

А.О. Сухов<sup>1</sup>, Л.Н. Лядова<sup>1</sup>, С.А. Порязов<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
(Пермский филиал)  
ASuhov@hse.ru, LLyadova@hse.ru

<sup>2</sup>Институт математики и информатики БАН  
(София, Болгария)  
stoyan@cc.bas.bg

## **ГИПЕРГРАФЫ С ПОЛЮСАМИ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ РЕДАКТОРОВ ВИЗУАЛЬНЫХ ЯЗЫКОВ**

В статье рассматриваются различные способы формализации описания визуальных моделей. Предлагается новая модель для создания графических языков – гиперграф с полюсами, обеспечивающая возможность определения и реализации не только новых визуальных языков, но и дающая основу для реализации операций над моделями, построенными с помощью этих языков. Предложенная модель – расширение понятия графа с полюсами, учитывающая специфику реализации графических редакторов для DSM-платформ, реализующих не только средства определения языков и создания моделей, но и возможности задания трансформаций моделей, построенных с их помощью, с одного языка на другой.

*Ключевые слова:* визуальное моделирование, графические модели, мета-графы, гиперграфы, графы с полюсами, редакторы моделей, предметно-ориентированное моделирование, языковой инструментарий.

### **Введение**

Существует множество решений для работы с графическими моделями: различные CASE-системы и системы имитационного моделирования, системы автоматизации проектирования и управления технологическими процессами включают средства создания и анализа моделей. Средства визуального моделирования, основанные на применении специализированных предметно-ориентированных языков, упрощают создание моделей, служат основой для решения задач ана-

лиза. Однако разработка этих средств связана с определёнными проблемами, является трудоёмкой задачей. Решение этой проблемы – применение при разработке новых языков и систем моделирования специального программного обеспечения – языковых инструментариев (или DSM-платформ). Усилия многих разработчиков направлены на создание языковых инструментариев, их совершенствование [1, 2, 4, 5, 6, 14]. Такая активность характеризует направленный переход от использования стандартизованных графических нотаций к созданию собственных языков моделирования, на основе которых создаются предметно-ориентированные визуальные модели, отражающие особенности конкретных областей, специфику решаемых задач.

Возможности существующих систем визуального моделирования, создания и анализа моделей, во многом определяются математическим аппаратом, на базе которого разработаны редакторы моделей [7, 8, 9, 10, 13].

Для построения визуальных языков в DSM-платформах в качестве математической модели используются различные типы графов. В [6] показано, что использование ориентированного псевдо-метаграфа даёт значительные преимущества по сравнению с другими предлагаемыми типами графов (гиперграфами, *hi*-графами и др.). Однако существует более мощная формальная модель, которая обеспечивает определение на её основе всех рассматриваемых типов графов, – графы с полюсами, или *P*-графы [3, 11].

В [7] были сформулированы общие требования к редакторам визуальных моделей для DSM-платформ, предложена объектная модель для реализации редактора, основанная на *P*-графах. Предложенный подход обеспечивает реализацию всех перечисленных требований, но опыт разработки показал, что усовершенствование выбранной математической модели может обеспечить большую выразительность создаваемых моделей, решить проблему при определении различных типов трансформаций, задаваемых для выполнения переходов от использования одной графической нотации к другой, для решения задачи детализации моделей, их декомпозиции.

Задача данного исследования – создание новой формальной модели, обеспечивающей выполнение различных операций над моделями, создаваемыми с использованием предметно-ориентированных языков (Domain Specific Languages, DSL), обобщающей преимущества различных графовых представлений при решении задач построения и анализа моделей в различных областях исследований.

## Определение гиперграфа с полюсами

На основе анализа графических редакторов, используемых графических нотаций и языков визуального моделирования выделены следующие требования к представлению и построению моделей:

– Должна быть обеспечена возможность создания иерархических структур: модель может содержать элементы (вершины), каждый из которых имеет сложную организацию, требующую детализации (расшифровки, декомпозиции).

– Элементы модели могут быть связаны друг с другом, причём создаваемые в модели связи могут отражать сложные взаимоотношения, связи между моделируемыми объектами, а детализация моделей может потребовать не только детализировать организацию элементов-вершин в моделях, но и детализировать связи между ними.

Эти требования могут быть решены при использовании различных типов графов в качестве формальной основы при создании редакторов и средств анализа моделей, но каждый из вариантов обладает определёнными ограничениями, что приводит к усложнению модели, затрудняет её восприятие, обработку, анализ.

Обобщим различные математические модели, используемые при разработке средств визуального моделирования и анализа графовых моделей, обладающие максимальными выразительными возможностями. В качестве основы рассмотрим три типа графов.

**Определение 1.** *Метаграф* – это упорядоченная пара  $G = (X, E)$ , где  $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$  – конечное непустое множество вершин,  $E$  – множество рёбер графа. Каждое ребро  $e_k = (V_i, W_i)$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $V_i, W_i \subseteq X$ , причём  $V_i \cup W_i \neq \emptyset$ , т.е. каждое ребро метаграфа соединяет два подмножества множества вершин.

Если ребро метаграфа является направленным (дугой), то граф называется ориентированным метаграфом.

Метаграфы используются в системах, применяемых для поиска и визуализации связей, зависимостей между объектами в различных предметных областях (например, в системах Data Mining, которые занимаются обнаружением ассоциаций и последовательностей, и т.п.). Кроме этого, метаграфы применяются в системах, в которых все объекты различной природы можно разделить на несколько групп, между объектами которых устанавливаются связи (в системах моделирования, например, это могут быть множество сущностей, атрибутов, операций над ними и т.п.).

**Определение 2.** *Гиперграф* представляет собой пару  $(X, E)$ , где  $X$  – непустое множество объектов некоторой природы, называемых *вершинами гиперграфа*, а  $E$  – семейство непустых подмножеств множества  $X$ , называемых *гиперрёбрами*.

Таким образом, гиперребро объединяет вершины, представляющие некоторые объекты, характеристики и т.п., фиксируя связи различной природы между ними. Однако такое описание не даёт чёткого представления о структуре и природе связей, семантике зависимостей, поэтому не каждая предметная область или задача может быть описана с помощью гиперграфа.

**Определение 3.** *Граф с полюсами* – это упорядоченная тройка  $G = (P, V, W)$ , где  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  – абстрактное множество – множество внешних полюсов графа,  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  – непустое множество вершин,  $W = \{w_1, \dots, w_n\}$  – множество связей; при этом:

1. Каждая вершина  $v \in V$  – это подмножество множества полюсов  $P$  ( $v = \{p_{v_1}, \dots, p_{v_n}\}$ ) и  $\forall v_i \forall v_j \in V [i \neq j \rightarrow v_i \cap v_j = \emptyset]$ , т.е.  $V$  – множество взаимно не пересекающихся подмножеств полюсов.

2. В каждой вершине  $v \in V$  выделяются два подмножества:  $I(v)$  и  $O(v)$  входных и выходных полюсов:  $\forall v \in V \exists I(v) \subset P, \exists O(v) \subset P [I(v) \cup O(v) = v]$ , причём эти множества могут пересекаться, если эти множества не заданы, будем считать, что  $I(v) = O(v) = v$ .

3. Множество рёбер, описывающих связи между вершинами, определяется как подмножество множества всех пар полюсов, причём  $W \subset P \times P \setminus \text{diag}(P \times P), \forall v \in V \forall p \in v \forall r \in v [(p, r), (r, p) \notin W]$ , т.е. полюс не может быть соединён сам с собой, и связи не могут быть установлены между полюсами, принадлежащими одной вершине.

Для графа с полюсами определены операции добавления/удаления полюсов, вершин, рёбер, а также операции расшифровки вершин графами, что позволяет строить иерархические модели сложных систем и процессов, выполняя их пошаговую детализацию. Эти операции могут быть использованы в качестве основы как для разработки графических моделей, так и для их преобразований (трансформаций) на основе графовых грамматик. Однако ограничение на создание связей между полюсами одной и той же вершины затрудняет реализацию редактора моделей, где допускаются такие связи, что не является исключением при реализации языковых инструментариев для создания визуальных DSL.

Обобщение приведённых формальных моделей привело к определению нового типа графов – *гиперграфа с полюсами (HP-граф)*.

**Определение 4.** *Гиперграф с полюсами* – это упорядоченная тройка  $G = (P, V, W)$ , где  $P = \{p_1, \dots, p_n\}$  – абстрактное множество – множество внешних полюсов графа,  $V = \{v_1, \dots, v_m\}$  – непустое множество вершин,  $W = \{w_1, \dots, w_l\}$  – множество связей; при этом:

1. Каждая вершина  $v \in V$  – это подмножество множества полюсов  $P$  ( $v = \{p_{v_1}, \dots, p_{n_v}\}$ ) и  $\forall v_i \forall v_j \in V [i \neq j \rightarrow v_i \cap v_j = \emptyset]$ , т.е.  $V$  – множество взаимно не пересекающихся подмножеств полюсов.

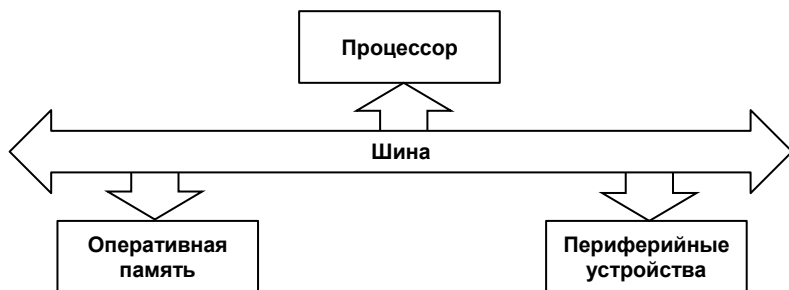
2. В каждой вершине  $v \in V$  выделяются два подмножества:  $I(v)$  и  $O(v)$  входных и выходных полюсов:  $\forall v \in V \exists I(v) \subset P, \exists O(v) \subset P [I(v) \cup O(v) = v]$ , причём эти множества могут пересекаться; если эти множества не заданы, будем считать, что  $I(v) = O(v) = v$ , т.е. по умолчанию, если множества полюсов вершины не определены, вершина представляется одним полюсом.

3. Множество рёбер, описывающих связи между вершинами, определяется как подмножество множества всех комбинаций (подмножеств) полюсов, т.е. ребро  $w \in W$  – это множество полюсов:  $w = P_w = \{p_{k_1}, \dots, p_{k_w}\} \subset P$ , где полюса  $p \in P_w$  могут принадлежать одной или нескольким вершинам, между которыми есть связи, и  $P_w \neq \emptyset$ .

Отличие от приведённого определения графа с полюсами – возможность создания «гиперрёбер», которые объединяют не отдельные полюсы из множества полюсов, принадлежащих различным вершинам, а множества полюсов, которые могут принадлежать одной или нескольким вершинам. Это позволяет визуализировать сложные связи как между парами вершин, так и между множествами вершин, причём вершина может быть связана сама с собой. В отличие от гиперграфа связи могут представлять более детальную информацию, более чётко отражающую структуру моделируемых систем, связи между объектами, их направленность.

При необходимости к «гиперребру» в  $HP$ -графе, как и к вершине, можно применить операцию расшифровки, раскрывающую структуру связи при декомпозиции модели или при её трансформации при переходе от использования одной графической нотации к другой. При выполнении этой операции связь детализируется: либо выделяются пары полюсов, входящие в соответствующее «гиперребро», либо определяется структура в виде нового  $HP$ -графа, расшифровывающая связь через новые вершины, появляющиеся на более глубоком уровне детализации модели. Направление связей при расшифровке определяется типами полюсов – их принадлежностью множествам входных и выходных полюсов соответствующих вершин.

Упрощённый пример *HP*-графа показан на рис. 1. Здесь множество вершин представляет устройства. Каждое устройство имеет множества полюсов – портов. Устройства связаны через шину, которая представляется «гиперребром», объединяющим полюса вершин, представляющих устройства компьютера, обменивающиеся информацией через шину. Причём на данном уровне детализации нет никакого представления об организации этих устройств и о структуре шины.



*Рис. 1. HP-граф – пример модели*

При детализации моделей каждая вершина может быть расшифрована графом, отображающим структуру соответствующего устройства (например, функциональные блоки процессора и связи между ними). Расшифровано может быть и «гиперребро», например: «Шина» может быть декомпозирована на шины адреса и данных, могут быть выделены также линии управления. Каждая из выделенных при декомпозиции «гиперребра» линий будет представлена парой полюсов (портов), которые соединяются через неё.

### **Заключение**

При сравнении различных формализмов, используемых при разработке графических моделей, показано [6], что наиболее подходящим формализмом описания метаязыка при создании DSM-платформы являются графовые грамматики, построенные на основе псевдо-метаграфов. Этот вид графов позволяет структурировать модель за счет объединения вершин в множества. Предлагаемая модель позволяет объединять в множества и рёбра. Это позволяет при описании сложных моделей большой размерности сделать их менее громоздкими, более простыми для восприятия. При этом операции расшифровки вершин и «гиперрёбер» в *HP*-графе позволяют выполнять декомпози-

цию моделей при их детализации и анализе, при определении правил трансформации моделей для решения различных задач.

Подобные средства построения моделей могут быть полезны при разработке моделей бизнес-процессов и их пошаговой детализации [6, 7], при разработке моделей телекоммуникационных систем и их преобразованиях в ходе анализа, оценки и оптимизации [12], т.е. при решении задач создания и анализа сложных моделей большой размерности для различных областей. Все эти возможности должны быть учтены при разработке языковых инструментариев, DSM-платформ, что обеспечит их максимальную гибкость, масштабируемость при разработке визуальных языков и моделей.

Применение *HP*-графа даёт возможность реализовать новые характеристики и операции при разработке объектной модели для графического редактора [7] и метаязыка для DSM-платформы.

### Библиографический список

1. *Брыксин Т.А.* Платформа для создания специализированных визуальных сред разработки программного обеспечения / *Т.А. Брыксин, А.Н. Терехов* // СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2016.
2. *Лядова Л.Н.* Языковой инструментарий системы MetaLanguage / *Л.Н. Лядова, А.О. Сухов* // Математика программных систем: межвуз. сб. науч. ст. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2008. – Вып. 5. – С. 40-51.
3. *Миков А.И.* Автоматизация синтеза микропроцессорных управляющих систем / *А.И. Миков* // Иркутск: Изд-во Иркут. Ун-та, 1987.
4. *Сухов А.О.* Среда разработки визуальных предметно-ориентированных языков моделирования / *А.О. Сухов* // Математика программных систем: межвуз. сб. науч. ст. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2008. – Вып. 5. – С. 84-94.
5. *Сухов А.О.* Теоретические основы разработки DSL-инструментария с использованием графовых грамматик / *А.О. Сухов* // Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – С. 35-37.
6. *Сухов А.О.* Разработка инструментальных средств создания визуальных предметно-ориентированных языков : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / *Сухов Александр Олегович.* М., 2013. 256 с.
7. *Филатов Д.Ю.* Разработка редактора визуальных моделей, основанного на Р-графах / *Д.Ю. Филатов, Л.Н. Лядова* // В кн.: Технологии разработки информационных систем (ТРИС-2017):

- Материалы VIII Международной научно-технической конференции. Ростов н/Д : Южный федеральный университет, 2017. С. 113-118.
8. *Dietrich H.-A.* Graphical Model Editors for Meta-Modelling Tools – Requirements, Conceptualisation, and Implementation / *H.-A. Dietrich, D. Breuker, M. Steinhorst, P. Delfmann, J. Becker* // Enterprise Modelling and Information Systems Architectures. – 2013. – Vol. 8, No. 2. – P. 42-78.
  9. *Goik D.* Hypergraph grammar based adaptive linear computational cost projection solvers for two and three dimensional modeling of brain / *D. Goik, M. Sieniek, M. Wozniak, A. Paszynska, M. Paszynski* // Procedia Computer Science. – 2014. Vol. 29. – P. 1002–1013.
  10. *Maximova M.* Analysis of Hypergraph Transformation Systems in AGG based on  $\mathcal{M}$ -Functors: Extended Version / *M. Maximova, H. Ehrig, C. Ermel* // Electronic Communications of the EASST. – 2013. Vol. 58: Graph Transformation and Visual Modeling Techniques. – DOI: <http://dx.doi.org/10.14279/tuj.eceasst.58.841.836>.
  11. *Mikov A.I.* Program Tools and Language for Network Simulation and Analysis / *A.I. Mikov, E.B. Zamiatina* // In: Proceedings of International Science and Technology Conference (Modern Networking Technologies) (MoNeTeC). Moscow, 2014. P. 1-9. DOI Bookmark: <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MoNeTeC.2014.6995591>.
  12. *Poryazov S.* Conceptual and Analytical Models for Predicting the Quality of Service of Overall Telecommunication Systems / *S. Poryazov, E. Saranova, I. Ganchev* // Autonomous Control for a Reliable Internet of Services. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10768. Springer, Cham, 2018. P. 151-181.
  13. *Rossini A.* A Graph Transformation-Based Semantics for Deep Metamodeling / *A. Rossini, J. de Lara, E. Guerra, A. Rutle, Y. Lamo* // In: AGTIVE 2011: 4th International Symposium on Applications of Graph Transformations with Industrial Relevance. Budapest, Hungary, 2011. Vol. LNCS, 7233. P. 19-34.
  14. *Tolvanen J.-P.* Model-Driven Development Challenges and Solutions: Experiences with Domain-Specific Modelling in Industry / *J.-P. Tolvanen, S. Kelly* // Proceedings of MODELSWARD 2016, 4th International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development. – Rome: SCITEPRESS. 2016.