
МЕТОДОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Б.В. Соколов, В.В. Михайлов, В.П. Морозов (Санкт-Петербург)

Традиционно среди основных подходов, используемых в имитационном моделировании, называются: системная динамика, дискретно-событийное моделирование, под которым понимается любое развитие идей GPSS, агентное моделирование, а также моделирование динамических систем, которое некоторые авторы относят к области инженерных дисциплин [1]. Подход к имитационному моделированию на основе алгоритмических сетей на сегодняшний день не получил столь широкого распространения, что, по мнению авторов, не снижает его практической ценности для решения определенного класса задач.

Под *алгоритмической сетью* будем понимать представление алгоритмической модели в виде направленного отмеченного графа $G(P, X)$, дугам (X) которого сопоставлены явления, характеризующие моделируемый объект (переменные), а вершинам (P) – функциональные отношения, эти явления связывающие (операторы). Направление дуги указывает место, где формируется соответствующая ей переменная (начало дуги) и место либо места, где она используется (конец дуги) [2].

Алгоритмическая модель – математическая модель, структуризация вычислительных процедур которой осуществлена в соответствии с представлением разработчика о причинно-следственных или временных связях, характеризующих моделируемый объект [3].

Как видно из определения, ключевое отличие модели, представленной в виде алгоритмической сети, от модели того же объекта, созданной методом системной динамики, заключается в принципе его структуризации¹. Если системная динамика предполагает структуризацию объекта по переменным, описывающим его состояние (фазовым характеристикам), то подход на основании алгоритмических сетей – по процессам, отражающим изменение исследуемых фазовых траекторий объекта во времени. В алгоритмической сети объект предстает в виде множества процессов, совершающихся и *завершающихся* в рассматриваемом периоде моделирования. Динамика модели обеспечивается возможностью повторения описанного таким образом периода требуемое количество раз (число периодов расчета).

Основоположником данного подхода является заведующий лабораторией Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН д.т.н. Иванищев В.В., который в конце 70-х годов предложил язык алгоритмических сетей и сформулировал основные положения моделирования объектов на его основе. Последующие работы в этом направлении позволили создать *методологию моделирования и поддержки принятия решений на основе алгоритмических сетей, ориентированную на предметные знания эксперта* [2–9].

Ключевым моментом методологии автоматизации моделирования и поддержки принятия решений на основе алгоритмических сетей (далее Методология) является *соглашение о минимально допустимом уровне математической и программисткой подготовки конечного пользователя*. В рассматриваемом случае считается, что пользователь должен владеть математическим аппаратом на уровне средней школы и иметь представ-

¹ *Имитационная модель* – математическая модель, с необходимой полной воспроизводящая как структуру, так и функционирование объекта-оригинала, и ориентирующаяся на итерационные процессы как средство получения знаний о нём.

ление о работе с компьютером на уровне MS Office. Отсюда основные положения Методологии [3,4]:

использование алгоритмического подхода как парадигмы моделирования, наилучшим образом отражающей специфику процедурных предметных знаний пользователей;

использование доступного пользователям языка представления знаний, единого для всех этапов решения задачи как гаранта понимания процесса достижения результата;

использование прозрачных технологий как средства нейтрализации проблемы некомпетентности пользователя в некоторых привлекаемых для решения задачи областях знаний. Под *прозрачными технологиями* здесь понимаются технологии, при которых проблемы некомпетентности пользователя в некоторой привлекаемой для решения задачи области знаний решаются за счет однозначного отображения этих знаний в знания, в которых пользователь является экспертом;

ориентация на привлечение знаний пользователя, в том числе плохо формализуемых, в процесс решения задачи как средство повышения адекватности полученного результата реальной задаче;

применение автоматизации программирования как средства, дающего возможность решения задач, не предусмотренных в первоначальной постановке.

В качестве языка представления в Методологии используется язык алгоритмических сетей [2] – графический язык, оперирующий исключительно функциональными зависимостями, имеющими место в предметной области, которой принадлежит исследуемый объект. Основными понятиями языка являются понятия функционального оператора и интерфейсной дуги.

Функциональный оператор реализует функциональное отношение, связывающее явления, которые представляют объект моделирования. Графическим отображением функционального оператора является круг, внутри которого помещен символ реализуемого оператором класса функций. Конкретный вид функции определяется множеством входных и выходных дуг, связанных с данным оператором. Различают операторы ввода-вывода информации и преобразующие операторы сети. Последние разделяются на операторы-вычислители, реализующие аналитические выражения элементарной математики, операторы-распознаватели, реализующие конструкции типа «IF_THEN_ELSE», и оператор «задержка по времени» (операторы данного вида необходимы для учета последствий в модели и позволяют описывать динамику объекта).

Формирование выходных переменных оператора осуществляется, как только становятся известными все его входные переменные. Таким образом, алгоритмическая сеть предстает в виде алгоритма, описывающего параллельные вычисления.

Интерфейсная дуга отображает одно из множества явлений, характеризующих объект моделирования. Графическим отображением интерфейсной дуги является однонаправленная стрелка. Направление стрелки определяет связь явлений в модели. Каждая интерфейсная дуга имеет уникальный номер и имя, являющееся оборотом существительного.

Синтаксис языка алгоритмических сетей включает ряд запретов и ограничений, в том числе: запрет вычисления одной и той же переменной более чем одним оператором и запрет использования в качестве входной информации оператора информации, являющейся результатом его расчета, в случае, если в образовавшемся контуре отсутствует оператор «задержка по времени».

На рисунке 1 в качестве примера приведена алгоритмическая сеть простейшей алгоритмической модели «Демография». В табл. 1 представлены наименования переменных и расчетные формулы, описывающие модель.

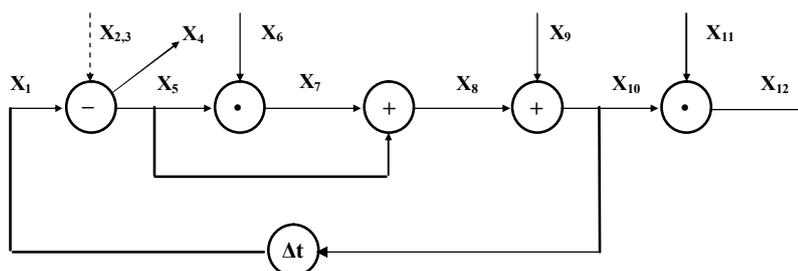


Рис. 1. Алгоритмическая сеть модели «Демография»

Таблица 1

Переменные и расчетные формулы модели «Демография»

Входные переменные	Расчетные переменные	
Наименование переменной	Наименование переменной	Расчетная формула
X_1 – количество населения на начало года	X_4 – количество убывшего населения	$X_4(t) = X_1(t) * X_2(t)$
X_2 – доля убывшего населения	X_5 – количество оставшегося населения	$X_5(t) = X_1(t) * X_3(t)$
X_3 – доля оставшегося населения	X_7 – естественный прирост населения	$X_7(t) = X_5(t) * X_6(t)$
X_6 – коэффициент естественного прироста	X_8 – коренное население	$X_8(t) = X_5(t) + X_7(t)$
X_9 – иммиграция	X_{10} – населения на конец года	$X_{10}(t) = X_8(t) + X_9(t)$
X_{11} – доля трудового ресурса	X_{12} – трудовой ресурс региона	$X_{12}(t) = X_{10}(t) * X_{11}(t)$
Передача значения населения в конце года t на начало года $t+1$ для последующего расчета		$X_1(t+1) = X_{10}(t)$

Как известно, задачи исследования, решаемые с помощью имитационного моделирования, можно разделить на 4 вида:

индуктивные задачи, решение которых имеет целью проверку гипотез, уточнение уравнений, описывающих процессы, происходящие в системе, выяснение свойств этих элементов, отладка программ (алгоритмов) для расчетов на компьютере.

задачи синтеза, требующие нахождения таких параметров, при которых процессы в системе будут иметь желательный по каким-либо соображениям характер;

прямые задачи анализа, при решении которых исследуемая система задается параметрами своих элементов и параметрами исходного режима, структурой или уравнениями, и требуется определить реакцию системы на действующие силы;

обратные задачи анализа, которые по известной реакции системы требуют найти возмущения, заставившие рассматриваемую систему прийти к данному состоянию и данной реакции.

Первые две задачи характерны для этапа построения модели, тогда как две оставшиеся – для этапа ее эксплуатации, когда эксперименты с «отлаженной» моделью служат основой для принятия управленческих решений.

Среди особенностей, имеющих место в процессе решения названных задач, Методология учитывает достаточно низкий уровень математической подготовки и компьютерной подготовки пользователя, наличие у пользователя знаний о предметной области, плохо поддающихся формализации, а также нечеткое представление пользователя о границах областей изменения переменных.

Этап построения модели. На данном этапе Методологии допускаются три основных режима:

- режим создания от причинно-следственных связей;
- режим создания от функциональных отношений;
- смешанный режим.

Режим создания от причинно-следственных/временных связей. Режим соответствует ситуации, когда известны явления, представляющие моделируемый объект и величины значений, их характеризующие. Процесс построения начинается с формирования концептуальной модели, предстающей в виде ориентированного отмеченного графа, отражающего представление разработчика о причинно-следственных или временных связях между явлениями, описывающими объект-оригинал. Далее на основании исходных данных осуществляется определение эмпирических формул, связывающих явления концептуальной модели. После чего последовательно реализуются верификация и идентификация (валидация) полученной модели. Под идентификацией здесь понимают выделение конкретного объекта из данного класса путем настройки его параметров. Процесс идентификации выполняется в итерационном режиме. Для подбора значений настраиваемых параметров используется метод, основанный на сведении данной задачи к задаче минимизации функции, которая строится как функция невязок реакций модели и объекта на одинаковые входные воздействия. Завершается этап исследованием свойств модели (прямая задача анализа, результаты которой используются в дальнейшем в качестве подсказок в ходе эксплуатации модели). Рассматриваемый режим – наиболее сложный режим формирования модели.

Режим создания от функциональных отношений соответствует ситуации, когда все функциональные отношения, связывающие переменные модели известны, например, существует методика расчета некоторых показателей. В этом случае построение концептуальной модели реализуется автоматически. Данный режим характеризуется минимальными трудозатратами на создание моделей.

Смешанный режим соответствует ситуации, когда функциональные отношения, связывающие переменные модели, известны частично. Разработка модели, как и в режиме создания от причинно-следственных связей, осуществляется в четыре этапа. При этом трудоемкость формирования модели меньше, чем в первом случае, но больше, чем во втором [3].

Этап эксплуатации модели. Методология поддерживает: формирование математической модели решаемой задачи, выбор метода ее решения, формирование вычислительного алгоритма и формирование соответствующего программного обеспечения. Рассмотрим особенности их реализации.

Формирование математической модели решаемой задачи. Среди прямых задач анализа можно назвать задачу построения фазовой траектории объекта по заданным значениям входных переменных и параметров модели (задача прогнозирования). Обратные задачи анализа предстают в виде математических моделей задач поиска решения уравнений (систем уравнений) либо нахождения оптимальных значений заданных переменных.

Методология предлагает способ формирования и различения математических моделей задач, основанный на инварианте, в качестве которого выступают аналитические выражения, описывающие задачу. По определению, алгоритмическая сеть модели задает некоторое аналитическое выражение (множество аналитических выражений). Предположим, аналитическое выражение предстает в виде $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где y – выходная переменная модели, x_1, x_2, \dots, x_n – входные переменные. Тогда в зависимости от способа задания

области изменения выходной переменной y , математическая модель задачи может быть проинтерпретирована как:

Исследование функции. Область изменения y не задана.

Решение уравнения. Область изменения y задана в виде некоторого числа или интервала.

Поиск экстремального значения. Область изменения y задана в виде некоторого характеристического свойства. Например, y должно быть минимальным/ максимальным среди всех возможных его значений.

Таким образом, согласно Методологии, постановка задачи пользователем сводится к заданию нужной выходной переменной и определению желаемой области ее изменения.

Выбор метода решения. Исходя из того что, в силу математической подготовки пользователя, результаты применения методов, основанных на использовании итерационных процессов¹, могут привести его к неверным заключениям, большое внимание в Методологии уделяется методам, позволяющим получить решение поставленной задачи в общем виде. *Вычислительный алгоритм метода* при этом получается непосредственно из математического описания модели задачи путем эквивалентных преобразований ее аналитического выражения. Отметим, что *для обратных задач анализа переход от методов имитационного моделирования к аналитическим методам, позволяет резко сократить трудозатраты, необходимые для достижения требуемого результата.* В качестве примера такого метода, используемого в Методологии, можно назвать *метод обращения алгоритмической сети*, основанный на использовании свойств обратной функции [9].

Наличие информации об отсутствии решения задачи в пределах выбранных ограничений позволяет ставить вопрос о том, при каких ограничениях поставленная задача может иметь такое решение. Иными словами, *в Методологии основная тяжесть использования итерационных процессов переносится из области достижения требуемого результата в область постановки задачи таким образом, чтобы достижение результата было гарантировано.*

Следует заметить, что нахождение решения в общем виде, тем более с учетом принятых в Методологии ограничений, не всегда возможно. В этом случае предполагается использование традиционных численных методов или режима имитационного эксперимента. Методология обуславливает возможность автоматизации данного этапа.

Построение расчетной программы. Необходимость формирования модулей, не предусмотренных в исходной модели и уровень компьютерной подготовки пользователя обусловили включение в Методологию положений, связанных с автоматизацией программирования. Последние нашли свое отражение в идее представления расчетных программ в виде набора соответствующих паттернов. Методология обуславливает возможность автоматизации данного этапа.

На основе Методологии разработаны различные версии систем автоматизации моделирования [5-7], в том числе экономико-ориентированные системы, системы, ориентированные на решение задач управления проектами, эколого-ориентированные системы. В версии системы автоматизации ЭКО-САПФИР [5] была реализована подсистема настройки параметров, использующая метод Ψ -преобразования В.К. Чичинадзе для поиска глобального экстремума и градиентные методы для уточнения решения. Система автоматизации моделирования «САПФИР-Искра.87» награждена серебряной медалью ВДНХ

¹ Под *итерационным* процессом здесь понимается процесс достижения требуемого результата, путём многократного повторения некоторых действий. Условием завершения процесса является либо установление факта получения требуемого результата, либо факта невозможности его получения в пределах сформулированных ограничений.

СССР. Система АСС (автоматизированная система советчик руководителя проекта разработки программного изделия) включена в перечень важнейших результатов Российской академии наук.

Модели, созданные с помощью названных систем успешно применялись в таких областях научной, образовательной и практической деятельности, как экономика (Госплан России, ГУП Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр), промышленность (Механический завод, Покровский стекольный завод, фирма «Кумир» Ивановской области), сельское хозяйство (Комитет по сельскому хозяйству Ленобласти, СА-ОЗТ «Ручьи» Ленинградской области), экология (ИЭМЭЖ, Институт озероведения, НИ-ИСХ Крайнего Севера, Программа ГКНТ по оз. Севан), управление разработкой программных изделий (ЗАО «Информационные деловые услуги»), высшее образование (ГУ-АП, ГУВК). Среди предметных областей, для которых создавались модели, можно назвать также химию, кораблестроение, военное дело. Пакет «Россия 84» (модель «Русь») награжден бронзовой медалью ВДНХ СССР.

Практика эксплуатации систем, построенных на базе Методологии, позволяет сделать следующие выводы:

Методология прошла успешную апробацию. Системы, созданные на основе Методологии, позволили широкому кругу пользователей получить доступ к современным средствам и методам моделирования и поддержки принятия решений.

Ориентация на привлечение плохо формализуемых знаний экспертов, использование прозрачных технологий позволяют повысить адекватность решений реальным условиям поставленной задачи, сокращает время принятия решений за счет удаления посредников в лице математиков и программистов.

Наличие и возможность совместного использования методов, поддерживающих режимы аналитического и имитационного моделирования, позволяет существенно сократить время, необходимое на достижения требуемых результатов.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-08-01016, 11-08-00767, 12-07-13119-офи-м-РЖД, 12-07-00302, 13-07-00279, 13-08-00702, 13-08-01250), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI –184/2011/14 «Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems» (2012–2013 гг.), проекта ESTLATRUS/1.2./ELRI-121/2011/13 «Baltic ICT Platform».

Литература

1. **Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)). Тр. СПИИРАН, вып. № 2 (25), ISSN № 2078-9181 (печ.). – СПб. – 2013. – С. 42–112.
2. **Иванищев В.В., Марлей В.Е., Морозов В.П.** Язык алгоритмических сетей: препринт № 63 ЛНИВЦ АН СССР. – Л., 1984. – 37 с.
3. **Морозов В.П.** Методология и системы моделирования на основе алгоритмических сетей // X Санкт-Петербургская международная конф. «Региональная информатика-2006» («РИ-2006»), Санкт-Петербург, 24–26 октября 2006 г.: труды конференции. – СПб.: СПОЙСУ, 2007. – С. 112–118.
4. **Морозов В.П.** Поддержка принятия решений, ориентированная на знания эксперта / Региональная информатика (РИ-2010). XII Санкт-Петербургская международная конф. «Региональная информатика (РИ-2010)», Санкт-Петербург, 20–22 октября 2010 г.: труды конференции \ СПОЙСУ. – СПб, 2011. – С. 69–73.

-
5. **Иванищев В.В., Михайлов В.В., Тубольцева В.В.** Инженерная экология. – Л.: Наука, 1988. – 143 с.
 6. **Марлей В.Е., Михайлов В.В. Королев О.Ф.** Алгоритмические сети и их применение. Издание 2-е, дополненное. – СПб.: ГУАП, 2012. 132 с.
 7. **Иванищев В.В., Михайлов В.В.** Автоматизация моделирования экологических систем. – СПб. Изд-во СПбГТУ, 2000. – 171 с.
 8. **Иванищев В.В., Марлей В.Е.** Введение в теорию алгоритмических сетей. – СПб. Изд-во СПбГТУ, 2000. – 179 с.
 9. **Морозов В.П.** Задачи на вычисление при наличии ограничений. Метод обращения // Алгоритмическое моделирование, инструментальные средства и модели. – СПб.: СПИИ-РАН, 1992. – С.112–137.