О. А. Зимовец, С. И. Маторин, Интеграция средств формализации графоаналитических моделей “Узел-Функция-Объект”, *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2012, выпуск 1, 57–64

О.А. Зимовец, С.И. Маторин

Интеграция средств формализации графоаналитических моделей «Узел-Функция-Объект»[1]

Аннотация. Рассматривается новый метод формального описания систем в терминах «Узел», «Функция», «Объект», который основан на сравнительном исследовании и интеграции алгебраических средств теории паттернов Гренандера и исчисления процессов Милнера. С помощью предложенного метода формализуются процедуры декомпозиции и агрегации графоаналитических моделей «Узел-Функция-Объект».

Ключевые слова: подход «Узел-Функция-Объект», теория паттернов, исчисление процессов, формализация графических элементов, интерфейсная декомпозиция, операции на функциях.

Введение

В числе многих средств моделирования и анализа бизнес-систем и бизнес-процессов свое место занимает системно-объектный графоаналитический подход «Узел-Функция-Объект» или кратко УФО-подход [1]. Суть УФО-подхода сводится к рассмотрению любой системы (в том числе бизнес-системы или бизнес-процесса) с трех сторон. С одной стороны, как перекрестка входных и выходных связей/потоков, т.е. как ***Узла***. С другой стороны, как процесса преобразования элементов, втекающих по входным потокам, в элементы, вытекающие по выходным потокам, т.е. как ***Функции***. С третьей стороны, как материального явления, реализующего (выполняющего) функцию преобразования входа в выход, т.е. как ***Объекта***. Интеграция этих трех аспектов позволяет представить любую бизнес-систему как элемент «Узел–Функция–Объект» или УФО-элемент, формализующий три очевидных факта. Во-первых, любая система обязательно находится в структуре (является узлом) системы более высокого уровня (надсистемы). Во-вторых, любая система обязательно как-то функционирует (преобразует вход в выход). В-третьих, любая система (если она находится в структуре и функционирует) обязательно существует как материальное явление (персонал, здания, оборудование, документы и т.д.).

На основе УФО-подхода разработана УФО-технология визуального графоаналитического моделирования и анализа сложных (в первую очередь организационных) систем, которая, реализована в виде специального CASE-инструментария UFO-toolkit [2]. Анализ системы проводится средствами УФО-технологии с помощью компьютерных графических УФО-моделей, представляющих любую систему в терминах «Узел–Функция–Объект». К настоящему времени УФО-технология успешно применена, например, при проектировании системы сервисного обслуживания телевизионной и радиовещательной сети [3, 4], при проектировании системы управления наружным освещением [5].

Опыт применения УФО-подхода и УФО-технологии убедил в необходимости и возможности формализации их основных положений для повышения результативности и эффективности. В настоящее время предприняты попытки такой формализации средствами теории паттернов Гренандера [6], а также средствами пи-исчисления и исчисления процессов Милнера [7, 8]. Анализ результатов формализации показал, что для повышения степени формали-

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-07-00266).

зованности УФО-подхода и УФО-моделей актуально интегрировать алгебраические средства Гренандера и Милнера.

1. Сравнительное исследование теории паттернов и исчисления процессов

Для осуществления интеграции теории паттернов (Theory of patterns - PT) и исчисления процессов (Calculus of communication systems - CCS) сравним некоторые понятия этих подходов. Сходство и тесная связь алгебраических средств PT и CCS обнаружены и зафиксированы нами в работе [8]. Рассмотрим этот факт подробнее, основываясь на работах [9, 10]. Основная связь PT и CCS прослеживается при описании, с одной стороны, понятия «конфигурация» [9], а, с другой стороны, при описании понятия «процесс» [10]. И то, и другое понятие задается с помощью некоторого графа, определяемого составом и структурой (Табл. 1).

Анализ работ [9, 10] и представленная таблица позволяют сделать следующие выводы, которые мы также представим в табличной форме (Табл. 2 и Табл. 3).

На основании Табл. 1 можно утверждать, что аппарат CCS является более абстрактным алгебраическим аппаратом по сравнению с PT, и можно считать, что множество конфигураций представляет собой подмножество процессных графов: $\mathbf{(G, \sigma) \subset (S, R)}$.

Кроме того, с одной стороны, только в рамках CCS (без привлечения средств PT) невозможно обеспечить корректную формализацию процедур анализа\декомпозиции (Табл. 2) и синтеза\агрегации (Табл. 3) УФО-элементов и, соответственно, УФО-моделей. Отметим, что системные графоаналитические УФО-модели, получаемые средствами УФО-подхода, являются

Табл. 1. Сравнение подходов теории паттернов и исчисления процессов

Теория паттернов (PT)	Исчисление процессов (CCS)
Конфигурация **c = (G, σ)**, где **G** – множество *образующих* (вершин графа конфигурации); **σ** – множество *соединений* связей образующих (определяющих структуру графа конфигурации).	*Процесс* **P = (S, R)**, где **S** – множество «*состояний*» процесса (вершин процессного графа); **R** – множество *переходов* между состояниями процесса (определяющих структуру процессного графа).
Образующая **g** (множество которых составляет множество **G**, состоящее из непересекающихся классов) – именованный объект со связями, который характеризуется признаком α и показателями входных и выходных связей $\boldsymbol{\beta}$. Рассматривается как графический формализм. *Преобразование подобия* **S** –отображение множества **G** в себя, не выводящие образующую из своего класса.	Из множества *состояний* **S** выделено *начальное состояние* $\mathbf{s^0 \in S}$.
Тип соединения Σ –множество всех допустимых множеств соединений $\boldsymbol{\sigma}$. *Отношение согласования* (или *связи*) ρ – показатель взаимного соответствия связей ($\beta\rho\beta^*$). *Регулярная* или *допустимая* конфигурация – конфигурация, у которой для любого соединения $(\beta,\beta^*)\in\sigma\in\Sigma$ выполняется ($\beta\rho\beta^*$). *Внутренние связи* конфигурации – связи, участвующие в соединениях, предусмотренных структурой $\boldsymbol{\sigma}$. *Внешние связи* конфигурации **ext(c)** – связи, не участвующие в соединениях, предусмотренных структурой σ.	Предусматривается *размеченная система переходов* (**S**, **R**) над *множеством действий* **Act(P)**, которое разбивается на классы, именуемые *входными действиями* (α**?**), *выходными действиями* (α**!**) и *внутренними действиями* ($\alpha\tau$).

Табл.2. Выводы по составу соответствующих графов

Теория паттернов (PT)	Исчисление процессов (CCS)
Образующая $\mathbf{g_i}$ фигурирует как самостоятельная сущность, свойства которой формально определены.	Состояние $\mathbf{s_i}$ не рассматривается как самостоятельная сущность, и свойства ее не определяются.
Можно создавать иерархию конфигураций, представляя каждую образующую в конфигурации, как конфигурацию нижнего уровня иерархии.	Нет возможности создавать иерархию процессов, так как состояние нельзя представить в виде процесса (оно вообще никак не представляется).

Табл. 3. Выводы по структуре соответствующих графов

Теория паттернов (PT)	Исчисление процессов (CCS)
Граф конфигурации имеет как замкнутые внутренние связи, так и незамкнутые внешние.	Процессный граф имеет только замкнутые внутренние связи\переходы и не имеет незамкнутых внешних связей.
Можно осуществлять соединение двух и более конфигураций естественным образом через их незамкнутые связи, создавая более сложные конфигурации.	Нет возможности соединять процессы в том же самом смысле, так как они могут быть объединены только специфическим (искусственным) образом через состояния (начальные), а не через связи\переходы.

иерархическими по своей природе, поэтому построение и анализ таких моделей в принципе невозможны без использования процедур агрегации и декомпозиции.

С другой стороны, использование только PT (без привлечения средств CCS), которая обеспечивает адекватное представление узловых и объектных характеристик УФО-элемента в целом, не позволяет полноценно представить функциональные (процессуальные) его характеристики, являющиеся, по сути, внутренними для данного элемента (системы).

Основываясь на проведенном анализе, наметим пути решения задачи интеграции алгебраических средств PT и CCS для формализации УФО-подхода и УФО-моделей.

2. Новый способ формализации УФО-подхода

Рассмотрим вариант формализации УФО-элемента как графического представления системы, заимствующий понятия, манеру обозначения и символы обоих алгебраических средств. В первую очередь дадим формальное определение УФО-модели $\mathbf{M_{УФО}}$, которая представляет собой граф (также как конфигурация и процессный граф), характеризующийся составом и структурой. Вершинами этого графа служат УФО-элементы, а ребрами являются потоки (связи) их соединяющие: $\mathbf{M_{УФО}=(E, L)}$, где **E** – множество УФО-элементов; **L** – множество имен связей УФО-элементов.

Множества всех УФО-элементов **E** и всех связей **L** состоят из непересекающихся классов. Интерпретация этого разбиения состоит в том, что к одному классу элементов (и к одному классу связей) относятся элементы (и связи), принадлежащие к одному уровню (ярусу) иерархии предметной области. Более низкий уровень иерархии по сравнению с данным будем обозначать для УФО-элементов как $\mathbf{E^{-1}}$, а для связей - как $\mathbf{L^{-1}}$. Кроме того (по аналогии с работой [2]), будем рассматривать множество **L** на каждом ярусе иерархии, состоящим в свою очередь из четырех непересекающихся классов **В, Э, У** и **Д** таких, что $\mathbf{L=В\cup Э\cup У\cup Д}$. Они интерпретируются соответственно как классы вещественных связей **В**, энергетических связей **Э**, связей по управлению **У** и связей по данным **Д**. Также, по аналогии с PT, будем рассматривать для множества **E** понятие «преобразование подобия», а для множества **L** -понятия «тип соединения» $\mathbf{\Sigma}$ и «отношение согласования (или связи)» $\boldsymbol{\rho}$. При этом понятие «отношение согласования» ρ для задач моделирования бизнес-систем и бизнес-процессов целесообразно считать равенством с точностью до противоположного знака, так как в практике бизнес-моделирования рассматриваются соединения только одноименных связей, одна из которых выходная, а другая входная.

Исходным моментом формального определения системы как УФО-элемента $\mathbf{e\in E}$ является его определение в виде кортежа [1, 2]: **e=<U, F, O>**. Здесь **U** – «Узел», т.е. множество выходных и входных связей, характеризующих узел, который занимает определяемая система; **F** – «Функция», т.е. класс функций, характеризующий способы или процессы (процедуры) преобразования входных связей узла в выходные; **O** – «Объект», т.е. множество свойств (признаков), характеризующих класс объектов, которые реализуют данный класс функций.

Определим «Узел» УФО-элемента, используя принятые в CCS обозначения, следующим образом: **U=(L?, L!)**, где $\mathbf{L?\subset L}$ – множество входных связей, $\mathbf{L!\subset L}$ – множество выходных связей данного узла.

Для определения «Функции» используем предложенное ранее в работах [8, 11] определение «Функции» УФО-элемента по аналогии с определением «Процесса» в CCS. В соответствии с этим определением, «Функция»

УФО-элемента может быть представлена следующим образом:

$$\mathbf{F=(S, S^0, L\tau)},$$

где **S** – множество подпроцессов процесса, соответствующего «Функции», которые реализуются УФО-элементами, принадлежащими классу $\mathbf{E^{-1}}$; $\mathbf{S^0 \subset S}$ – множество интерфейсных (входных **S?** и выходных **S!**) подпроцессов (причем $\mathbf{S^0=S?\cup S!}$; в число входных связей множества подпроцессов **S?** входит множество связей **L?,** в число выходных связей множества подпроцессов **S!** входит множество связей **L!**); $\mathbf{L\tau \subset L^{-1}}$ – множество связей в **S**, осуществляющих передачу элементов глубинного яруса связанных подпроцессов: $\mathbf{s_i} \xrightarrow{L\tau_{ij}} \mathbf{s_j}$. Т.е. по аналогии с CCS рассматривается размеченная система переходов **(S, Lτ),** но не над множеством действий, как в CCS, а над множеством потоков (связей). Элементы множества потоков **Act(F),** соответствующего множеству действий в CCS, также интерпретируются как ввод, вывод или передача элемента (с именем потока). При этом на уровне описания «Функции» системы (УФО-элемента) нас интересуют только внутренние потоки (передача элемента), так как входные и выходные потоки описываются на уровне «Узла».

Для определения «Объекта» используем характеристики образующей как объекта со связями в РТ [9]. Это позволяет определить «Объект» УФО-элемента следующим образом:

$$\mathbf{O=(n, \alpha, \beta?, \beta!)},$$

где $\mathbf{n\in N}$ – имя «Объекта» из множества **N** имен объектов; **α** - множество признаков «Объекта» **n; β?** – множество показателей множества входных связей **L?; β!** – множество показателей множества выходных связей **L!.**

Таким образом, можно сформулировать следующее выражение в качестве формального определения некоторой конкретной системы $\mathbf{e_i}$ как УФО-элемента:

$$\mathbf{e_i = <(L_i?, L_i!), (S_i, S^0_i, L_i\tau), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>}.$$

Для решения практической задачи это определение должно быть дополнено матрицами, конкретизирующими структуру $\mathbf{L_i?\times S_i?}$ входных связей УФО-элемента $\mathbf{e_i}$, структуру $\mathbf{L_i!\times S_i!}$ выходных связей этого элемента, а также структуру $\mathbf{S_i\times S_i}$ внутренних потоков $\mathbf{(S_i, L_i\tau)}$ «Функции» УФО-элемента $\mathbf{e_i}$.

3. Формализации процедуры декомпозиции УФО-элемента

Если на каком-то этапе системного анализа УФО-элемент (система) рассматривается как целое без учета внутренней, функциональной структуры (на контекстном уровне), то выражение в скобках для «Функции» УФО-элемента будет иметь вид: $\mathbf{(\{s^0_i\in S_i\}, \{s^0_i\in S^0_i\}, L_i\tau=\varnothing)}$. Иными словами, в этом случае рассматривается УФО-элемент с нулевой «Функцией», определенной в работах [8, 11] по аналогии с нулевым (пустым) процессом в CCS. Тогда на данном уровне рассмотрения системы (на уровне контекстной модели) выражение для системы как УФО-элемента будет выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{e_i = <(L_i?, L_i!), (\{s^0_i\}), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>}.$$

При решении практических задач средствами визуального графоаналитического моделирования невозможно обойтись без учета внутренней, функциональной структуры УФО-элемента. Т.е. УФО-элементы необходимо рассматривать не только на контекстном уровне, но и на уровне декомпозиции. Особый интерес представляет декомпозиция системы (УФО-элемента) только на интерфейсные подсистемы (подпроцессы). Особую роль такой декомпозиции (ее предлагается называть *интерфейсной*) можно обнаружить на многочисленных примерах функционального моделирования [12]. Введем для нее формальное определение.

Определение. Декомпозиция системы называется интерфейсной при условии, что $\mathbf{S=S^0}$.

В соответствии с данным определением, выражение в скобках для «Функции» УФО-элемента с учетом внутренней структуры в случае интерфейсной декомпозиции будет иметь вид: $\mathbf{(S^0_i, S^0_i, L_i\tau_{?!})}$. Тогда, на первом шаге декомпозиции системы, поскольку $\mathbf{S^0_i=S_i?\cup S_i!}$, выражение для системы как УФО-элемента приобретает следующий вид:

$$\mathbf{e_i = <(L_i?, L_i!), ((S_i? \cup S_i!), (S_i? \cup S_i!), L_i\tau_{?!}), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>}.$$

Упростим запись, исключая повторение одного и того же набора значков и показывая реальное место внутреннего потока. В результате получаем следующее выражение для УФО-элемента на первом шаге интерфейсной декомпозиции системы:

$$\mathbf{e_i = <(L_i?, L_i!), (S_i?, L_i\tau_{?!}, S_i!), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>}.$$

В отношении интерфейсной декомпозиции справедливо следующее утверждение.

Утверждение. Если на уровне декомпозиции внутренняя функциональная структура УФО-элемента характеризуется условием $\mathbf{L\tau_{?!}=\{l\tau_{?!}\}}$ (т.е. является одноэлементным множеством), то ее тип соединения $\boldsymbol{\Sigma}$ есть «линейный порядок», а декомпозиция является интерфейсной.

Доказательство. Из выполнения условия $\mathbf{L\tau_{?!}=\{l\tau_{?!}\}}$ непосредственно следует, что $\mathbf{S/S^0=\varnothing}$. Из последнего, в свою очередь, следует, что $\mathbf{S=S^0}$, т.е. по определению имеет место интерфейсная декомпозиция. Если $\mathbf{L\tau_{?!}=\{l\tau_{?!}\}}$, то выходная связь первого подпроцесса соединена с входной связью последнего, что соответствует определению типа соединения $\boldsymbol{\Sigma}$ как «линейный порядок» в РТ ([9]).

В случае интерфейсной декомпозиции с линейным порядком последнее выражение для УФО-элемента на первом шаге декомпозиции системы будет иметь вид:

$$\mathbf{e_i = <(L_i?, L_i!), (\{s_i?\}, \{l\tau_{?!}\}, \{s_i!\}), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>.}$$

Интерфейсная декомпозиция с линейным порядком используется при решении ряда практических задач функционального бизнес-моделирования. В частности, она применима при моделировании административных процедур для оказания государственных и муниципальных услуг населению в электронном виде в рамках государственной программы «Электронная Россия». При этом большинство графоаналитических моделей административных процедур, рассматриваемых как УФО-элементы, формализуется на контекстном уровне с помощью выражения:

$$\mathbf{e_i = <(\{l_i?\}, \{l_i!\}), (\{s^0{}_i\}), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>,}$$

а на уровне одного шага декомпозиции – с помощью выражения:

$$\mathbf{e_i = <(\{l_i?\}, \{l_i!\}), (\{s_i?\}, \{l_i\tau_{?!}\}, \{s_i!\}), (n_i, \alpha_i, \beta_i?, \beta_i!)>,}$$

где $\mathbf{l_i?\in L_i?}$, $\mathbf{l_i!\in L_i!}$, $\mathbf{s^0{}_i\in S^0{}_i}$, $\mathbf{s_i?\in S_i?}$, $\mathbf{s_i!\in S_i!}$, $\mathbf{l_i\tau_{?!}\in L_i\tau}$.

4. Формализация процедуры агрегации УФО-элементов

Системный анализ с применением графоаналитических УФО-моделей предполагает не только проведение операции декомпозиции, но и операции агрегации УФО-элементов модели. Для обеспечения полноценной формализации таких моделей операция агрегации, так же как и рассмотренная выше операция декомпозиции, должна быть представима с помощью предлагаемого алгебраического аппарата.

Рассмотрим подход к формализации агрегирования систем как УФО-элементов, в первую очередь, на примере двух бинарных УФО-элементов $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$, представляемых на контекстном уровне с помощью следующих выражений:

$$\mathbf{e_i = <(\{l_i?\}, \{l_i!\}), (\{s^0{}_i\}), (\beta_i?, \beta_i!)>,}$$
$$\mathbf{e_j = <(\{l_j?\}, \{l_j!\}), (\{s^0{}_j\}), (\beta_j?, \beta_j!)>.}$$

Для решения данной задачи параметры «Объекта» $\mathbf{n}$ и $\boldsymbol{\alpha}$ не существенны, поэтому для сокращения записи здесь и далее они не учитываются. При таком способе формализации графоаналитических УФО-моделей условия агрегации УФО-элементов, сформулированные в работе [2], как «*правила системной декомпозиции»,* уточняются следующим образом. Две системы $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$, представляемые в виде УФО-элементов, могут быть агрегированы в одну систему (в один УФО-элемент $\mathbf{e_{ij}}$), если выполняется, хотя бы одна пара условий: либо, во-первых, $\mathbf{l_i!=l_j?}$ и $\mathbf{\beta_i!\subseteq\beta_j?}$; либо, во-вторых, $\mathbf{l_i?=l_j!}$ и $\mathbf{\beta_i?\supseteq\beta_j!}$. Иными словами, УФО-элементы агрегируются в соответствии с правилами выполнения операции «*присоединения*» *алгебры изображений* в РТ [9].

Подобный уровень формализации показывает, что соответствие узловых (структурных) и объектных (субстанциальных) характеристик является необходимым и достаточным условием агрегации систем в систему более высокого яруса (надсистему). И действительно, чтобы только собрать систему из некоторых частей, не требуется знаний об алгоритмах их функционирования. Достаточно возможности стыковки этих частей на уровне интерфейсов, т.е. на уровне имен связей и характеристик этих связей.

Однако полное понимание и анализ системы, возникающей в результате сборки, невозможны без учета ее функционирования как целого. В результате агрегирования УФО-элементов появляется новая функциональность, для формального описания которой воспользуемся определениями операций на функциях, сформулированными по аналогии с операциями на процессах в CCS впервые в работе [11], однако уточненными и дополненными в данной работе (Табл.4).

Табл. 4. Операции на процессах и функциях

Исчисление процессов (CCS)	УФО-подход
Процесс: $\mathbf{P = (S, s^0, R)}$	*Функция*: $\mathbf{F = (S, S^0, L\tau)}$
Префиксное действие: $\alpha.\mathbf{P = (S \cup \{s^{0\prime} \notin S\}, s^{0\prime}, R \cup \{s^{0\prime}}, \alpha, \mathbf{s^0\})}$, где запись $\mathbf{s^{0\prime}}, \alpha, \mathbf{s^0}$ обозначает связь/переход α между состояниями $\mathbf{s^{0\prime}}$ и $\mathbf{s^0}$	Префиксное действие: $\mathbf{s?.F = (S \cup \{s? \notin S\}, \{s? \in S?\}, L\tau \cup \{s?, l\tau_{?i}, \{s_i \in S\}\})}$ Постфиксное действие: $\mathbf{s!.F = (S \cup \{s! \notin S\}, \{s! \in S!\}, L\tau \cup \{\{s_i \in S\}, l\tau_{i!}, s!\})}$
Альтернативная композиция: $\mathbf{P_1+P_2 = (S_1 \cup S_2 \cup \{s^{0\prime} \notin S_1 \cup S_2\}, s^{0\prime}, R_1 \cup R_2 \cup \{(s^{0\prime}}, \alpha, \mathbf{s_1) \mid (s^0_1}, \alpha, \mathbf{s_1) \in R_1\} \cup \{(s^{0\prime}}, \alpha, \mathbf{s_2) \mid (s^0_2}, \alpha, \mathbf{s_2) \in R_2\})}$	Альтернативная композиция по входу: $\mathbf{s?.(F_1+F_2) = (S_1 \cup S_2 \cup \{s? \notin S_1 \cup S_2\}, \{s? \in S_1? \cup S_2?\}, L\tau_1 \cup L\tau_2 \cup \{s?, l\tau_{?1}, s_1\} \cup \{s?, l\tau_{?2}, s_2\})}$ Альтернативная композиция по выходу: $\mathbf{s!.(F_1+F_2) = (S_1 \cup S_2 \cup \{s! \notin S_1 \cup S_2\}, \{s! \in S_1! \cup S_2!\}, L\tau_1 \cup L\tau_2 \cup \{s_1, l\tau_{1!}, s!\} \cup \{s_2, l\tau_{2!}, s!\})}$

В связи с введением интерфейсной декомпозиции особый интерес представляют определения операций на функциях, рассматриваемых на контекстном уровне, т.е. для случая $\mathbf{F_i=(\{s^0_i \in S_i\}, \{s^0_i \in S^0_i\}, L_i\tau=\varnothing)=s^0_i}$. В этом случае представленные в Табл. 4 определения примут следующий вид:

«Префиксное действие»:

$$\mathbf{s?.\ s^0_i =(\{s^0_i\} \cup \{s?\}, \{s?\}, \{s?, l\tau_{?i}, \{s^0_i\}\})=(\{s_i, s?\}, \{s?, s_i!\}, \{s?, l\tau_{?i}, \{s_i!\}\})=(\{s?\}, \{l\tau_{?i},\},\{s_i!\})};$$

«Постфиксное действие»:

$$\mathbf{s!.\ s^0_i = (\{s^0_i\} \cup \{s!\}, \{s!\}, \{\{s^0_i\}, l\tau_{i!}, s!\})=(\{s_i, s!\}, \{s_i?, s!\}, \{\{s_i?\}, l\tau_{i!}, s!\})=(\{s_i?\}, \{l\tau_{i!},\},\{s!\})};$$

«Альтернативная композиция по входу»:

$$\mathbf{s?.(s^0_1+s^0_2) = (\{s^0_1\} \cup \{s^0_2\} \cup \{s?\}, \{s?\}, \{s?, l\tau_{?1}, s^0_1\} \cup \{s?, l\tau_{?2}, s^0_2\}) = (\{s_1, s_2, s?\}, \{s?, s_1!, s_2!\}, \{l\tau_{?1}, l\tau_{?2}\})};$$

«Альтернативная композиция по выходу»:

$$\mathbf{s!.(s^0_1+s^0_2) = (\{s^0_1\} \cup \{s^0_2\} \cup \{s!\}, \{s!\}, \{s^0_1, l\tau_{1!}, s!\} \cup \{s^0_2, l\tau_{2!}, s!\}) = (\{s_1, s_2, s!\}, \{s_1?, s_2?, s!\}, \{l\tau_{1!}, l\tau_{2!}\})}.$$

Из приведенных определений видно, что для операций «Префиксное действие» и «Постфиксное действие» на функциях $\mathbf{s^0_i}$ и $\mathbf{s^0_j}$ справедливы следующие очевидные равенства: $\mathbf{s^0_i?.s^0_j=s^0_j!.s^0_i}$ и $\mathbf{s^0_i!.s^0_j=s^0_j?.s^0_i}$. Кроме того, для операций «Альтернативная композиция по входу» и «Альтернативная композиция по выходу» возможно их объединение в одну следующим образом:

$$\mathbf{s?.\ s!.\ (s^0_1+s^0_2)=(\{s^0_1\} \cup \{s^0_2\} \cup \{s?\} \cup \{s!\}, \{s?\} \cup \{s!\}, \{s?, l\tau_{?1}, s^0_1\} \cup \{s?, l\tau_{?2}, s^0_2\} \cup \cup \{s^0_1, l\tau_{1!}, s!\} \cup \{s^0_2, l\tau_{2!}, s!\})=(\{s_1, s_2, s?, s!\}, \{s?, s!\}, \{l\tau_{?1}, l\tau_{?2}, l\tau_{1!}, l\tau_{2!}\})}.$$

Допустим теперь, что первая пара условий агрегирования для упомянутых выше элементов $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$, выполняется. Тогда, соединяя элементы $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$, получаем систему $\mathbf{e_{ij}}$, представляемую выражением:

$$\mathbf{e_{ij} = <(\{l_i?\}, \{l_j!\}), (\{s^0_{ij}\}), (\beta_i?, \beta_j!)>},$$

в котором в соответствии с операцией «Префиксное действие» (см. Табл. 4 и уточнение к ней) функциональность элемента $\mathbf{e_{ij}}$ может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s^0_{ij} = s^0_i?.s^0_j = (\{s_i?\}, \{l\tau_{ij}\}\ \{s_j!\})}.$$

Если выполняется вторая пара условий агрегирования, то, соединяя элементы $\mathbf{e_j}$ и $\mathbf{e_i}$, получаем систему $\mathbf{e_{ji}}$, представляемую выражением:

$$\mathbf{e_{ji} = <(\{l_j?\}, \{l_i!\}), (\{s^0_{ji}\}), (\beta_j?, \beta_i!)>},$$

в котором в соответствии с операцией «Постфиксное действие» (Табл.4 и уточнение к ней) функциональность элемента $\mathbf{e_{ji}}$ может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s^0_{ji} = s^0_i!.s^0_j = (\{s_j?\}, \{l\tau_{ji}\}\ \{s_i!\})}$$

Кроме графоаналитических УФО-моделей, формализуемых с помощью конфигураций, у которых тип соединения $\mathbf{\Sigma}$ является «линейным порядком», практический интерес представляют модели, у которых тип соединения $\mathbf{\Sigma}$ является «деревом» в соответствии с их определениями в РТ [9]. Такой тип соединения возникает, например, если в модели необходимо отобразить элемент принятия решения с возможными альтернативами, что, в частности, соответствует условному оператору языка программирования «if...then...else...».

Для алгебраического описания агрегирования УФО-элементов в конфигурацию с типом соединения «дерево» воспользуемся операциями «Альтернативная композиция по входу» и «Альтернативная композиция по выходу» (Табл.4). Будем рассматривать три элемента.

В первую очередь рассмотрим элементы $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$ в том же значении, что и ранее, считая их элементами, соответствующими двум альтернативным потокам работ. Кроме того, введем элемент

$$\mathbf{e_k = <(\{l_k?\}, \{l_{k1}!, l_{k2}!\}), (\{s^0{}_k\}), (\beta_k?, \beta_{k1}!\cup\beta_{k2}!)>},$$

представляющий собой элемент проверки некоторого условия. Предположим, что выше упомянутое условие агрегирования выполняется таким образом, что $\mathbf{l_{k1}!=l_i?}$, $\mathbf{\beta_{k1}!\subseteq\beta_i?}$; $\mathbf{l_{k2}!=l_{j1}?}$, $\mathbf{\beta_{k2}!\subseteq\beta_{j1}?}$. Тогда, подсоединяя элемент $\mathbf{e_k}$ к элементам $\mathbf{e_i}$ и $\mathbf{e_j}$, получим систему $\mathbf{e_{ijk}{}^P}$, которая обеспечивает разветвление потоков работ, представляемую выражением:

$$\mathbf{e_{ijk}{}^P = <(\{l_k?\}, \{l_i!, l_j!\}), (\{s^0{}_{ijk}{}^P\}), (\beta_k?, \beta_i!\cup\beta_j!)>},$$

в котором в соответствии с операцией «Альтернативная композиция по входу» функциональность элемента $\mathbf{e_{ijk}{}^P}$ может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s^0{}_{ijk}{}^P = s^0{}_k?.(s^0{}_i + s^0{}_j) =}$$
$$\mathbf{(\{s_i, s_j, s_k\}, \{s_k?, s_i!, s_j!\}, \{l\tau_{ki}, l\tau_{kj}\}).}$$

Если имеет место разделение потоков работ, то рано или поздно будет происходить и их слияние. Рассмотрим вариант алгебраического описания агрегации УФО-элементов, в которых происходит слияние потоков. Будем рассматривать элемент $\mathbf{e_i}$ в том же значении, что и ранее, как элемент одного из альтернативных потоков работ, элемент проверки условия $\mathbf{e_k}$ – в упрощенном виде как

$$\mathbf{e_k = <(\{l_k?\}, \{l_k!\}), (\{s^0{}_k\}), (\beta_k?, \beta_k!)>)},$$

а элемент слияния потоков в одну из альтернатив $\mathbf{e_j}$, наоборот, в усложненном виде как

$$\mathbf{e_j = <(\{l_{j1}?, l_{j2}?\}, \{l_j!\}), (\{s^0{}_j\}), (\beta_{j1}?\cup\beta_{j2}?, \beta_j!)>).}$$

Предположим, что выше упомянутое условие агрегирования выполняется таким образом, что $\mathbf{l_i!=l_{j1}?}$, $\mathbf{\beta_i!\subseteq\beta_{j1}?}$; $\mathbf{l_k!=l_{j2}?}$, $\mathbf{\beta_k!\subseteq\beta_{j2}?}$. Тогда, подсоединяя элементы $\mathbf{e_i}$, и $\mathbf{e_k}$ к элементу $\mathbf{e_j}$, получаем систему $\mathbf{e_{ijk}{}^C}$, которая обеспечивает слияние потоков работ, представляемую выражением:

$$\mathbf{e_{ijk}{}^C = <(\{l_i?, l_k?\}, \{l_j!\},), (\{s^0{}_{ijk}{}^C\}), (\beta_i?\cup\beta_k?, \beta_j!)>},$$

в котором в соответствии с операцией «Альтернативная композиция по выходу» функциональность элемента $\mathbf{e_{ijk}{}^C}$ может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s^0{}_{ijk}{}^C = s^0{}_j!.(s^0{}_i + s^0{}_k) =}$$
$$\mathbf{(\{s_i, s_j, s_k\}, \{s_i?, s_k?, s_j!\}, \{l\tau_{ij}, l\tau_{kj}\}).}$$

Рассмотрим теперь часто встречающуюся на практике ситуацию, когда и разветвление потоков работ, и их слияние происходят на одних и тех же трех элементах. Рассмотрим элемент одного из альтернативных потоков $\mathbf{e_i}$ в том же значении, что и во всех предыдущих случаях, элемент проверки условия $\mathbf{e_k}$ – в том же значении как и для разветвления потоков, а элемент слияния потоков $\mathbf{e_j}$ – как в предыдущем случае. Предположим, что выше упомянутое условие агрегирования выполняется таким образом, что $\mathbf{l_{k1}!=l_i?}$, $\mathbf{\beta_{k1}!=\beta_i?}$; $\mathbf{l_{k2}!=l_{j1}?}$, $\mathbf{\beta_{k2}!\subseteq\beta_{j1}?}$; $\mathbf{l_i!=l_{j2}?}$, $\mathbf{\beta_i!=\beta_{j2}?}$. Тогда, подсоединяя элементы $\mathbf{e_i}$, $\mathbf{e_k}$ и $\mathbf{e_j}$ друг к другу, получаем систему $\mathbf{e_{ijk}{}^{PC}}$, которая обеспечивает и разветвление, и слияние потоков работ одновременно, представляемую выражением:

$$\mathbf{e_{ijk}{}^{PC} = <(\{l_k?\}, \{l_j!\}), (\{s^0{}_{ijk}{}^{PC}\}), (\beta_k?, \beta_j!)>},$$

в котором в соответствии с объединенной операцией «Альтернативная композиция по входу» и «Альтернативная композиция по выходу» при условии, что $\mathbf{s^0{}_2=s^0{}_j!}$ (Табл.4), функциональность элемента $\mathbf{e_{ijk}{}^{PC}}$ может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{s^0{}_{ijk}{}^{PC} = s^0{}_k?.\ s^0{}_j!.\ (s^0{}_i+s^0{}_j)=(\{s^0{}_i\} \cup\{s^0{}_j\} \cup\{s^0{}_k?\},}$$
$$\mathbf{\{s^0{}_k?\}\cup\{s^0{}_j!\}, \{s^0{}_k?, l\tau_{?i}, s^0{}_i\}\cup}$$
$$\mathbf{\cup\{s^0{}_k?, l\tau_{?j}, s^0{}_j\}\cup\{s^0{}_i, l\tau_{i!}, s^0{}_j!\})=}$$
$$\mathbf{(\{s_i, s_j, s_k\}, \{s_k?, s_j!\}, \{l\tau_{ki}, l\tau_{kj}, l\tau_{ij}\}).}$$

Заключение

Разработан новый метод формального описания систем в терминах «Узел», «Функция», «Объект» на основе сравнительного исследования и интеграции алгебраических средств теории паттернов Гренандера и исчисления процессов Милнера, что позволило сформулировать основные понятия исчисления систем как трехэлементных конструкций «Узел-Функция-Объект».

Разработан способ формализации визуальных графоаналитических моделей административных процедур на основе анализа выполнения административных процессов и применением основных понятий исчисления систем как элементов «Узел-Функция-Объект». Это позволило предложить и формально описать специальный интерфейсный метод декомпозиции административных процедур; формализовать процедуру агрегации элементов графоаналитических моделей административных процедур в конфигурацию с соединениями типа «линейный порядок» и «дерево»; формализовать нелинейные элементы графоаналитических моделей административных процедур (элементы разветвления и слияния потоков работ); усовершенствовать определение условий агрегации («правил системной декомпозиции») элементов «Узел-Функция-Объект»; сформулировать новую операцию на функциях и уточнить определения операций, сформулированные ранее.

Предложенные формальные средства успешно применяются для моделирования и анализа административных процедур в целях оказания государственных и муниципальных услуг населению в электронном виде в рамках государственной программы «Электронная Россия».

Авторы благодарят профессора А.Б. Петровского за сделанные замечания.

Литература

1. Маторин С.И. О новом методе системологического анализа, согласованном с процедурой объектно-ориентированного проектирования. Часть 2 // Кибернетика и системный анализ. -2002. - №1. - С.118-130.
2. Маторин С.И., Попов А.С., Маторин В.С. Моделирование организационных систем в свете нового подхода «Узел-Функция-Объект». // Научно-техническая информация. Сер. 2. - 2005. - №1. - С. 1-8.
3. Маторин С.И., Зимовец О.А., Трубицин С.Н. Визуальные графоаналитические модели для представления о сервисном обслуживании телерадиосети // Искусственный интеллект и принятие решений. - 2008. – №3. – С. 52-63.
4. Маторин С.И., Трубицин С.Н., Зимовец О.А., Жихарев А.Г. Системно-объектное моделирование сервисной службы телевизионной и радиовещательной сети // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2009.- №3. –С. 75-87.
5. Михелев М.В. , Маторин С.И. Моделирование бизнес-процессов в управлении наружным освещением. // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. - 2009. - №3. - С. 136-139.
6. Маторин С.И., Ельчанинов Д.Б. Применение теории паттернов для формализации системологического УФО-анализа // Научно-техническая информация. Сер.2. - 2002. - №11. - С. 1-11.
7. Михелев М.В., Маторин С.И. Формализация УФО-элементов с помощью алгебраического аппарата ПИ-исчисления. // Научные ведомости БелГУ. Сер. «Информатика». - 2010. - №19(90). - Выпуск 16/1. – С. 145-150.
8. Жихарев А.Г., Маторин С.И. Метод формализации организационных знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. - №2. – С. 52-63
9. Гренандер У. Лекции по теории образов. 1. Синтез образов. // Пер с англ. - М.: Мир. - 1979. – 384 с.
10. Milner R., Parrow J., Walker D.A. Calculus of Mobile Processes - Part I. LFCS Report 89-85. University of Edinburgh. 1989. – 46 p.
11. Жихарев А.Г. , Маторин С.И. О новом формализованном методе представления организационных знаний // Научные ведомости БелГУ. Сер. «Информатика». – 2010. - №19(90). – Выпуск 16/1. – С. 133-140.
12. Дубейковский В.И. Практика функционального моделирования с AllFusion Process Modeler 4.1. Где? Зачем? Как? – М.: ДИАЛОГ – МИФИ. - 2004 – 464 с.

Зимовец Ольга Анатольевна. Аспирант Белгородского государственного университета. Окончила Белгородский государственный университет в 2003 году. Автор 30 печатных работ. Область научных интересов: системный анализ, семантика, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: ozimovets@bsu.edu.ru.

Маторин Сергей Игоревич. Профессор кафедры прикладной информатики Белгородского государственного университета. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники в 1977 году. Доктор техн. наук, профессор. Автор более 150 печатных работ. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, семантика, когнитология, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология.
E-mail: matorin@bsu.edu.ru.