УДК 004.82

А.Г. Жихарев, С.И. Маторин, П.А. Бузов, В.А. Комарова

A.G. Zhikharev, S.I. Matorin, P.A. Buzov, V.A. Komarova

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**ALGORITHMIC AND SOFTWARE TOOLS FOR SIMULATION OF EVOLUTION PROCESSES OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS**

*В работе рассматриваются некоторые элементы исчисления систем как функциональных объектов. Предложенным авторами формальным основам исчисления систем предшествовали исследования по разработке математического аппарата, позволяющего формализовать процедуры разработки системно-объектных имитационных моделей процессов и систем. В работе разработанный ранее формальный аппарат дополняется оператором контекста, а также формулируются и доказываются некоторые теоремы, связанные со структурными и функциональными характеристиками моделируемых объектов.*

*Ключевые слова: оператор контекста, исчисление систем, системно-объектный способ представления знаний, системно-объектная модель, общая теория систем, узловой объект, потоковый объект, структурные характеристики системы.*

*The paper considers some elements of the calculus of systems as functional objects. The formal foundations of calculating systems proposed by the authors were preceded by research on the development of a mathematical apparatus that allows one to formalize the procedures for developing system-object simulation models of processes and systems. In the work, the previously developed formal apparatus is supplemented by the context operator, and some theorems related to the structural and functional characteristics of the objects being modeled are formulated and proved.*

*Keywords: context operator, calculus of systems, system-object way of representing knowledge, system-object model, general systems theory, nodal object, stream object, structural characteristics of the system.*

Введение

Для решения задач информационно-аналитического сопровождения деятельности организационных систем авторами разработан системно-объектный метод представления знаний (СОМПЗ), обладающий рядом существенных преимуществ [1]. К его преимуществам относятся возможности графического представления знаний, возможность формализации этих графических представлений и возможность преобразования графического представления в имитационную модель [2]. Формализация СОМПЗ приводит к необходимости большей формализации системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» (УФО-подход) [3], на котором и основан данный метод представления знаний.

Приведем некоторые результаты исследований в этом направлении, полученные с привлечением алгебраического аппарата исчисления объектов Абади-Кардели [4].

1. Основы исчисления систем как функциональных объектов

Рассмотрим некоторые элементы исчисления систем как функциональных объектов на примере абстрактной системы, графоаналитическое представление которой представлено на рисунке 1. Следует отметить, что обозначения входных и выходных потоковых объектов, а также других элементов системно-объектной модели используются в работе в соответствии с ранее разработанными формальными основами исчисления систем, описанными в работе [5].



Рисунок 1 - Системно-объектная модель абстрактной системы.

В соответствии с исчислением систем как функциональных объектов [6] рассмотрим формальное представление модели в следующем виде:

*M=(L,S,C),* (1.1)

где:

*L* – множество потоковых объектов модели (иерархия связей системы) [7]. Каждый потоковый объект представлен набором именованных полей, содержащих значения потокового объекта [7]. Для рассматриваемого примера множество имеет вид:

*L={l1,l2,l3,l4,l5,l6,l7,l8,l9}.*  (1.2)

*S* – множество узловых объектов модели (подсистем) [6]. Узловой объект, в терминах исчисления систем как функциональных объектов [8], представлен в следующем виде:

*s = [(L?, L!); f(L?)L!; (O?, O!, Of)].* (1.3)

Для рассматриваемого примера множество имеет следующий вид:

*S={s1,s2,s3,s4,s5,s6}.* (1.4)

*С* – множество связей системы, причем элемент множества состоит из трех компонент:

*с={sout,sin,l}: soutϵS, sinϵS, lϵL.*  (1.5)

Таким образом, элемент множества С представляет собой связь двух подсистем. Однако, у любой системно-объектной модели имеются границы моделирования, т.е. контекст. Как видно из рисунка 1, узловой объект *s1* фактически не соединен не с одним другим узловым объектом. Для учета таких ситуаций предлагается ввести постоянный узловой объект *scontext*, являющийся черным ящиком с точки зрения модели и представляющий внешнюю среду моделируемой системы. Тогда множество узловых объектов модели примет следующий вид:

*S={s1,s2,s3,s4,s5,s6,scontext}*. (1.6)

С учетом вышесказанного, множество связей рассматриваемой модели можно записать в следующем сокращенном виде:

*C={(scontext,s5,l1), (scontext,s4,l2), (s3, scontext,l3), (s3, scontext,l4), (s4, scontext,l5), (s5,s3,l6), (s3,s6,l7), (s3,s4,l8) , (s6,s5,l9) }.* (1.7)

Таким образом, множества (1.2, 1.6, 1.7) полноценно учитывают структурные характеристика рассматриваемой системно-объектной модели. Однако, можно заметить, что в модели, представленной на рисунке 1, функции узловых объектов *s1* и *s2* реализованы узловыми объектами нижних уровней. Рассмотрим подробнее данные узловые объекты: *s1 = [(L?, L!); f(L?)L!; (O?, O!, Of)].* Функция узлового объекта, фактически, реализуется за счет функций узловых объектов нижнего ярусы. Для формального обозначения «вложенности» функций будем использовать следующий формат:

$s\_{1}.f=\left\{\begin{array}{c}s\_{2}.f\\s\_{3}.f\\s\_{4}.f\end{array}\right.$ . 1.8)

Причем функция узла *s2* также реализуется за счет функций узловых объектов нижнего яруса:

$s\_{1}.f=\left\{\begin{array}{c}s\_{2}.f=\left\{\begin{array}{c}s\_{5}.f\\s\_{6}.f\end{array}\right.\\s\_{3}.f\\s\_{4}.f\end{array}\right.$ . (1.9)

Рассмотрим функции представленных узловых объектов с учетом потоковых объектов-параметров функций и потоковых-объектов – результатов работы функций, например, для узлового объекта *s1* функция имеет вид:

$s\_{1}.f=f\left(l\_{1},l\_{2}\right)l\_{3},l\_{4},l\_{5}$. (1.10)

Как видно из выражения (1.10), в качестве потоковых объектов – параметров функции узлового объекта *s1* выступают потоковые объекты один и два, а в качестве потоковых объектов – результатов выступают объекты три, четыре и пять.

Тогда полная запись функции узлового объекта s1 можно представить в следующем виде:

$s\_{1}.f\left(l\_{1},l\_{2}\right)l\_{3},l\_{4},l\_{5}=\left\{\begin{array}{c}s\_{2}.f(l\_{1},l\_{7})l\_{6}=\left\{\begin{array}{c}s\_{5}.f(l\_{1},l\_{9})l\_{6}\\s\_{6}.f(l\_{7})l\_{9}\end{array}\right.\\s\_{3}.f(l\_{6})l\_{3},l\_{4},l\_{7},l\_{8}\\s\_{4}.f(l\_{2},l\_{8})l\_{5}\end{array}\right.$ (1.11)

2. Оператор контекста и его применение

Рассмотрим подробнее узел *s5*, в терминах исчисления систем данный узловой объект представлен в виде:

s5 = [(L?={l1,l9}, L!={l6}); f(L?)L!; (O?, O!, Of)] (2.1)

Для определения контекста узлового объекта введем в исчисление систем специальный оператор, определяющий контекст узла, проще говоря – связь системы с внешним миром. В качестве параметра такого оператора будет выступать один из узлов модели. Далее такой оператор будем обозначать *kontext(s)*, например, для узла *s1* функционал данного оператора можно представить в формате следующего выражения:

$context\left(s\_{1}\right)=\left\{\begin{array}{c}[s\_{context},s\_{1},l\_{1}]\\[s\_{context},s\_{1},l\_{2}]\\\left[s\_{1},s\_{context},l\_{3}\right]\\\left[s\_{1},s\_{context},l\_{4}\right]\\[s\_{1},s\_{context},l\_{5}]\end{array}\right.$. (2.2)

То есть оператор контекста возвращает перечень связей узлового объекта с внешними узловыми объектами, в общем виде работу оператора контекста можно описать в виде следующего выражения:

$context\left(s\right)=\{[s\_{out},s\_{in},l]\in C|s\_{out}\in s.U˅s\_{in}\in s.U\}$. (2.3)

Применив оператор контекста к узлу *s5*, получим следующее выражение:

$context\left(s\_{5}\right)=\left\{\begin{array}{c}[s\_{context},s\_{5},l\_{1}]\\\left[s\_{6},s\_{5},l\_{9}\right]\\\left[s\_{6},s\_{3},l\_{6}\right]\end{array}.\right.$ (2.4)

Из выражения (2.4) видно, что потоковый объект *l1* является входящей связью по отношению к узлу *s5*, в то же время источником потокового объекта *l1* является внешняя среда *scontext*. Не трудно заместить, что истинно следующее утверждение: любая связь *с={scontext,sin,l}*, составляющая контекст узла *sin* (входящая связь по отношению к узлу *sin*), также является входящей связью по отношению к узлу *s\** если функция узла *s\*.f* реализована в том числе, с помощью функции узла *sin.f*.

То есть, если существует такая связь, которая является входящей по отношению к некоторому узлу и источником связи является внешняя среда *scontext*, тогда эта связь также будет входящей для узлов, функции которых реализованы с помощью функции первого узла напрямую или косвенно (через функции третьих узловых объектов). Формально это утверждение можно записать в следующем виде:

$∀с=\{s\_{context},s\_{in},l\}|c\in context\left(s\_{in}\right)\rightarrow c\in context\left(s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s\_{in}.f\\…\end{array}\right.\right).$ (2.5)

Для доказательства соотношения (2.5) рассмотрим произвольный узел *s* такой что:

 *context(s)={scontext,s,l},* (2.6)

а также узел *s\** такой что:

$s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s.f\\…\end{array}\right..$ (2.7)

По условию мы знаем, что *s.f=f(l)*, тогда справедливо выражение:

$s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s.f(l)\\…\end{array}\right.\rightarrow s^{\*}.f\left(l\right)=\left\{\begin{array}{c}s.f\left(l\right)\\…\end{array}\rightarrow \right.\left\{s\_{context},s,l\right\}\in context\left(s^{\*}\right).$ (2.8)

Из выражения (2.8) видно, что существование связи *{scontext,s,l}* гарантирует существование связи *{scontext,s\*,l}* при выполнении условия (2.7). Таким образом, возвращаясь к примеру абстрактной системы, графоаналитическое представление которой представлено на рисунке 1, можно заключить, что связь *{scontext,s5,l1}* гарантирует наличие еще двух входящих связей узловых объектов верхних уровней: *{scontext,s1,l1}* и *{scontext,s2,l1}*.

Следует отметить, что выражение (2.5) справедливо также для исходящих связей системы, тех у которой в качестве приемника выступает специальный узловой объект *scontext*, т.е.:

$∀с=\{s\_{out},s\_{context},l\}|c\in context\left(s\_{out}\right)\rightarrow c\in context\left(s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s\_{out}.f\\…\end{array}\right.\right).$ (2.9)

Для доказательства соотношения (2.9) рассмотрим произвольный узел *s* такой что:

 *context(s)={s,scontext,l},*  (2.10)

а также узел *s\** такой что:

$s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s.f\\…\end{array}\right.$ . (2.11)

По условию мы знаем, что *s.f=f(…)l*, то есть результатом функционирования узла *s* является потоковый объект *l*, тогда справедливо выражение:

$s^{\*}.f=\left\{\begin{array}{c}s.f(…)l\\…\end{array}\right.\rightarrow s^{\*}.f\left(…\right)l=\left\{\begin{array}{c}s.f\left(…\right)l\\…\end{array}\rightarrow \right.\left\{s,s\_{context},l\right\}\in context\left(s^{\*}\right). $ (2.12)

Из выражения (2.12) видно, что существование связи *{s,scontext,l}* также как и в первом случае в входящей связью гарантирует существование связи *{s\*,scontext,l}* при выполнении условия (2.11). Рассматривая пример модели системы, представленной на рисунке 1, можно заключить, что связь, например, *{s4, scontext,l5}* гарантирует наличие связи узлового объекта верхнего уровня *{s1, scontext,l5}*.

По аналогии со связями, у которых в качестве источника или приемника выступает внешняя среда, рассмотрим внутренние связи системы. Те, которые связывают два узловых объекта, находящихся на разных уровнях иерархии. Например, связь *l7* (см. рисунок 1) связывает два узловых объекта *s3* и *s6*. Очевидно, что справедливо следующее. Любая связь *с={sout,sin,l}*, составляющая контекст узла *sin* (входящая связь по отношению к узлу *sin*), также является входящей связью по отношению к узлу *s\** если функция узла *s\*.f* реализована в том числе, с помощью функции узла *sin.f* и в качестве параметров вышеуказанных функций имеет место потоковый объект *l*, т.е. *sin.f=f(l,…)* и *s\*.f=f(l,…)*. Формально данное утверждение можно представить в виде:

$∀с=\{s\_{out},s\_{in},l\}|c\in context(s\_{in})\rightarrow c\in context(s^{\*}|s^{\*}.f(l,…)=\left\{\begin{array}{c}s\_{in}.f(l,…)\\…\end{array}\right.)$. (2.13)

Как видно из выражения, направление связи в данном случае не играет никакой роли. Таким образом, связь *(s3,s6,l7)* системы, модель которой представлена на рисунке 1, гарантирует наличие связи *(s3,s2,l7)* так как функция узла *s2* реализуется, в том числе, за счет функции узла *s6*.

Заключение

В работе исследована возможность формализации системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект» и основанного на нем системно-объектного метода представления организационных знаний. Показана целесообразность использования для исчисления систем как функциональных объектов исчисления объектов Абади-Кардели.

В терминах предлагаемого исчисления обеспечивается агрегация систем как элементов «Узел-Функция-Объект» и облегчается проведение их декомпозиции.

Полученные результаты показывают целесообразность построения формализованной теории системно-объектного анализа и моделирования путем расширения и совершенствования исчисления специальных объектов как систем в рамках УФО-подхода.

*Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 18-07-00355, 19-07-00290, 19-07-00111, 18-07-00356.*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Маматов Е.М., Смородина Н.Н. О системно-объектном методе представления организационных знаний // Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика. - №8(151). – Выпуск №26/1.- С. 137-146, 2013.

2. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков // Искусственный интеллект и принятие решений. - №4.- С. 95-103, 2015.

3. Теория систем и системный анализ: учебник / С.И. Маторин, А.Г. Жихарев, О.А. Зимовец и др.; под ред. С.И. Маторина. – Москва; Берлин: Директмедиа Паблишинг, 2020. – 509 с.: Режим доступа: по подписке. – URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=574641 (Текст: электронный дата обращения: 12.03.2020).

4. Abadi Martin and Luca Cardelli A Theory of Objects. - Springer-Verlag, 1996.

5. Matorin S.I., Zhikharev A.G. Calculation of the function objects as the systems formal theory basis //Advances in Intelligent Systems and Computing, 679, pp. 182-191, 2018.

6. Matorin S.I., Zhikharev A.G. Accounting for system-wide regularities in the system-object modeling of organizational knowledge //Scientific and Technical Information Processing, vol. 46, no 6, pp. 1-9, 2019.

7. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. The elements of general theory of the systems in terms of system-object approach of «Unit-Function-Object»// International Journal of Applied Engineering Research, vol. 10, no. 24 pp. 44831-44837, 2015.

8. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. Object Calculus in the Sys-tem–Object Method of Knowledge Representation // Scientific and Technical Information Processing, vol. 45, no. 5, pp. 307-316, 2018.

**Жихарев Александр Геннадиевич**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

К.т.н., доцент кафедры информационных и робототехнических систем.

Тел.: 89511559075

E-mail: zhikharev@bsu.edu.ru

**Маторин Сергей Игоревич**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

Д.т.н., профессор кафедры информационных и робототехнических систем.

Тел.: 89066069423

E-mail: matorin@bsu.edu.ru

**Бузов Павел Андреевич**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

Аспирант кафедры информационных и робототехнических систем.

Тел.: 89103646677

E-mail: info@softconnect.ru

**Комарова Валентина Александровна**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород

Магистрант кафедры информационных и робототехнических систем.

Тел.: 89045326886

E-mail: komarova\_v@bsu.edu.ru