

Системный подход «Узел–Функция–Объект» при моделировании транспортных потоков*

С. И. МАТОРИН, А. Г. ЖИХАРЕВ, Н. О. ЗАЙЦЕВА, С. Н. ЧЕТВЕРИКОВ

Аннотация. Обсуждается проблема моделирования в интересах анализа и планирования развития транспортных систем больших городов. В качестве средства решения задачи предлагается использовать оригинальный системный подход «Узел–Функция–Объект» (УФО-подход). Рассматриваются возможности алгебраического описания УФО-моделей транспортных систем с целью обеспечения имитации динамики транспортных потоков.

Ключевые слова: моделирование, транспортный поток, транспортная система, системно-объектный подход «Узел–Функция–Объект», исчисление объектов, исчисление процессов.

Введение

Нерешенная практическая проблема совершенствования транспортной инфраструктуры в больших городах обусловлена отсутствием в настоящее время методов анализа сложных динамических систем. Как говорят специалисты, сложную систему проще создать, чем проанализировать и понять, как она работает. Это в полной мере относится к транспортным системам, транспортной инфраструктуре и транспортным сетям. Достижение требуемых практических результатов в данном направлении сдерживается, в частности, недостаточным уровнем развития методов и средств моделирования слабо формализуемых динамических объектов, к которым относятся транспортные потоки. Это представляет собой фундаментальную научную проблему, которая в литературе по системным исследованиям формулируется как проблема отсутствия в рамках развития теории больших систем общей теории построения сложных динамических систем [1].

Одной из основных тенденций, наметившихся в последнее время в области информационных технологий, является повышенный интерес к методолого-технологическим проблемам использования имитационного моделирования в практике исследования и проектирования сложных систем в различных прикладных областях, обусловленный следующими причинами [2]:

- расширением области приложений имитационного моделирования, прежде всего за счет таких нетрадиционных направлений, как бизнес-процессы, маркетинг, логистика, управление финансами, социально-экономические процессы, транспортные системы и т. п.;
- расширением методологических возможностей имитационных систем на основе интеграции неформального аппарата обобщенных схем, принятых в соответствующих языках моделирования, с классическими моделями системного анализа и вычислительной математики (теория системной динамики и оптимизации, принятия решений, методы численного анализа и т. д.). Такая интеграция обеспечивает предпосылки для создания многофункциональных сред имитационного моделирования, поддерживающих эффективное решение комплексных проблем, возникающих сегодня в различных прикладных областях;
- повышением уровня технологичности имитационных систем за счет средств визуализации: графического интерфейса, анимации, а также CASE-технологии.

Использование имитационного моделирования является, в настоящее время, одной из основных тенденций при разработке структур транспортных сетей. «Встроенные» в управление транспортных сетей системы имитации обеспечивают решение таких важных задач, как контроль транспортных потоков, планирование маршрутов, прогноз изменений и инвестиций в них на основе анализа по схеме «что-если» («what-if»), планирование сценариев для чрезвычайных ситуаций. Причём общепринятой является

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 12-07-90800-офи_м, 13-07-00075-а, 13-07-00096-а)

точка зрения, что имитационное моделирование должно сопровождать процессы управления динамическими системами с самой начальной стадии их становления, развития и внедрения [3].

Подтверждением указанной тенденции могут служить примеры таких известных систем моделирования, как SIMUL8 (SIMUL8 Corporation), AutoMod (Brooks Automation), ProModel (ProModel Corporation), WITNESS (Lanner Group Incorporated), а также AnyLogic, Arena, IThing Analyst, GPSS World.

Однако применяемые в мировой практике подходы к имитации, как правило, не используют всех особенностей и преимуществ системного подхода и системного анализа. Интеграция средств имитационного моделирования и системного подхода ни в отечественной, ни в зарубежной литературе, как правило, не рассматривается. Интеграция же визуального и имитационного моделирования рассматривается, как правило, только для языка моделирования UML. Кроме того, на сегодняшний день не устранены следующие недостатки имитационного моделирования [4]:

- большой расход временных и информационных ресурсов;
- сложность оценки адекватности описания моделируемой системы и интерпретации результатов;
- недостаточная степень общности результатов моделирования;
- необходимость разработки моделирующего алгоритма и его реализации на специальном языке;
- сложность (но необходимость) использования методов оптимизации в практике имитационного моделирования.

1. Системный подход к имитационному моделированию транспортных потоков

Решение упомянутой выше фундаментальной проблемы и устранение недостатков имитационного моделирования авторы видят в разработке теории и средств имитации функционирования слабо формализуемых динамических объектов. В основе проводимых авторами исследований в этой области лежит оригинальный системный (системно-объектный) подход «Узел–Функция–Объект» (УФО-подход) [5, 6], который представлен следующими элементами.

1. Графоаналитический системный подход «Узел–Функция–Объект» для обеспечения адекватности описания моделируемой системы и интерпретации результатов моделирования.
2. Формализация графоаналитической модели в терминах «Узел–Функция–Объект» в целях ав-

томатизации формирования программного кода имитационной модели.

3. Интеграция визуального графоаналитического моделирования в терминах «Узел–Функция–Объект» и имитационного моделирования для обеспечения единства анализа системы на качественном и количественном уровне.
4. Интерпретация графической нотации в терминах «Узел–Функция–Объект» в исполняемый программный код в целях визуализации динамики транспортных потоков.
5. Обеспечение визуализации функционирования транспортных систем и потоков на основе графоаналитической модели в терминах «Узел–Функция–Объект».
6. Интеграция принципов имитационного моделирования и системного подхода «Узел–Функция–Объект» для решения задачи прогнозирования результатов функционирования транспортных систем и повышения их эффективности с точки зрения динамики транспортных потоков.

Развитием и формализацией **УФО-подход** является метод и алгоритм системного анализа, именуемый для краткости **УФО-анализом**. Основу метода составляет формально-семантический алфавит элементов и связей анализируемых систем, а также алгебраическое представление системы, полученное путем интеграции графического формализма «Узел–Функция–Объект», *теории паттернов* Гренандера, *исчисления процессов* Милнера и *исчисления объектов* Абади–Карделли.

В целях автоматизации применения УФО-анализа спроектирован и реализован CASE-инструментарий **UFO-toolkit** (свидетельство «Роспатента» № 2006612046). Данный инструментарий является знаниеориентированным CASE-инструментарием поддержки процессов системно-объектного визуального графоаналитического моделирования и анализа. Он обеспечивает представление любой системы в виде трехэлементной конструкции «Узел–Функция–Объект», т. е. в виде **УФО-элемента**. «Узел» – это точка пересечения входных и выходных связей (потоков) в структуре разрабатываемой системы, «Функция» – процесс перевода входа в выход, т. е. процесс, обеспечивающий баланс «втекающих» и «вытекающих» потоков/связей данного узла, «Объект» – субстанция, реализующая данную функцию.

УФО-элементы, собранные в различные конфигурации, образуют диаграммы взаимодействия элементов, которые позволяют визуализировать функциональность элементов системы более высоких уровней. Таким образом, разрабатываемая система представляется в виде иерархии УФО-элементов. Данное представление позволяет учесть различные аспекты рассмотрения этой системы (структурные,

функциональные, объектные) в одной системно-объектной модели – **УФО-модели**.

Иерархия УФО-элементов и их конфигураций, которую поддерживает UFO-toolkit, основана на классификации связей (потоков), пересечения которых и образуют узлы. Моделирование любой системы начинается со специализации **базовой классификации связей** под конкретную предметную область. Абстрактный класс «Связь (L)» в базовой классификации связей делится на подклассы «**Материальная связь (M)**» и «**Информационная связь (I)**»; класс материальных связей делится на подклассы «**Вещественная связь (S)**» и «**Энергетическая связь (E)**», класс информационных связей – на подклассы «**Связь по данным (D)**» и «**Управляющая связь (C)**».

УФО-элементы могут храниться в специальных УФО-библиотеках для обеспечения компонентного подхода к моделированию систем. Библиотеки представляют собой концептуальные модели соответствующих областей или отраслей бизнеса, в которых хранятся их структурные, функциональные и субстанциональные характеристики. При этом библиотеки могут содержать не только одиночные УФО-элементы, но и их иерархии, что позволяет повторно использовать готовые подсистемы и системы. Таким образом, УФО-библиотеки представляют собой базу знаний специальной конфигурации, в которой хранятся УФО-элементы, соответствующие определенным классам систем. Системы при этом классифицируются в зависимости от типов входных и выходных связей. Рассматриваются следующие типы входных связей: *производственные, обеспечивающие* (вещественные, энергетические и информационные), *управляющие* – и следующие типы выходных связей: *продуктовые, информационные, отходы*. Это позволяет выделять следующие классы организационных систем: *производственные, транспортные и распределительные*, – для каждого из которых рассматриваются три подкласса: «*вещества*», «*энергии*» и «*информации*».

UFO-toolkit дает возможность в значительной степени автоматизировать аналитическую деятельность за счет использования библиотек УФО-элементов и классификации связей, которые позволяют применять формальные правила сборки конфигураций из УФО-элементов – так называемые **правила системной декомпозиции**. Учитываются следующие правила: **правило присоединения** (элементы должны присоединяться друг к другу в соответствии с типами присущих им связей); **правило баланса** (при присоединении элементов друг к другу в соответствии с правилом 1 должен обеспечиваться качественный (формальный) баланс «притока» и «оттока» по входящим и исходящим функциональным связям); **правило реализации**

(при присоединении элементов друг к другу в соответствии с правилами 1 и 2 должно быть обеспечено качественное и количественное соответствие интерфейсов и объектных характеристик функциональным) [5, 6].

К настоящему моменту УФО-подход и его инструментарий успешно применены:

- при создании сервисной службы ФГУП «Российские телевизионные и радиовещательные сети» [7];
- при создании системы управления наружным освещением [8];
- для разработки электронных административных регламентов в рамках государственной программы «Электронная Россия» [9].

2. Применение УФО-подхода для имитации моделирования транспортных потоков

Анализ существующих методов и средств имитационного моделирования показывает, что имитацию выполнения некоторого процесса обеспечивает так называемый «интерпретатор», функции которого представлены ниже.

- 1). Создание транзактов. Проводка их через блоки модели с одновременным выполнением действий, связанных с каждым блоком. (Движение транзактов в модели соответствует движению отображаемых ими объектов в реальной системе.)
- 2). Ведение модельного времени. Всякое изменение состояния модели можно рассматривать как некоторое событие, происходящее в определенный момент условного (системного) времени, задаваемого «часами» системы, работа которых организуется интерпретатором. (Фактически, «часы» в интерпретаторе – это целая переменная, значение которой соответствует текущему моменту условного времени модели.)
- 3). Определение очередности событий (В процессе моделирования интерпретатор автоматически определяет правильную очередность наступления событий.)

Проведение имитации некоторого процесса средствами УФО-подхода может быть осуществлено путем выполнения следующих шагов:

- построение концептуальной классификационной модели предметной области и моделируемой системы (построение диаграммы классов) на основе базовой иерархии классов для задания набора конкретных алфавитных символов нормативной системы;

- построение модели взаимодействия объектов (построение диаграммы объектов) анализируемой и моделируемой системы из полученных алфавитных символов элементов и связей по правилам системной декомпозиции;
- имитация динамики функционирования системы (путем задания конкретных временных (и других, например, стоимостных) характеристик представленным в модели объектам (связям и функциональным элементам).

Собственно сама имитация, т. е. преобразование УФО-модели в имитационную модель, может быть осуществлена следующим образом:

- для каждого функционального элемента выделяются динамические характеристики: время выполнения, блокирования процесса;
- определяются условия имитационного моделирования, т. е. задаются значения динамических параметров функциональных элементов модели;
- определяется порядок возникновения событий в модели, т. е. поступление сообщений из надсистемы моделируемой системы;
- производится отсчет времени и отслеживается изменение параметров функциональных элементов УФО-модели до какого-либо заданного момента времени или до какого-либо состояния модели.

Важной особенностью имитационного моделирования с использованием системно-объектной УФО-модели, является отсутствие необходимости преобразования модели в специальный моделирующий алгоритм. Это объясняется тем, что при имитационном моделировании должна строиться модель, адекватно отражающая внутреннюю структуру моделируемой системы. В случае построения УФО-модели это требование выполняется, так как в соответствии с УФО-подходом модель строится из функциональных элементов и связей, фактически составляющих моделируемую систему, что позволяет непосредственно представлять в моделях плохо формализуемые знания. Также применение системно-объектного подхода при построении моделей значительно увеличивает степень адекватности модели реальной системе и решает проблему создания интеллектуального интерфейса конечного пользователя со сложными средствами анализа моделей.

С точки зрения УФО-подхода транспортная система города, обеспечивающая его функционирование, представляет собой:

- Узел, находящийся в структуре транспортной системы региона (перекресток входящих и выходящих транспортных потоков, связывающих город с другими населенными пунктами региона);

- Функцию, которая преобразует входящие транспортные потоки в выходящие (в принципе не формализуемую);
- Объект, характеристики которого определяют количественные показатели данной системы с точки зрения потребления, преобразования и выдачи транспортных потоков.

Транспортная система города в целом естественным образом разбивается на подсистемы (также представляющие собой УФО-элементы, только более низкого уровня иерархии): округа, районы, микрорайоны и т. д. В их структуре можно выявить связанные между собой потоками транспорта УФО-элементы, обладающие следующей функциональностью:

- **генерирующие** и/или **потребляющие** транспортные потоки (стоянки, гаражи, микрорайоны спальни и т. п.);
- **проводящие** транспортные потоки (дороги: шоссе, улицы и т. п.);
- **разветвляющие** транспортные потоки (перекрестки, развилки и т. п.).

Данные функции обеспечиваются соответствующими объектами, примеры которых приведены выше в скобках. Эти объекты обладают характеристиками, влияющими на характеристики потоков транспорта. Например, стоянки и гаражи характеризуются, в первую очередь, количеством мест для автомобилей; дороги – пропускной способностью, в свою очередь зависящей от разного рода ограничений движению транспорта; перекрестки – направлениями, по которым может далее двигаться транспорт.

В соответствии с УФО-подходом для корректного описания этих УФО-элементов (в первую очередь Узлов) существенное значение имеет классификация транспортных потоков, которые с целью анализа транспортной системы города удобно разделить на **уличный** и **междугородный** транспорт. Используемая классификация уличных транспортных потоков, является частью известной классификации городского транспорта¹ и учитывает только те свойства транспорта, которые влияют на моделирование динамики потоков транспорта (рис. 1).

Используя приведенное выше описание УФО-подхода и возможности его применения для моделирования транспортных систем, можно представлять в терминах УФО-элементов транспортные системы городов по аналогии с простым примером, приведенным на рис. 2.

Районы города представляют собой в свою очередь системы УФО-элементов, связанных транс-

¹ <http://gorodtransport.ru/category/kratie-svedeniya-o-gorodskom-transporte/>

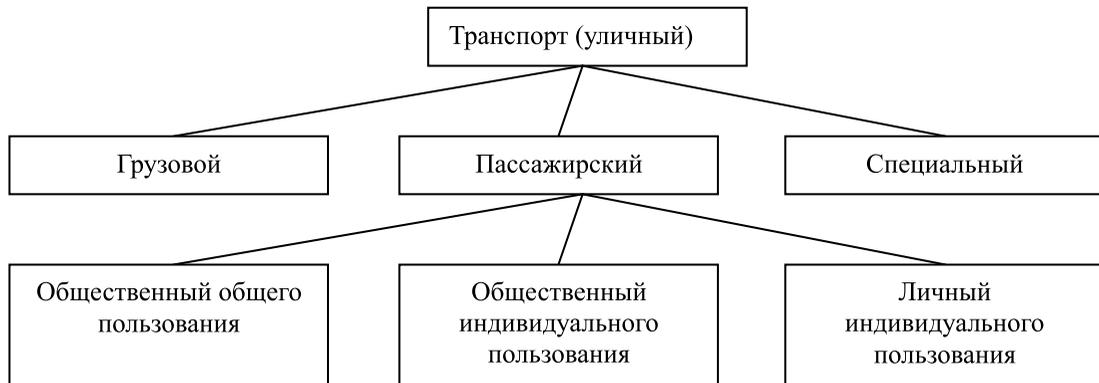


Рис. 1. Классификация транспортных потоков по видам транспорта

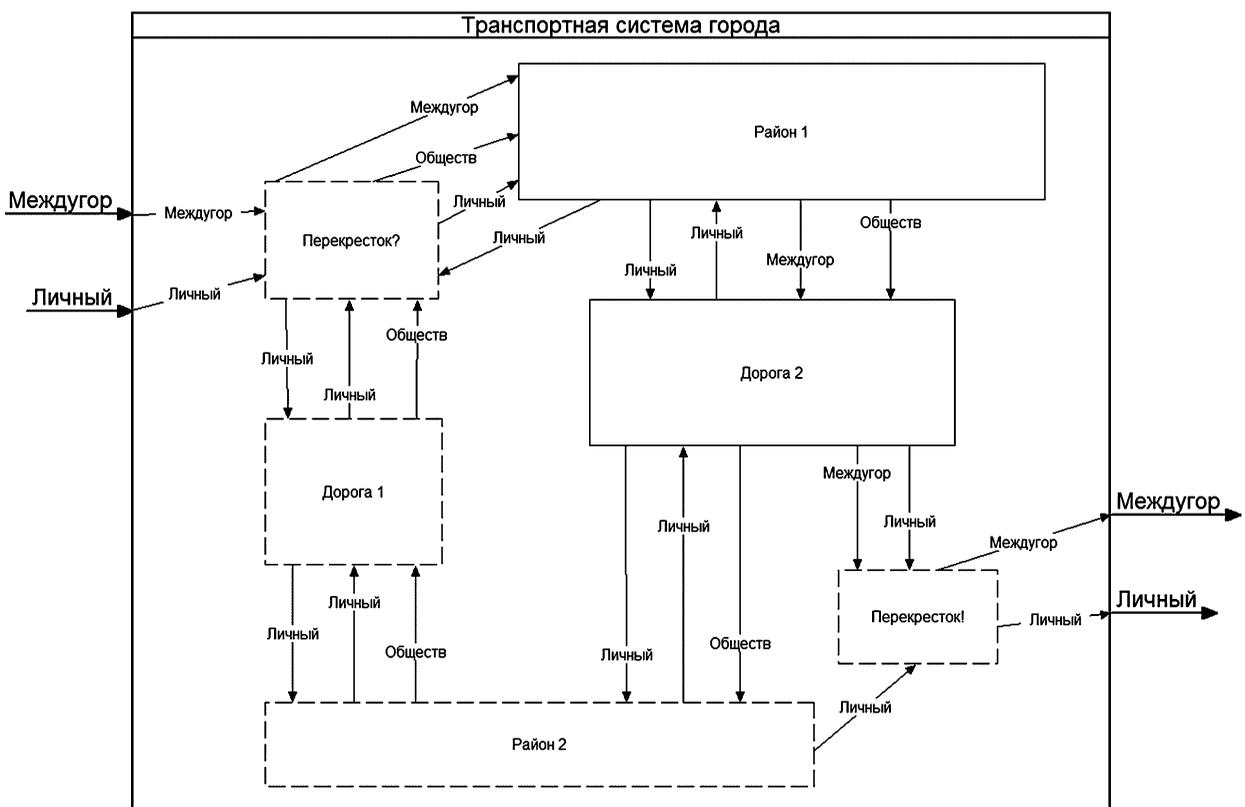


Рис. 2. Пример УФО-модели верхнего уровня простой транспортной системы

портными потоками и обладающих упомянутой выше функциональностью, что и показано на диаграмме декомпозиции (рис. 3).

Дороги также являются системами УФО-элементов проводящей и разветвляющей функциональности, что показано на следующей диаграмме декомпозиции (рис. 4). Глубина декомпозиции такой модели определяется практически необходимым уровнем детализации с точки зрения точности имитации функционирования потоков транспорта.

3. Возможности алгебраического описания УФО-моделей транспортных систем с целью обеспечения имитации динамики транспортных потоков

Опыт применения УФО-подхода и УФО-технологии убедил в необходимости и возможности формализации их основных положений для повышения результативности и эффективности. В настоящее

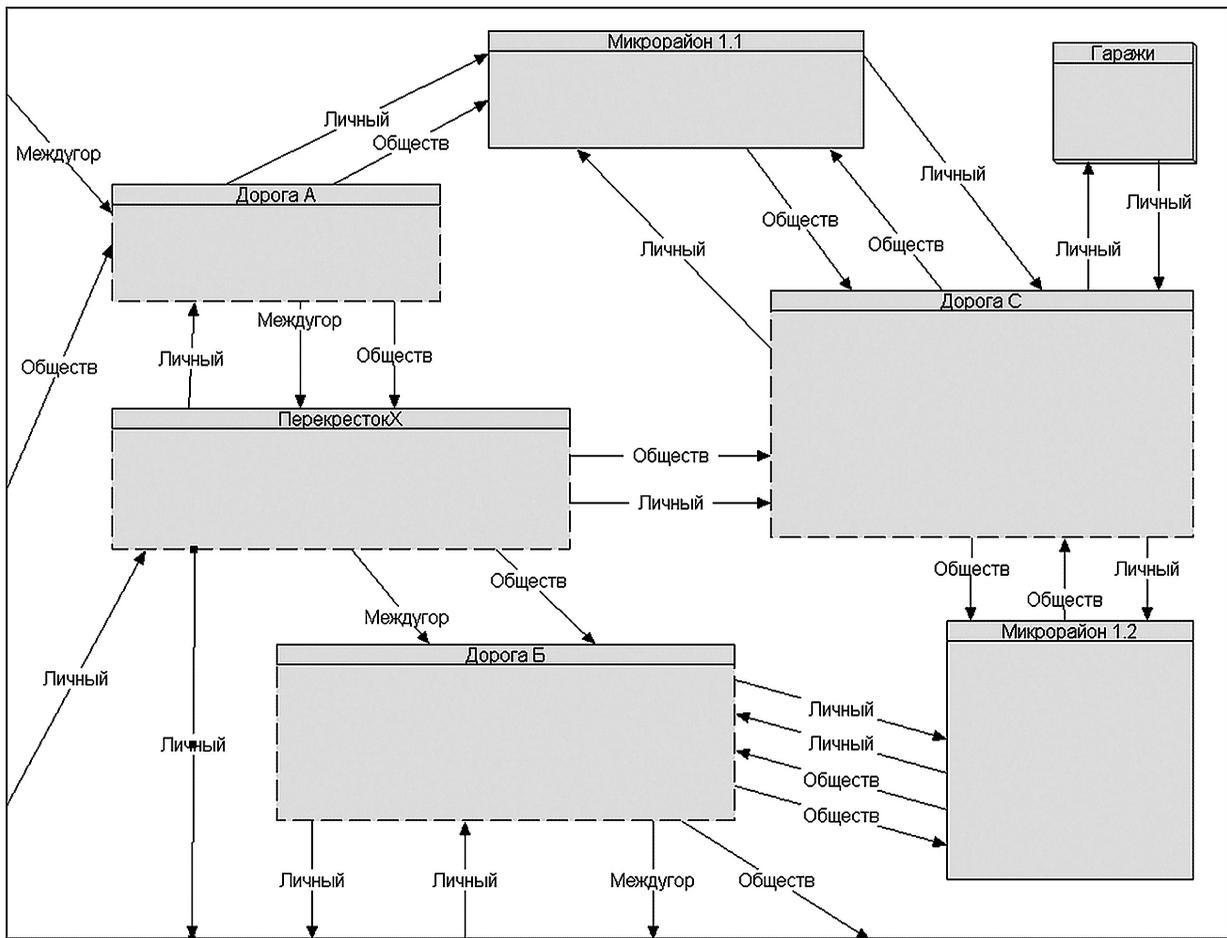


Рис. 3. Пример диаграммы декомпозиции УФО-элемента, генерирующего и потребляющего транспортные потоки

время предприняты попытки такой формализации средствами *теории паттернов (PT)* Гренандера [10], средствами *исчисления процессов (Calculus of Communication Systems – CCS)* и *Пи-исчисления* Милнера [11, 12], а также за счет интеграции алгебраических аппаратов PT и CCS [13]. Анализ результатов формализации показал, что для повышения степени формализованности УФО-подхода и УФО-моделей, в том числе в интересах создания на их основе метода имитации динамики транспортных потоков, актуально интегрировать с упомянутыми алгебраическими средствами возможности алгебраического аппарата *исчисления объектов* Абади-Карделли [14].

Рассмотрим это подробнее. В рамках УФО-подхода процесс анализа и синтеза модели организационной системы начинается с построения иерархии связей, использующихся в дальнейшей работе. Иерархия связей представляет все ресурсы, отходы, результаты производства, документы и т. п., которые участвуют в моделируемом процессе. После

анализа и построения иерархии связей системы, начинается разработка УФО-диаграмм, на которых связи выступают в роли материальных и/или информационных потоков, передающих соответствующие объекты от одного узла (УФО-элемента) к другому узлу (УФО-элементу). Сказанное позволяет ввести в терминологию УФО-подхода понятие «поточный объект», которое дополняет существующее понятие об объекте, реализующем функциональный узел в рамках УФО-элемента. То есть будем рассматривать два вида объектов: **узловой объект** в рамках УФО-элемента (далее обозначаем заглавными латинскими буквами) и **поточный объект** в рамках потока/связи (будем далее обозначать строчными латинскими буквами).

Применим к рассматриваемым объектам алгебраический аппарат исчисления объектов с целью повышения степени формализованности УФО-подхода и УФО-моделей.

В исчислении объектов [14] абстрактный объект представляет собой набор полей и методов. Использо-

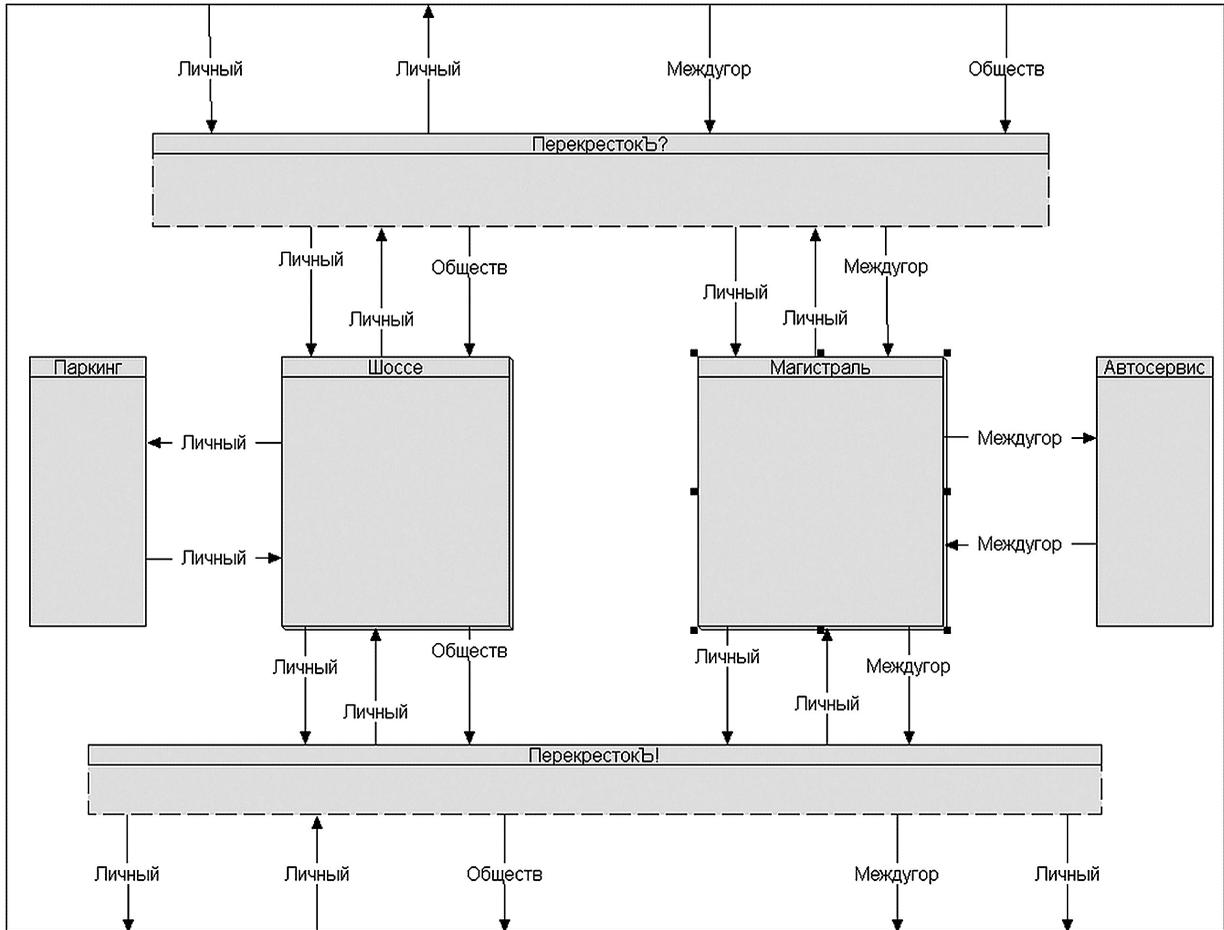


Рис. 4. Пример диаграммы декомпозиции проводящего УФО-элемента

вание метода объекта – это вызов метода, изменение метода – это переопределение. Поле – частный случай метода (константный метод). Изменение значения поля является частным случаем переопределения метода. Методы выполняются в контексте некоторого объекта (имеют ссылку на объект). Таким образом, любой абстрактный объект «*o*» формально в исчислении объектов представляется в следующем виде:

$$o = [l_i = b_{i,i \in 1..n}, l_j = \sigma(x_j) b_{j,j \in 1..m}],$$

где l_i представляют собою поля объекта, в которых записаны характеристики объекта o ; l_j – методы данного объекта, в которых в скобках указаны их аргументы, а за скобками результаты их работы; $o \in O$, $b_i \in O$, $b_j \in O$ (где O – множество термов исчисления объектов).

Вычисление в исчислении объектов – это последовательность вызовов и переопределения методов, для чего определены правила редукции. Для нас наибольший интерес представляет правило вызова следующего вида (вызов метода l_j объекта o): $o.l_j \rightarrow b_j[x_j \mapsto o]$.

Используем средства исчисления объектов для формального описания УФО-элемента с точки зрения его узлового объекта. Например, рассмотрим УФО-элемент, объект которого занимает функциональный узел, имеющий входные потоки, обозначенные как $a^?_i$, и выходные потоки, обозначенные как $a!_j$ (см. рис. 5). Данные обозначения в стиле теории процессов подчеркивают тот факт, что потоки состоят из объектов, которые по ним (потокам) передаются из одного узла (объекта) в другой. Таким образом, объект G рассматриваемого УФО-элемента представляет собой сущность, которая за счет своей функциональности преобразует входные потоковые объекты $a^?_i$ в выходные потоковые объекты $a!_j$.

В соответствии с упомянутыми выше правилами исчисления объектов данный узловой объект G (и, следовательно, соответствующий УФО-элемент) формально может быть представлен в виде следующего выражения:

$$G = [l^?_i = a^?_i, l!_j = a!_j; l_n = F(l^?_i)l!_j; l_m = b_m],$$

где I_i – поле узлового объекта (может представлять собой набор или множество), которое содержит значения входных потоковых объектов a_i и, соответственно, имеет такой же тип данных;

I_j – поле узлового объекта (может представлять собой набор или множество), которое содержит значения выходных потоковых объектов a_j и имеет такой же тип данных;

I_n – метод узлового объекта (может представлять собой набор или множество), преобразующий входные потоковые объекты узла в выходные;

I_m – поле узлового объекта (может представлять собой набор или множество), которое содержит основные характеристики данного объект (b_m).

Данный объект G представляет собой специальный класс объектов в исчислении объектов, так как содержит специально выделенные поля и методы.

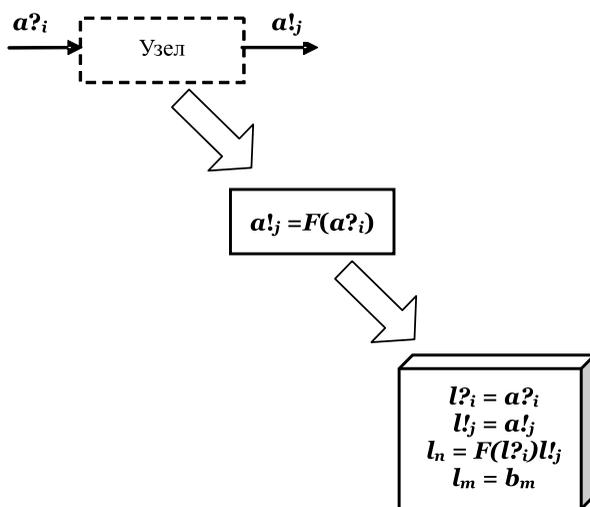


Рис. 5. УФО-элемент в обозначениях исчисления объектов

В исчислении объектов каждый метод объекта имеет один аргумент и один результат (см. выше), т. е. количество аргументов и результатов совпадает. В системном же моделировании, когда моделируются реальные процессы и объекты, такого может и не быть. Возможны следующие варианты. Результатов в реальности больше, чем аргументов, тогда для обеспечения соответствия формальному описанию некоторые аргументы дублируются, что, собственно, будет соответствовать реальному положению вещей. Результатов в реальности меньше, чем аргументов, тогда для обеспечения соответствия формальному описанию необходимо вводить нужное количество пустых результатов.

Нетрудно видеть, с одной стороны, что представленное формальное описание с точки зрения объекта УФО-элемента учитывает и *структурную*, и *про-*

цессную, и *субстанциальную* его характеристики. И, таким образом, может рассматриваться как **новый способ формального описания систем как УФО-элементов**. Действительно, во-первых, имена полей I_i и I_j могут рассматриваться как имена потоков, связывающих УФО-элемент с другими элементами, т. е. как структурная характеристика данного УФО-элемента. Во-вторых, метод $I_n = F(I_i)I_j$ представляет собой процессную (функциональную) характеристику данного УФО-элемента. В-третьих, поле $I_m = b_m$, а также значения входных и выходных потоков (потоковых объектов) a_i и a_j представляют собой объектную характеристику данного УФО-элемента.

С другой стороны, представленное формальное описание УФО-элемента учитывает описательные возможности упомянутого выше алгебраического аппарата РТ. Средствами РТ УФО-элемент описывается как *образующая*, т. е. как графический формализм, представляющий собой именованный объект со связями, который характеризуется признаком α и показателями входных и выходных связей β [10]. Средствами исчисления объектов это учитывается именем поля I_m (которое может рассматриваться как имя объекта), значением данного поля b_m (которое может рассматриваться как признак α) и значениями входных и выходных потоков a_i и a_j (которые могут рассматриваться как показатели входных и выходных связей β).

Кроме того, исчисление объектов дополнительно позволяет учесть возможности исчисления процессов (CCS). Дело в том, что функциональные характеристики УФО-элемента формально могут быть описаны по аналогии с CCS, что обосновано нами в работе [11]. Таким образом, в соответствии с этим обоснованием метод I_n узлового объекта G (тело этого метода) формально можно представить в виде: $F = (S, S^0, a\tau)$, где S – множество подпроцессов процесса, соответствующего данному методу; $S^0 \in S$ – множество интерфейсных (входных $S^?$ и выходных $S!$) подпроцессов (причем $S^0 = S^? \cup S!$; в число входных связей множества подпроцессов $S^?$ входит множество связей I_i , в число выходных связей множества подпроцессов $S!$ входит множество связей I_j); $a\tau$ – множество потоков в S , осуществляющих передачу объектов глубинного яруса связанных подпроцессов: $(s_i, a\tau_{ij}, s_j)$

При этом, если УФО-элемент (узловой объект) рассматривается без учета декомпозиции (на контекстном уровне), то выражение в скобках принимает вид, соответствующий так называемой «нулевой функции»: $F^0 = (\{s^0 \in S\}, \{s^0 \in S^0\}, \emptyset) = s^0$.

Это означает, что в первом случае метод узлового объекта (УФО-элемента) может быть представлен, в том числе, в виде УФО-диаграммы, а во втором случае только в виде формулы или алгоритма.

Учет возможностей CCS позволяет использовать для методов сформулированные нами в работе [11]

по аналогии с CCS операции над функциями: *префиксное действие*, *постфиксное действие* и *альтернативная композиция*.

Средствами исчисления объектов можно формально описать не только узловые объекты, но и потоковые. Потоковый объект в рамках потока связи можно представить как объект, обладающий только набором полей, содержащих основные характеристики объекта, т. е. методы объекта в данном случае не учитываются. Такой объект (также представляющий собой еще один специальный класс объектов) формально средствами исчисления объектов представляется с помощью следующего выражения: $a_i = [l_j = b_j]$, где: a_i – потоковый объект с именем a ; $l_j = b_j$ – поля потокового объекта с некоторыми значениями b_j .

Если для хранения и обработки знаний о транспортных системах представлять их в виде УФО-элементов, то, с учетом формального их описания средствами исчисления объектов (с учетом интеграции с CCS), манипулирование этими знаниями, в частности имитацию динамики транспортных потоков, можно обеспечить путем организации цепочки вызовов методов узловых объектов со стороны соответствующих потоковых объектов. Цепочка организуется на уровне декомпозиции УФО-элемента, метод объекта которого не принимает вид «нулевой функции» (см. выше). В данном случае вызов узлового объекта записывается следующим образом: $G.l_n l_i \{l_i \mid \rightarrow G\}$.

Подобный вызов метода (например, метода l_n) узлового объекта (например, объекта G) будет иметь место в том случае, если на вход узлового объекта поступает поток, наименование объектов которого (потоковых) совпадает со значением поля узлового объекта, которое содержит значение входных потоковых объектов (например, поля l_i). Старт процедуры имитационного моделирования осуществляется путем инициализации некоторого контекстного потокового объекта, после чего значение контекстного потокового объекта попадает в соответствующее поле интерфейсного узлового объекта, после чего вызывается метод этого узлового объекта, который выполнив некоторые действия, вызывает метод следующего узлового объекта, и так пока не достигается конец модели. Формально с учетом описания УФО-элементов средствами исчисления объектов упомянутая процедура вывода может быть представлена следующим образом:

$$a_i = [l_m = b_m]: a_i = a_i = l_i \rightarrow G_k.l_n \rightarrow l_j \{l_i \mid \rightarrow G_k\} \rightarrow a_{i+1} = [l_{m+1} = b_{m+1}]: a_{i+1} = a_{i+1} = l_{i+1} \rightarrow G_{k+1}.l_{n+1} \rightarrow l_{j+1} \{l_{i+1} \mid \rightarrow G_{k+1}\} \rightarrow a_{i+2} = [l_{m+2} = b_{m+2}]: a_{i+2} = a_{i+2} = l_{i+2} \rightarrow G_{k+2}.l_{n+2} \rightarrow l_{j+2} \{l_{i+2} \mid \rightarrow G_{k+2}\} \rightarrow a_{i+3} = [l_{m+3} = b_{m+3}]: \dots$$

Организация цепочки вызовов методов узловых объектов со стороны потоковых объектов аналогична определению *трассы* (протокола) *функции*, предложенному нами в работе [11], по аналогии с *трассой* (протоколом) *процесса* в CCS. Если $l_i, i \in 1..n = a_i, i \in 1..n$, то можно организовать следующую цепочку вызовов в рамках некоторого УФО-элемента, для которого $a_i, i \in 1..n \in \alpha \tau$.

$$\xrightarrow{a_i} F(l_i)l_j \xrightarrow{a_{i+1}} F(l_{i+1})l_{j+1} \xrightarrow{a_{i+2}} F(l_{i+2})l_{j+2} \xrightarrow{a_{i+3}} \dots$$

Представленные выражения можно рассматривать как формальное описание механизма имитации в случае представления знаний о транспортных системах и потоках в виде УФО-элементов с учетом формального их описания средствами исчисления объектов, скомбинированного с исчислением процессов (CCS).

Заключение

Представленные результаты исследований можно рассматривать как научно-технический задел по созданию метода и инструментального средства имитационного моделирования.

В основе разрабатываемого метода имитационного моделирования лежит адаптированный к предметной области оригинальный системный подход «Узел–Функция–Объект». Собственно механизм имитации основан на формализации УФО-подхода с помощью интегрированного алгебраического аппарата исчисления объектов и исчисления процессов. Реализация данного механизма возможна с помощью скриптового языка программирования (например, Python), который должен быть внедрен в CASE-инструментарий «UFO-toolkit».

Разрабатываемый метод и инструментальное средство планируется использовать для моделирования, анализа и планирования развития транспортных систем больших городов, в первую очередь, с точки зрения моделирования динамики транспортных потоков.

Авторы благодарят А. Б. Петровского за внимательное отношение и конструктивную критику данного исследования.

Литература

1. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. – 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: «Изд-во Бином»; СПб.: «Невский диалект», 1999. – 560с.
2. Бигдан В. Б., Пенелыев В. А., Сахнюк М. А. Актуальные проблемы и тенденции в области современного имитационного моделирования / Проблемы програмування. Восьма

- міжнародна науково-практична конференція з програмування (УкрПРОГ'2012. Київ, 2012. № 2/3.
3. *Емельянов А. А., Власова Е. А.* Имитационное моделирование экономических процессов / Имитационное моделирование. Теория и практика. Четвертая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2009). Санкт-Петербург, 2009.
 4. *Габрин К. Э., Козлова Е. А.* Основы имитационного моделирования в экономике и управлении. Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2004.
 5. *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.
 6. *Маторин С. И., Зимовец О. А., Жихарев А. Г.* О развитии технологии графоаналитического моделирования бизнеса с использованием системного подхода «Узел–Функция–Объект» // Научно-техническая информация. Сер. 2. 2007. № 11.
 7. *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.
 8. *Михелев М. В., Маторин С. И.* Моделирование бизнес-процессов в управлении наружным освещением // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. Курск, 2009. № 3.
 9. *Маторин С. И., Зимовец О. А.* Формализованное визуальное моделирование административных процедур // Прикладная информатика. 2012. № 2.
 10. *Маторин С. И., Ельчанинов Д. Б.* Применение теории паттернов для формализации системологического УФО-анализа // Научно-техническая информация. Сер.2. 2002. N11.
 11. *Жихарев А. Г., Маторин С. И.* Метод формализации организационных знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 2.
 12. *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.
 13. *Зимовец О. А., Маторин С. И.* Интеграция средств формализации графоаналитических моделей «Узел–Функция–Объект» // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 1.
 14. *Abadi M., Cardelli L.* A Theory of Objects. Springer-Verlag, 1996.

Маторин Сергей Игоревич. Профессор Белгородского ГУ. Д. т. н., профессор. Окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники в 1977 г. Количество печатных работ – 170. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, семантика, когнитология, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: matorin@bsu.edu.ru

Жихарев Александр Геннадиевич. Ассистент Белгородского ГУ. Окончил Белгородский ГУ в 2010 г. Количество печатных работ – 30. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: zhikharev@bsu.edu.ru

Зайцева Наталья Олеговна. Аспирант Белгородского ГУ. Окончила Белгородский ГУ в 2010 г. Количество печатных работ – 10. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, управление знаниями, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: zaitseva_n_o@bsu.edu.ru

Четвериков Сергей Николаевич Аспирант Белгородского ГУ. Окончил Белгородский ГУ в 2006 г. Количество печатных работ – 3. Область научных интересов: системный подход, системный анализ, бизнес-моделирование, организационное проектирование, CASE-технология. E-mail: Chetverikov_SN@belsbyt.ru