

## ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Нечаевский Андрей Васильевич

*Инженер-программист, ассистент кафедры РИВС;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;  
ГБОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»;  
Институт системного анализа и управления;  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;  
e-mail: nechav@mail.ru.*

*Технологии компьютерного моделирования широко используются в настоящее время. Целесообразность модельного обеспечения сложных технических разработок и научных исследований сегодня не вызывает никаких сомнений. В будущем роль и значение компьютерного моделирования, безусловно, значительно возрастет. В работе дается обзор методов моделирования. Рассматривается эволюция и развитие средств компьютерного имитационного моделирования. Перспективы развития этой области также рассматриваются в работе.*

Ключевые слова: компьютерное моделирование, имитационное моделирование, gpss, simula.

## THE COMPUTER SIMULATION DEVELOPMENT STAGES

Nechaevskiy Andrey

*Engineer-programmer, Assistant;  
Joint institute for nuclear researches;  
141980, Moscow reg., Dubna, Joliot-Curie, 6;  
Dubna International University of Nature, Society and Man,  
Institute of system analysis and management;  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;  
e-mail: nechav@mail.ru.*

*Simulation technology is widely used. The software simulation appropriateness of technical development and research is not in doubt today. The role and importance of computer simulation will increase significantly in the future. This paper provides an overview of simulation techniques. The evolution and development of computer simulation are shown. The future development of the simulation are considered.*

Keywords: computer modeling, simulation, gpss, simula.

Технологии компьютерного моделирования широко используются в настоящее время. Целесообразность модельного обеспечения сложных технических разработок и научных исследований сегодня не вызывает никаких сомнений. В будущем роль и значение компьютерного моделирования, безусловно, значительно возрастет.

Современное компьютерное моделирование выступает как средство общения людей (обмен информационными, компьютерными моделями и программами), осмысления и познания явлений окружающего мира (компьютерные модели солнечной системы, атома и т.п.), обучения и тренировки (тренажеры), оптимизации (подбор параметров) [1].

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать в силу их возможности проводить вычислительные эксперименты, которые по сравнению с реальным экспериментом затруднены из-за финансовых и физических препятствий или могут дать непредсказуемый результат. Логичность и

формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта-оригинала (или целого класса объектов), в частности, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменения ее параметров и начальных условий.

В первой части работы описан ряд общих положений по моделированию, чтобы подчеркнуть важность моделирования как метода научного познания.

Во втором разделе кратко описаны методы моделирования применительно к естественным и техническим наукам. Дано определение компьютерного моделирования, рассматриваются цели и задачи такого метода моделирования.

В третьем разделе описана история развития компьютерного имитационного моделирования. Начиная с 50-х годов XX-го века, задачи компьютерного моделирования разрабатывались на основе общеизвестных универсальных языков. Однако со временем, этих средств стало недостаточно для реализации полноценных моделей, что привело к созданию языков имитационного моделирования. Дальнейшая эволюция средств имитационного моделирования была обусловлена развитием персональных компьютеров и средств графического интерфейса. В настоящее время для моделирования необходимы значительные ресурсы и вопросу моделирования с использованием распределенных компьютерных систем, также уделено внимание. Интересным и развивающимся направлением в области компьютерного имитационного моделирования является виртуальная реальность. Работы по виртуальной реальности рассматриваются как главное направление развития всей компьютерной отрасли в будущем.

## Моделирование как метод научного познания

Слово «модель» произошло от латинского слова «modulus», означает «мера», «образец». Его первоначальное значение было связано со строительным искусством, и почти во всех европейских языках оно употреблялось для обозначения образа, прообраза, или вещи, сходной в каком-то отношении с другой вещью. Модель – это такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал так, что его непосредственное изучение дает новые знания об объекте-оригинале.

При представлении модели средствами математики и логики возникает абстрактный образ реального объекта, при исследовании образца реального объекта в качестве модели имеет место конкретное исследование. Моделирование находится в промежутке между этими двумя точками (рис. 1) [2].

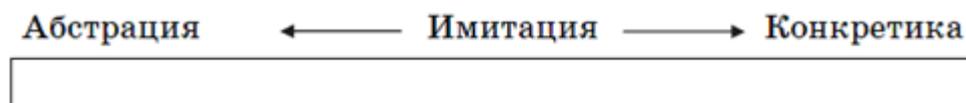


Рис.1. Место имитационного моделирования в модельном пространстве

Под моделированием понимается процесс построения, изучения и применения моделей. Главная особенность моделирования в том, что это метод опосредованного познания с помощью объектов-заместителей. Именно эта особенность метода моделирования определяет специфические формы использования абстракций, аналогий, гипотез, других категорий и методов познания. Моделирование представляет собой один из основных методов познания, является формой отражения действительности и заключается в выяснении или воспроизведении тех или иных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстрактного описания в виде изображения, плана, карты, совокупности уравнений, алгоритмов и программ [2].

Моделирование в научных исследованиях стало применяться еще в глубокой древности и постепенно захватывало все новые области научных знаний: техническое конструирование, строительство и архитектуру, астрономию, физику, химию, биологию и, наконец, общественные науки. Большие успехи и признание практически во всех отраслях современной науки принес методу моделирования XX век. Методология моделирования долгое время развивалась отдельными науками независимо друг от друга. Отсутствовала единая система понятий, единая терминология. Лишь постепенно стала осознаваться роль моделирования как универсального метода научного познания. Однако компьютерное моделирование не может рассматриваться как третий путь получения научного знания и

способ рассуждений, наряду с эмпирическим и теоретическим, индукцией и дедукцией. Важное методологическое значение этого приема состоит прежде всего в том, что он позволяет «переложить» сложные методологические проблемы науки на современный язык, тем самым не только открывая новую перспективу их рассмотрения, но и позволяя определить наиболее сложные моменты на пути их решения.

Необходимость использования метода моделирования определяется тем, что многие объекты (или проблемы, относящиеся к этим объектам) непосредственно исследовать или вовсе невозможно, или же это исследование требует много времени и ресурсов.

Этап построения модели предполагает наличие некоторых знаний об объекте-оригинале. Познавательные возможности модели обуславливаются тем, что модель отражает какие-либо существенные черты объекта-оригинала. Вопрос о необходимости и достаточной мере сходства оригинала и модели требует конкретного анализа. Очевидно, что модель утрачивает свой смысл как в случае тождества с оригиналом (тогда она становится оригиналом), так и в случае чрезмерного во всех существенных отношениях отличия от оригинала.

Таким образом, изучение одних сторон моделируемого объекта осуществляется ценой отказа от отражения других сторон. Поэтому любая модель замещает оригинал лишь в строго ограниченном смысле. Из этого следует, что для одного объекта может быть построено несколько «специализированных» моделей, концентрирующих внимание на определенных сторонах исследуемого объекта или же характеризующих объект с разной степенью детализации.

Ниже представлен ряд методов моделирования, применяемых в естественных и технических науках.

## Обзор методов моделирования

Основными разновидностями процесса моделирования можно считать два его вида – *математическое* и *физическое* моделирование.

При физическом (натурном) моделировании исследуемая система заменяется соответствующей ей другой материальной системой, которая воспроизводит свойства изучаемой системы с сохранением их физической природы. Примером этого вида моделирования может служить тестовая сеть, с помощью которой изучается принципиальная возможность построения сети на основе тех или иных компьютеров, коммуникационных устройств, операционных систем и приложений. Возможности физического моделирования довольно ограничены. Оно позволяет решать отдельные задачи при задании небольшого количества сочетаний исследуемых параметров системы. При натурном моделировании практически невозможно проверить работу системы для различных вариантов. Проверка на практике около десятка разных типов условий связана не только с большими усилиями и временными затратами, но и с немалыми материальными затратами. Во многих важных областях исследований натурный эксперимент невозможен, потому что он либо запрещен (изучение здоровья человека), либо слишком опасен (изучение экологических явлений), либо просто неосуществим (изучение астрофизических явлений).

Поэтому во многих случаях предпочтительным оказывается использование математического моделирования. Математическая модель представляет собой совокупность соотношений (формул, уравнений, неравенств, логических условий), определяющих процесс изменения состояния системы в зависимости от ее параметров, входных сигналов, начальных условий и времени. Под математическими моделями понимают основные закономерности и связи, присущие изучаемому явлению. Это могут быть формулы или уравнения, наборы правил или соглашений, выраженные в математической форме [3].

В настоящее время широко применяется два вида математического моделирования: *аналитическое* и *имитационное*. При аналитическом моделировании изучаются математические (абстрактные) модели реального объекта в виде алгебраических, дифференциальных и других уравнений, а также предусматривающих осуществление однозначной вычислительной процедуры, приводящей к их точному решению. При имитационном моделировании исследуются математические модели в виде алгоритма(ов), воспроизводящего функционирование исследуемой системы путем последовательного выполнения большого количества элементарных операций.

Аналитическое моделирование позволяет получать более точное решение, формируя математические законы, связывающие объекты системы, записанные в виде некоторых функциональных соотношений. Задачей аналитического моделирования является решение уравнений для получения теоретических результатов и сопоставление этих результатов с практикой. К достоинствам аналитического моделирования можно отнести большую силу обобщения, многократность использования, но наиболее полное исследование процесса функционирования системы можно провести, если известны явные зависимости связывающие искомые характеристики с начальными условиями, параметрами и переменными системы. Однако такие зависимости удастся получить для сравнительно простых систем. Чтобы использовать аналитический метод необходимо существенно упростить первоначальную модель, чтобы иметь возможность изучить общие свойства системы.

Развитие информационных технологий привело к тому, что компьютеры стали использовать для моделирования процессов функционирования системы, причем в этом случае имелись алгоритм и программа, а математическая модель в ее классическом виде практически отсутствовала или предполагалось, что математической моделью является одно из аналитических представлений. Это направление получило название имитационного моделирования. Такие модели представляют собой компьютерную программу, которая шаг за шагом воспроизводит события, происходящие в реальной системе. Преимуществом имитационных моделей является возможность подмены процесса смены событий в исследуемой системе в реальном масштабе времени на ускоренный процесс смены событий в темпе работы программы.

Процесс построения имитационных моделей представляет собой последовательное выполнение этапов имитационного моделирования. Этапы процесса моделирования [4]:

1. формулирование проблемы – описание исследуемой проблемы и определение целей исследования;
2. разработка модели – логико-математическое описание моделируемой системы в соответствии с формулировкой проблем;
3. подготовка данных – идентификация, спецификация данных;
4. трансляция модели – перевод модели машинный язык;
5. верификация модели – установление правильности машинных программ;
6. валидация модели – оценка требуемой точности и соответствия имитационной модели реальной системе;
7. стратегическое и тактическое планирование – определение условий проведения машинного эксперимента с имитационной моделью;
8. экспериментирование – прогон имитационной модели для получения требуемой информации;
9. анализ результатов – изучение результатов моделирования для решения проблемы.

Названные выше этапы имитационного исследования редко выполняются в строго заданной последовательности, начиная с определения проблемы и кончая документированием. В ходе имитационного исследования могут быть сбои в прогонах модели, ошибочные допущения, от которых, в последствии, приходится отказываться, переформулировки целей исследования. То есть, на каждом этапе возможно возвращение назад, к предыдущим этапам. Именно такой итеративный процесс даёт возможность получить модель, которая позволяет принимать решения. Упрощенно процесс разработки имитационной модели представлен на рисунке 2:



Рис. 2. Упрощенный вариант процесса моделирования

Имитационные модели позволяют достаточно просто учитывать случайные воздействия и другие факторы, которые создают трудности при аналитическом исследовании. Данные модели позволяют проводить эксперименты, меняя при этом условия протекания процесса, и в конечном счете определить такие условия, при которых результат удовлетворяет требованиям. Результатом работы имитационной модели являются собранные в ходе наблюдения за протекающими событиями статистические данные о наиболее важных характеристиках изучаемой системы.

При имитационном моделировании логическая структура моделируемой системы адекватно отображается в модели, а процессы ее функционирования и динамика взаимодействия ее элементов воспроизводятся (имитируются) на модели. Поэтому построение имитационной модели включает в себя структурный анализ моделируемой системы и разработку функциональной модели, отражающей динамические портреты моделируемой системы.

Имитационное моделирование сегодня становится все более зрелой технологией компьютерного моделирования, благодаря чему наблюдается устойчивый рост применения этого метода в самых различных областях, связанных с управлением и принятием решений экономического, организационного, социального и технического характера.

Компьютерное моделирование – метод решения задачи анализа или синтеза сложной системы на основе использования ее компьютерной модели. Традиционно под компьютерным моделированием понималось лишь имитационное моделирование. Однако можно увидеть, что и при других видах моделирования компьютер может быть весьма полезен. Например, при математическом моделировании выполнение одного из основных этапов – построение математических моделей по экспериментальным данным – в настоящее время просто немыслимо без компьютера. Компьютерное моделирование, возникшее как одно из направлений математического моделирования, с развитием компьютерных технологий стало самостоятельной и важной областью применения компьютеров [6].

Компьютерные модели, могут использоваться для:

- численного математического моделирования;
- визуализации явлений и процессов (как для аналитических, так и для численных моделей);
- специализированных прикладных технологий, использующих компьютер (как правило, в режиме реального времени) в сочетании с измерительной аппаратурой, датчиками и т.п.

## ***Развитие компьютерного имитационного моделирования***

Исторически сложилось так, что первые работы по компьютерному моделированию были связаны с физикой, где с помощью моделирования решался целый ряд задач гидравлики, фильтрации, теплопереноса и теплообмена, механики твердого тела и т.д. [3, 7, 8]. Моделирование в основном представляло собой решение сложных нелинейных задач математической физики с помощью итерационных схем, и по существу было моделированием математическим. Успехи математического моделирования в физике способствовали распространению его на задачи химии, электроэнергетики, биологии и некоторых других дисциплин, причем схемы моделирования не слишком отличались друг от друга. Сложность решаемых с помощью моделирования задач всегда ограничивалась лишь мощностью имеющихся компьютеров.

Характерно, что с появления статьи Дж. Неймана (John von Neumann) и С. Улама (Stanislaw Ulam) в 1948 г. – первой работы по применению метода Монте Карло, многие специалисты продолжают называть компьютерное моделирование методами Монте Карло или статистических испытаний. Это в принципе не верно, так как компьютерное моделирование разделилось на четыре направления:

1. методы Монте Карло или методы вычислительной математики, использующие приближенные численные методы, когда все объекты аппроксимируются числами или их комплектами в принятой числовой сетке, а результаты получаются в виде таблиц или графиков с учетом возможностей современных компьютеров. Этими методами можно вычислять любые, не берущиеся аналитическим путем, многократные интегралы, решать системы уравнений;
2. методы имитационного моделирования (simulation);
3. методы статистической обработки данных моделирования на основе методов планирования эксперимента;
4. комплексы имитационного моделирования, объединяющие все названные виды компьютерного моделирования, пользовательский интерфейс, автоматизированные системы поддержки принимаемых решений и т. д. Это направление предназначено для исследования сложных систем [2].

Имитационное моделирование основано на применении логико-математической модели сложной системы – со всеми вытекающими особенностями и осложнениям. Во-первых, построение математической модели в отличие от структурно-функционального моделирования требует большого объема детальной информации о системе, включая всевозможные логические и количественные соотношения. Во-вторых, выбор математического аппарата существенно сказывается на самой имитационной модели и на выборе инструментальных средств. Ясно, что выбор излишне сложного математического аппарата (скажем, систем дифференциальных уравнений в частных производных) или привлечение большого числа методов из различных разделов математики значительно усложнит задачу имитационного моделирования. В-третьих, при построении логико-математической модели всегда приходится решать проблему выбора между сложностью модели и ее точностью, удобством использования и ее универсальностью, – поскольку эти критерии, как правило, противоречивы. В частности, излишне сложные модели редко удается довести до этапа, на котором они могут быть реально использованы: обнаруживается, что-либо не все константы уравнений известны, либо не все зависимости могут быть представлены в виде соотношений. В то же время простая модель может не учитывать те или иные особенности объекта или среды. Именно поэтому составление логико-математической модели и использование ее для имитационного моделирования было, есть и будет искусством. Чтобы добиться успеха при моделировании сложных систем, в первую очередь требуется доскональное знание объекта моделирования, четкое понимание назначения строящейся имитационной модели и, наконец, владение техникой имитационного моделирования.

Инструментальные средства имитационного моделирования – языки моделирования, появились довольно давно, почти одновременно с языками Fortran и Algol<sup>1</sup>, и прошли путь от бурного развития в 70-х годах, когда они ежегодно рождались десятками, до современного стабильного состояния, когда доминирует лишь несколько языков. Наиболее широко используемые в настоящее время языки имитационного моделирования и инструментальные средства, их реализующие, подразделяются на три большие группы: языки имитационного моделирования непрерывных динамических систем; языки имитационного моделирования дискретных систем; универсальные языки.

Известный специалист в области имитационного моделирования Р.Нанс (Richard E. Nance) в своей работе [9] определял несколько этапов развития имитационного моделирования. Основные этапы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные этапы развития методов имитационного моделирования (Р.Нанс)

Этапы	Языки и системы моделирования
1955-1960	Fortran, Algol
1961-1965	GPSS, SOL, SIMSCRIPT, CSMP360, CSL, SIMULA
1966-1970	GPSS V, SIMSCRIPT II.5, SIMULA 67, СЛЭНГ
1971-1978	GASP IV, CADSIM, DEMOS, ECSL, MODEL-6, АЛСИМ-БЭСМ, НЕДИС
1979-1986	GPSS/H, HOCUS, MICROSAINТ 3.1, MIC-SIM, Inter-SIM, АЛСИМ-2, ТАИС

*Этап 1 (1955-1960).* В этот период программы для задач компьютерного моделирования разрабатывались на основе таких общеизвестных универсальных языков, как Fortran и Algol.

Fortran появился в 1957 году. Но работы по его созданию начались намного раньше. С 1954 годов группа инженеров компании IBM под руководством Джона Бекуса занималась созданием компилятора для Fortran. Эти работы велись более 2-х лет и, в конце концов, привели к созданию нового языка. Fortran – это сокращение от двух английских слов FORMula TRANslator – что переводится как «транслятор формул». Первоначально язык создавался с целью использования при математических расчетах. Он предназначался для написания программ, используемых при решении прикладных технических задач. Основу языка составляли арифметические операторы, соответствующие по своему синтаксису традиционной записи математических выражений. В дополнение к этому в языке имелись средства разбиения сложных алгоритмов на более простые за счет явного определения подпрограмм и функций. Описания данных в Fortran были ориентированы на представление главным образом числовой информации, поэтому и типы данных были просты: это целые и действительные числа, а также массивы из таких чисел.

Языков программирования было немного и они не всегда устраивали разработчиков. Поэтому ряд ведущих программистов в Цюрихе представили в 1958 году новый язык программирования – Algol (сокращение от ALGOrithmic Language – алгоритмический язык программирования). Первая версия языка так и называлась – Algol58, а позднее, в 60-м году, был принят стандарт Algol60, который и стал основным на долгие годы. Основная заслуга этого языка в том, что он заложил базу для дальнейшего развития программистской мысли, и многие языки программирования, разработанные впоследствии и получившие широкое распространение как в кругу профессионалов, так и среди любителей, содержат многие идеи и решения, взятые из Algol.

Создание моделей с помощью этих языков выглядело следующим образом: в компьютер вводили систему уравнений с детерминированными и случайными коэффициентами, задавали шаг времени, с помощью датчика случайных чисел изменяли случайные коэффициенты, а результаты решения подвергали статистической обработке. Схематично этот процесс изображен на рисунке 3. Поскольку шаг времени выбирали для самого быстрого процесса, то после моделирования получали множество ненужных данных о шагах, когда изменений в системе нет. Разработка модели часто отставала от развития объекта моделирования, а ее доработка отнимала много времени.

<sup>1</sup> Первые языки программирования высокого уровня, появившиеся в 50-х годах XX века.

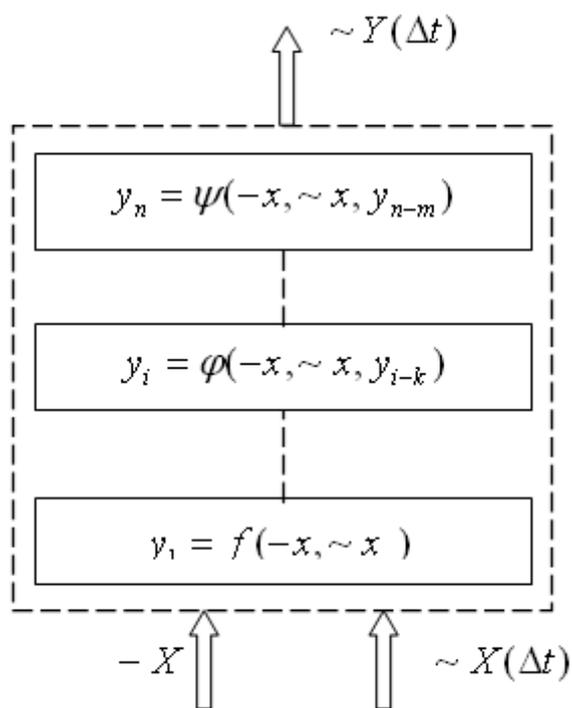


Рис. 3. Имитационное моделирование на универсальном языке

Компьютеры между тем развивались, и становилось понятным, что с их помощью можно решать самые разнообразные проблемы, зачастую не связанные с научными приложениями. Поэтому стали появляться первые языки моделирования.

Этап 2 (1961-1965). Появились первые языки моделирования: GPSS, SIMSCRIPT, SIMULA, CSL, SOL.

Ярким примером первых языков имитационного моделирования является широко известный язык моделирования дискретных систем - GPSS (General Purpose Simulating System). Появившийся впервые еще в 1961 году, он выдержал множество модификаций для самых различных операционных систем и компьютеров и в то же время сохранил почти неизменными внутреннюю организацию и основные блоки [10]. Основными понятиями языка GPSS являются транзакт, блок, оператор. Транзакт GPSS – это динамический объект, под которым может подразумеваться клиент, требование, вызов или заявка на обслуживание прибором обслуживания. То есть основное назначение GPSS – это моделирование систем массового обслуживания, хотя наличие дополнительных встроенных средств позволяет моделировать и некоторые другие системы (например, распределение ресурсов между потребителями). Транзакты в GPSS могут создаваться (вводиться), уничтожаться (выводиться), задерживаться, размножаться, сливаться, накапливаться и т. д. Именно благодаря наличию транзакта GPSS обладает такой изящностью и простотой. Другим фундаментальным понятием GPSS является понятие «блок». Блок GPSS представляет собой некоторый самостоятельный элемент моделируемой системы. Каждый блок реализует одну или несколько операций над транзактом, группой транзактов или параметрами транзактов, а совокупность блоков составляет моделирующую программу. Таким образом, GPSS имеет блочную структуру и легко может быть приспособлен и для структурно-функционального моделирования не очень сложных систем. GPSS достаточно легкий в освоении, а наличие в нем функций, переменных, стандартных атрибутов, графики и статистических блоков существенно расширяет его возможности.

В конце 80-х, на фоне значительных успехов языков объектно-ориентированного программирования, позволяющих строить исключительно гибкие инструментальные средства имитационного моделирования, интерес к GRSS стал угасать.

Однако в последние годы интерес к GPSS вновь возрос [11]. На первой Internet-конференции по компьютерному моделированию, которая проходила в ноябре 1996 года на базе Афинского нацио-

нального университета, значительное число работ опиралось на использование GPSS/H+PROOF<sup>2</sup>. В настоящее время в США, где GPSS наиболее популярен, организовано несколько интерактивных серверов GPSS, куда пользователь может обращаться как для решения своих конкретных задач, так и, что гораздо более важно, для использования библиотек готовых имитационных модулей.

Дальнейшее развитие языков моделирования положило начало использования объектно-ориентированных принципов в моделировании.

*Этап 3 (1965-1970).* Появилось второе поколение языков моделирования GPSS V, SIMSCRIPT II.5, SIMULA 67.

Особое место среди языков имитационного моделирования этого периода занимает SIMULA-67, разработанный в Норвежском вычислительном центре У. И. Далом, Б. Мюрхаугом и К. Нюгордом, [12]. Разработчики языка SIMULA-67 положили начало объектно-ориентированному представлению систем. Имя языка программирования SIMULA происходит от английских слов SIMULation LANguage, что в переводе означает «язык моделирования». SIMULA-67 основывается на языке ALGOL-60 и содержит его в качестве своего подмножества.

Этот язык был предназначен для моделирования различных объектов и процессов, и объектно-ориентированные черты появились в нем именно для описания свойств модельных объектов. В нем впервые получила практическое воплощение концепция ядра языка как средства иерархического, структурированного описания класса объектов, последующее развитие которой привело к созданию объектно-ориентированного программирования.

Фундаментальным новым понятием языка SIMULA -67 является понятие «объект», которое эволюционировало из понятия «процесс» языка SIMULA A-1. Под объектом понимается экземпляр описания класса, который имеет свои собственные локальные данные и действия. В языке SIMULA-67 имеются элементарные операторы, которые позволяют организовать исполнение программы в виде последовательных активных фаз объектов. Это исполнение называют «квазипараллельным». Квазипараллельное исполнение программ позволяет отойти от обычной схемы решения (в виде последовательности шагов) задачи и представить ее в виде ряда взаимодействующих объектов, получивших название «сопрограмм».

Установление в языке таких понятий, как «класс» и «подкласс» и других механизмов, позволяет использовать SIMULA-67 в качестве основы для построения специализированных языков, ориентированных на различные предметные области. Он является весьма удобным средством создания самих языков имитационного моделирования. Средствами SIMULA довольно легко реализовать, например, GPSS, не говоря уже о более простых языках моделирования. Развитые средства организации и ведения библиотек позволяют легко построить любой язык моделирования как совокупность некоторых классов. Одним из преимуществ языка по сравнению с базовым предшественником является наличие средств ввода-вывода.

Идеи, заложенные в языке SIMULA-67, оказали существенное влияние на языки программирования, появившиеся после него. В частности, понятие «класс» нашло свое воплощение в понятии «абстрактные типы данных», а понятие «объект» – в объектно-ориентированном программировании, хотя разработка SIMULA-67 в принципе не преследовала цели создания объектно-ориентированного языка.

*Этап 4 (1971-1978).* На этой стадии происходит развитие уже разработанных языков и средств моделирования, ориентированное, прежде всего, на повышение эффективности процессов моделирования и превращения моделирования в более простой и быстрый метод исследования сложных систем.

К числу широко известных языков имитационного моделирования относится также язык SLAM, разработанный профессором Университета Пердью Аленом Прицкером в начале 70-х [13]. В основе

---

<sup>2</sup> GPSS/H – мощная и сбалансированная система имитации, а Proof Animation – система анимации, ориентированная на моделирование.

языка SLAM лежит простая идея – объединить достоинства GPSS и DYNAMO<sup>3</sup> таким образом, чтобы, допуская раздельное применение этих языков, можно было при необходимости использовать их совместно. Реализация этого принципа на ЭВМ с цифровыми дисплеями хотя и давала некоторые преимущества при моделировании, однако не вносила качественных изменений в процесс моделирования. Однако, переход к графическим интерфейсам раскрыл все преимущества этого принципа.

Многолетнее отставание России в области имитационного моделирования было обусловлено отсутствием информации на русском языке и высокой стоимостью лицензий на программные продукты. Так, например, при разработке отечественного языка НЕДИС были использованы отдельные детали известных в то время по публикациям языков SIMULA-67 и ALGOL-68. Система не имела аналогов в практике отечественного моделирования и по своим возможностям система НЕДИС близка к системам на базе таких языков, как SIMULA-67, GASP-IV, SLAM-II. Разработчики системы НЕДИС, кроме работ по внедрению и сопровождению системы, выполнили большой объем работ по адаптации системы НЕДИС в различных прикладных областях. Встроенный в язык НЕДИС механизм библиотечных вступлений и заключений позволял создавать многоуровневые библиотеки приложений. Система использовалась для проведения исследований и различного рода проектных работ в таких областях как: проектирование вычислительных машин, систем и сетей передачи данных, планирование ремонтных и профилактических работ для различных парков самолетов, системы управления и контроля в конвертерном производстве, проектирование средств и систем ракетно-космической техники и в других областях. Разработанные на базе системы НЕДИС приложения, как правило, использовались не только для получения широкого спектра статистических характеристик основных показателей функционирования соответствующих прикладных систем, но и для решения разноплановых стратегических проблем. Система НЕДИС послужила основой разработки нескольких последующих поколений систем имитационного моделирования. В течении 1991–1993 гг. выполнялись работы по созданию технологической системы программирования НЕДИС-90 и реализации ее на ПЭВМ IBM PC AT/386. Система предназначалась для оперативной разработки проблемно-ориентированных языков для самого широкого круга применений. Пользователи системы получали возможность строить свои собственные функциональные эквиваленты таких языков, как SIMULA, GASP-IV, VHDL [15].

*Этап 5 (1979-1986).* Годы перехода от программирования к развитию моделей. Основной акцент был перенесен на идентификацию интегрированных средств имитационного моделирования.

Процесс моделирования включает такие этапы, как создание модели, программирования, проведения имитационных экспериментов, обработку и интерпретацию результатов моделирования. Традиционно преимущество отдавалось этапу программирования. Возникающая при этом схема моделирования во многом повторяет схему проведения натуральных испытаний и сводится лишь к имитации траекторий изученных моделей. С появлением имитационных моделей изменилась концепция моделирования, которая теперь рассматривается как единственный процесс построения и исследование моделей, которое имеет программную поддержку. Теперь на первое место ставится формальное понятие модели, которое не только объясняет динамику системы, но и служит предметом математических исследований. Становится возможным достоверный анализ многих практически важных свойств модели (стационарных распределений, малых вероятностей, чувствительности, надежности и достоверности результатов моделирования). Эти свойства особенно существенны при исследовании высоко ответственных и полно масштабных систем, где цена ошибки особенно высока.

Не стоит забывать, что выбор языка моделирования влечет за собой принятие концепции авторов языка, что не может не сказаться на стратегии разработки, построения и совершенствования модели, ибо этот процесс существенно зависит от гибкости и мощности изобразительных средств языка, ресурсов, предоставляемых пользователю.

Для моделирования сложной системы нужен аппарат программирования, предусматривающий: способы организации данных, обеспечивающие простое и эффективное моделирование; удобные средства формализации и воспроизведения динамических свойств моделируемой системы; возможности имитации стохастических систем, т.е. процедуры генерирования и анализа случайных величин

---

<sup>3</sup> Язык имитационного моделирования, разработанный Дж. Форрестером [14].

и временных рядов. Реализация требований к имитационным моделям в рамках универсального языка программирования приводит к громоздким и неудобным для практического использования программам. В большинстве таких программ могут разобраться только их авторы, а любое изменение в постановке задачи требует переработки значительной части текста программы. Дальнейшее развитие сред имитационного моделирования приводит к созданию новых интерфейсов для упрощения работы пользователя.

*Этап 6 (1987-1994).* Перенесение программного обеспечения для имитационного моделирования на персональные компьютеры с использованием средств графического интерфейса (для визуализации и анимации процессов моделирования).

Системы автоматизации моделирования, разработанные в 60-70-е годы (Simula, SLAM, НЕДИС и другие), были слишком сложны для широкого пользователя, прежде всего из-за сложности текстовой формы описания модели и отсутствия программных реализаций эффективных численных методов.

В 90-х годах появились среды имитационного моделирования (Arena, Extend, MicroSaint, Enterprise Dynamics и пр.) содержащие интерфейс непрограммирующего пользователя, входные и выходные анализаторы, возможность анимации имитационного моделирования. Такие среды не требуют программирования в виде последовательности команд. Вместо составления программы пользователь компокует модель, перенося готовые блоки из библиотеки на рабочее поле и устанавливая связи между ними.

Пакеты визуального моделирования позволяют пользователю вводить описание моделируемой системы в естественной для прикладной области и преимущественно графической форме, а также представлять результаты моделирования в наглядной форме, например, в виде диаграмм или анимационных картинок.

Одним из главных достоинств систем визуального моделирования является то, что они позволяют пользователю не заботиться о программной реализации модели, как о последовательности исполняемых операторов, и тем самым создают на компьютере некоторую чрезвычайно удобную среду, в которой можно создавать виртуальные, параллельно функционирующие системы и проводить эксперименты с ними. Графическая среда становится похожей на физический испытательный стенд, только вместо тяжелых металлических ящиков, кабелей и реальных измерительных приборов, осциллографов и самописцев пользователь имеет дело с их образами на экране дисплея. Образы можно перемещать, соединять и разъединять с помощью мыши. Кроме того, пользователь может видеть и оценивать результаты моделирования по ходу эксперимента и, при необходимости, активно в него вмешиваться.

Еще одной важной особенностью этого этапа развития имитационного моделирования является использование технологии объектно-ориентированного моделирования, что позволяет резко расширить границы применимости и повторного использования уже созданных и подтвердивших свою работоспособность моделей.

Средства моделирования на этом этапе позволяли создавать модели, для расчета которых требовались значительные вычислительные ресурсы. Это требование определило путь дальнейшего развития компьютерного имитационного моделирования.

*Этап 7 (1995-1998).* Разработка средств технологической поддержки процессов распределенного имитационного моделирования на мультипроцессорных компьютерах и сетях.

В начале 90-х впервые были изложены и обобщены результаты по практическому созданию завершенной моделирующей среды, ориентированной на использование распределенных и параллельных вычислительных средств [16], как новой парадигмы в области вычислений, что в последующем стало одним из приоритетных направлений исследований и разработок в области компьютерного моделирования.

Исторически сложилось так, что термин «распределённая система имитации» относился к системам, выполняемым на вычислительной системе, узлы которой географически могли находиться на весьма отдалённом расстоянии друг от друга. В этих системах время, которое затрачивалось на передачу сообщений между узлами, было сравнительно велико, а производительность систем – низкая. Термин «параллельная система имитации» применялся к системе имитации, функционирующей на высокопроизводительных вычислительных системах. В этих системах время, затрачиваемое на коммуникацию между узлами, незначительно по сравнению со временем, затрачиваемым на вычисления.

В связи с появлением кластеров рабочих станций, корпоративных и Grid-систем, границы между параллельными и распределёнными системами имитации стираются.

Для решения задачи распределения вычислений между узлами и сокращения времени проведения имитационного эксперимента было предложено:

- Выполнять параллельно с ходом имитационного эксперимента специализированные функции, а именно: генерацию псевдослучайного числа, управление списком будущих событий, сбор статистических данных (специализированные функции) [17]. Однако, выигрыш во времени в этом случае является небольшим.
- При декомпозиции иерархической модели, происходит декомпозиция события на подсобытия (sub event). Эти подсобытия следует выполнить параллельно (иерархическая декомпозиция) [18]. Выигрыш во времени при декомпозиции модели зависит от самой модели.
- Выполнять несколько имитационных прогонов последовательной имитационной модели на нескольких процессорах (распараллеливание репликаций) [17], схематично это показано на рисунке 4. В этом случае вычислительные узлы должны обладать соответствующими вычислительными ресурсами, для выполнения имитационного прогона всей модели.

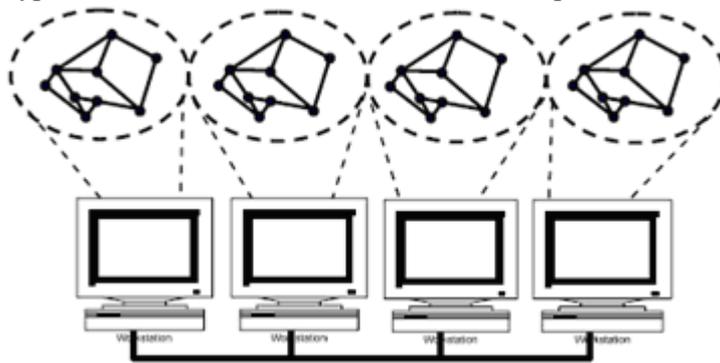


Рис. 4. Выполнение нескольких имитационных прогонов параллельно

- Распределить выполнение имитационной модели на несколько процессоров (компьютеров). Это распределение можно назвать ещё распределением на уровне объектов или процессов, в отличие от описанного выше распределения на уровне моделей. «Распределение» на уровне объектов (процессов) модели означает, что часть объектов одной и той же модели выполняется на одном сервере, а часть на других. Сложность реализации такой системы заключается в том, что если в первом случае все объекты выполняются в контексте одного процесса и коммуникации между ними можно легко реализовать, во втором случае объекты должны взаимодействовать через сеть, что усложняет синхронизацию объектов, отладку моделей и саму реализацию этих объектов.

Одним из вариантов развития в данном направлении являются Grid-технологии [19]. Идея состоит в том, чтобы объединить гетерогенные и географически распределенные ресурсы для решения качественно новых задач, в том числе задач моделирования. Например, при моделировании влияния тысяч молекул (потенциальных лекарственных препаратов) на белки при поиске лекарств для определенных болезней [20]. Концепция Grid (название по аналогии с электрическими сетями – electric power grid) предполагает создание компьютерной инфраструктуры нового типа, обеспечивающей глобальную интеграцию информационных и вычислительных ресурсов на основе управляющего и оптимизирующего программного обеспечения (middleware) нового поколения.

Сейчас Grid-технологии наиболее широко используются для решения задач, требующих интенсивной вычислительной обработки, например для сложного моделирования при разработке новых лекарств, расчете финансовых рисков, автоматизации проектирования и т. д.

Особый интерес в качестве наиболее ресурсоемких и актуальных объектов моделирования представляют сложные динамические системы (СДС), т.е. системы различной физической природы, с изменяющимися во времени параметрами, отличающиеся большим числом структурных элементов и/или связей между ними, нетривиальным математическим описанием и/или поведением и/или большим числом параметров. Причем, на современном этапе речь уже может идти не просто о тех или

иных отдельных компьютерных моделях СДС, а о различных вариантах создания и использования интегрированных моделирующих сред [21].

Следует отметить, что к числу интересных массовых моделирующих средств относятся и интегрируемые в Web-страницы средства моделирования в виде апплетов<sup>4</sup>, глобально доступных через Интернет. Накопление фонда таких моделей должно привести к существенному синергетическому эффекту в области инженерного образования и моделирования.

*Этан 8 (1999-2007) Развитие и усовершенствование разработанных средств моделирования.*

Интересным направлением в компьютерном моделировании является виртуальная реальность. Термин «виртуальная реальность» появился еще в конце 70-х годов (так называли трехмерные макромодели реальности, которые создавались с помощью компьютера и давали эффект присутствия человека в виртуальном мире). Первоначально подобные модели применялись в военной области в обучающих целях, например для имитации управления самолетом.

Долгое время весьма высокая стоимость аппаратно-программных комплексов, позволяющих осуществить подобную визуализацию, ограничивала их применение только военными проектами и космической промышленностью. Однако, прогресс и удешевление этих технологий за последние годы, позволили внести концепцию виртуальной реальности и виртуального прототипирования во все отрасли промышленности и бизнеса.

Виртуальная реальность – высокоразвитая форма компьютерного моделирования, которая позволяет пользователю погрузиться в виртуальный мир и непосредственно действовать в нем с помощью специальных сенсорных устройств. Подобные устройства (шлем виртуальной реальности, очки, перчатки, капсулы и т.д.) связывают его движения с аудиовизуальными эффектами, причем, зрительные, слуховые, осязательные и моторные ощущения пользователя заменяются их имитацией, генерируемой компьютером.

Как показали исследования отечественных и зарубежных авторов, альтернативный мир притягателен для многих именно своей «виртуальностью». Он дает человеку возможности воевать, заниматься экстремальными видами спорта, приобретать новые навыки и все это без малейших последствий для физического здоровья.

Сила виртуальной реальности состоит в достижении свободы взаимодействия человека с виртуальной средой – там нет принципиальных ограничений в этом плане и можно исследовать и опробовать любой компонент любой пространственной модели (виртуального прототипа). Будучи созданной в компьютере, эта модель, также как и среда, в которой она находится, свободна от ограничений физического пространства и времени.

В настоящее время мы наблюдаем все более массированное применение технологий виртуального прототипирования, т.е. процесса создания виртуальной (электронной) модели объекта, предназначенного для последующего производства, ее всесторонней оценки на этапе наличия виртуального прототипа (например, безопасности, функциональности, технологичности и т.д.), оптимизации технологических процессов его изготовления.

Виртуальные информационные технологии – это лишь одно из возможных направлений дальнейшего развития компьютерного моделирования.

---

<sup>4</sup> Апплёт (англ. *applet* от *application* – приложение и *-let* – уменьшительный суффикс) – это несамостоятельный компонент программного обеспечения, работающий в контексте другого, полновесного приложения, предназначенный для одной узкой задачи и не имеющий ценности в отрыве от базового приложения.

## Заключение

На сегодняшний день компьютерное моделирование является важным инструментом во всех областях человеческой деятельности.

За более чем столетия средства имитационного моделирования прошли значительный путь развития. Современные программные продукты не требуют специального обучения пользователя, и у него есть возможность уделить больше внимания проведению имитационных экспериментов и интерпретации их результатов. Перспективными направлениями развития моделирования представляются следующие области:

- имитационное моделирование системы одновременно с ее функционированием, что позволит предсказывать поведение системы;
- замена физических моделей объектов управления на имитационные, что позволит изучать разные алгоритмы управления объектами;
- оптимизация результатов имитационных экспериментов;
- распределенное в пространстве имитационное моделирование сложных систем;
- отображение реального производства в виде имитационной модели.

Возможности моделирования неуклонно растут и требуют все больших вычислительных мощностей.

Ошибочно думать, будто традиционные виды моделирования противопоставляются компьютерному моделированию. Наоборот, доминирующей тенденцией сегодня является взаимопроникновение всех видов моделирования, симбиоз различных информационных технологий в области моделирования, особенно, для сложных приложений и комплексных проектов по моделированию. Так, например, имитационное моделирование включает в себя концептуальное моделирование (на ранних этапах формирования имитационной модели) и логико-математическое (включая методы искусственного интеллекта) для целей описания отдельных подсистем модели, а также в процедурах обработки и анализа результатов вычислительного эксперимента и принятия решений. Технология проведения и планирования вычислительного эксперимента с соответствующими математическими методами привнесена в имитационное моделирование из физического (натурного) – моделирования. Наконец, структурно-функциональное моделирование используется при создании стратифицированного описания многомодельных комплексов.

Из всего многообразия средств компьютерного моделирования, описаны лишь наиболее важные ключевые моменты, относящие к развитию имитационного моделирования с применением компьютерных технологий, которые определяли тенденции в развитии и становлении этого направления.

## Литература

1. Рыбаков Д.С., Дергачёва Л.М. Компьютерное моделирование: задачи оптимизации // Вестник российского университета дружбы. – 2007. – № 2-3.
2. Варжапетян, А. Г. Имитационное моделирование на GPSS/H. – СПб., 2007.
3. Бирюков Б. В., Гастеев Ю. А., Геллер Е. С. Моделирование. – М.: БСЭ, 1974.
4. Прицкер. А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II. – М.: Мир, 1987.
5. Андрианов А. Н., Бычков С. П., Хорошилов А. И. Программирование на языке СИМУЛА-67. – М.: – Наука, 1985.
6. Бахвалов Л. Компьютерное моделирование: долгий путь к сияющим вершинам? // Компьютерра. – 1997. – №40.
7. Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний. – М., 1961.
8. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – Москва, 1961.
9. Richard E.Nance A history of discrete event simulation programming languages, 1993.

10. Thomas J. Schriber. An Introduction to Simulation Using GPSS / H. John Wiley & Sons. – 1991. – P. 425.
11. Using Proof Animation (Wolverine). Wolverine Software Corporation. – 1995. – P. 374.
12. Дал У. И., Мюрхауг Б, Ньюгорд К. Универсальный язык моделирования. – М.: Мир, 1969.
13. Using Proof Animation (Wolverine). Wolverine Software Corporation. – 1995. – P. 374.
14. Форрестер Дж. Мировая динамика. – М.: Наука, 1978.
15. Пепеляев В.А. О методологических аспектах разработки систем имитационного моделирования стохастических // Проблемы программирования. – 2007. – Вып. 4. – Стр. 87-97.
16. Святный В.А., Цайтц М., Аноприенко А.Я. Реализация системы моделирования динамических процессов на параллельной ЭВМ в среде сетевого графического интерфейса // Вопросы радиоэлектроники, серия «ЭВТ». – 1991. – Вып. 2. – С. 85-94.
17. Comfort J.C. The Simulation of master-slave event set processor. Simulation.42.3. – 1984. – Pp. 117-124.
18. Concepcion A.I. A hierarchical computer architecture for distributed simulation // IEEE Transactions on Computing. C-38.2. – 1989. – Pp. 311-319.
19. Foster I., Kesselman C., Tuecke S. The Anatomy of the GRID; Enabling Scalable Virtual Organisations. – 2001.
20. Ольсон А.Дж., Моррис Г.М., Phil D., Лидстром В.М., Жилет А. Моделирование лекарства от СПИДа. Проектирование вакцины от ВИЧ. [Электронный ресурс]. URL: <http://fightaidsathome.ru/pressa-NEWS-1a.htm>.
21. Аноприенко А. Я., Святный В. А. Высокопроизводительные информационно-моделирующие среды для исследования, разработки и сопровождения сложных динамических систем // Научные труды Донецкого государственного технического университета. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем». – Севастополь: «Вебер», 2001. – Вып. 29.
22. Teichroew D., Lubin J. F. Computer simulation – discussion of the technique and comparison of languages // Communications of the ACM (CACM). – 1966. – Vol. 9. – Pp. 723-741.