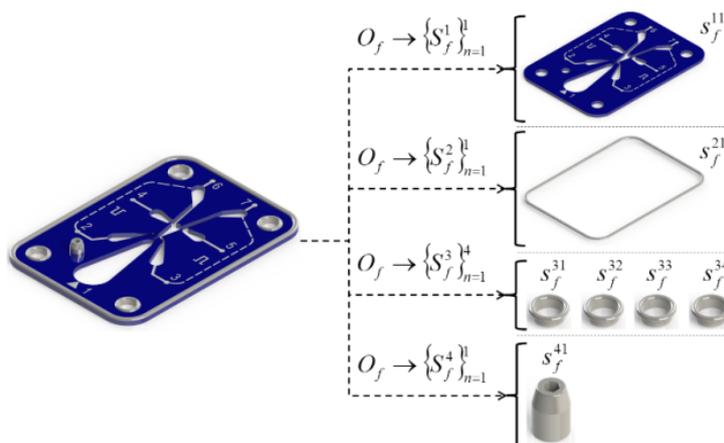
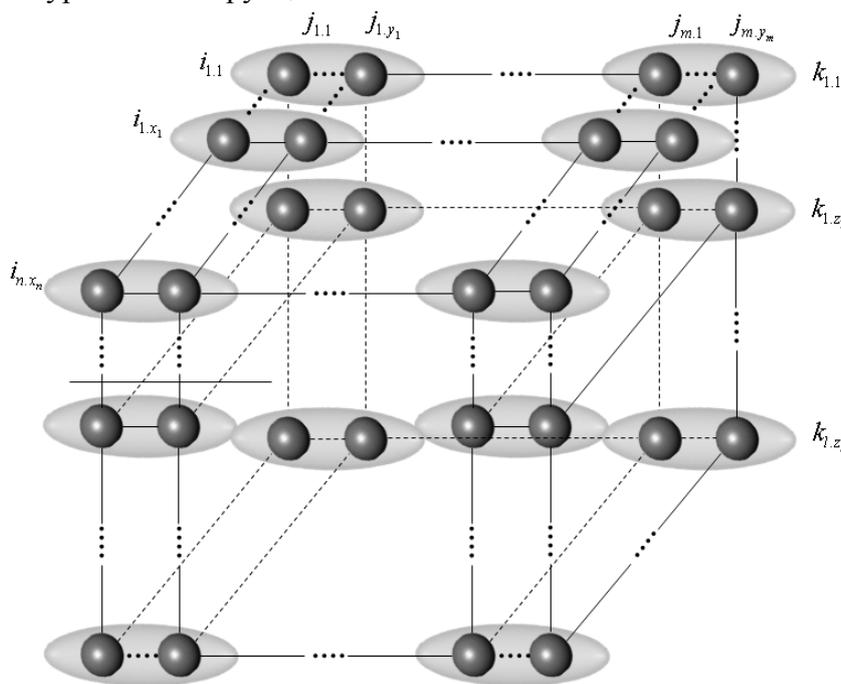


Рис. 3. Функциональная декомпозиция микроструйного триггера.

Для разработки конструкций УДМ с требуемыми характеристиками необходимо систематизировать множества объектов структурных классов, полученных в результате геометрической, структурно-иерархической и функциональной декомпозиций, при помощи МСМ. Общий вид МСМ представлен на рис. 4. Вершины МСМ отражают объекты структурных классов, ребра – операции построения этих объектов. Эллипсоидами ограничены множества объектов геометрических классов, отражающих возможные реализации одного объекта функционального класса на заданном иерархическом уровне конструкции.



$$MSM = A(p_i, p_j, p_k; \bar{E}) \quad A_{jk} - \text{функционалы структурных классов } F(\bar{E}_{jk})$$

$$p_i = n, (p_{i,1} = \overline{1, x_1}; \dots; p_{i,n} = \overline{1, x_n}) \quad p_j = m, (p_{j,1} = \overline{1, y_1}; \dots; p_{j,m} = \overline{1, y_m}) \quad p_k = l, (p_{k,1} = \overline{1, z_1}; \dots; p_{k,l} = \overline{1, z_l})$$

Рис. 4. Общий вид многомерной сетевой модели.

Количество измерений МСМ соответствует множеству выделенных структурных классов. На рис. 5 представлена МСМ микроструйного генератора с тремя измерениями (i, j, k). В общем случае, количество измерений может быть различным и выбирается исходя из сложности анализа и синтеза возможных вариантов разрабатываемой конструкции. В качестве примера, в МСМ на рис. 5 показаны два

предельных случая исполнения конструкции генератора: путь 1 соответствует полностью дискретному исполнению конструкции; путь 2 – полностью интегральному исполнению конструкции. Требуемый вариант конструкции определяется на основе заданных критериев при помощи анализа свойств МСМ, вычисления весов ребер и поиска кратчайшего пути в МСМ.

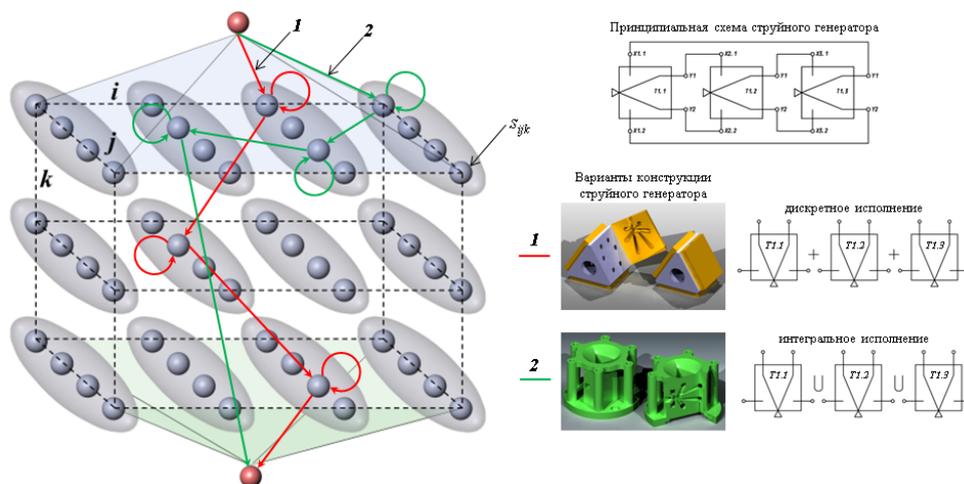


Рис. 5. Пример МСМ трехкаскадного микроструйного генератора.

3. Заключение

Таким образом, выполнено развитие метода МСМ применительно к анализу и синтезу УДМ в части декомпозиции конструкции на структурные классы и систематизации этих классов при помощи построения МСМ. Операции геометрической, иерархической и функциональной декомпозиции обеспечивают возможность формирования полной системы функционалов относительно множества показателей назначения разрабатываемой конструкции. Систематизация полученных функционалов при помощи МСМ отражает множество вариантов структуры разрабатываемого изделия с различными показателями качества (например, с различными технологическими, эксплуатационными характеристиками). На основе МСМ производится формальный анализ и синтез возможных вариантов построения конструкции и выбор варианта, наиболее удовлетворяющего заданным критериям.

Список литературы

1. Балабанов А.В., Касимов А.М., Фатеев В.Я. Разработка и изготовление экспериментального образца семикаскадного микроструйного генератора // Датчики и системы. 2021. № 1. С. 63-68.
2. Балабанов А.В., Касимов А.М. Разработка устройств струйной техники на основе многомерных сетей // Устойчивость и колебания нелинейных систем управления: Материалы XV Международной конференции (3-5 июня 2020 г., Москва) / Ред. В. Н. Тхай. М.: ИПУ РАН, 2020. С. 62-65.
3. Касимов А.М., Балабанов А.В. Метод разработки микроструйных функциональных узлов робастных резервных систем управления критическими объектами // Материалы 26-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» (ПУБСС'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. С. 284-288.