

## ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ\*

Ю. И. Рыжиков, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов (Санкт-Петербург)

Современный этап развития человечества характеризуется переходом от индустриального к информационному обществу. При этом, как показывает опыт стран с развитой рыночной экономикой, в информационном обществе облик его инфраструктуры определяется прежде всего технологиями получения, обработки, распространения, распределения и использования информации для решения различных классов прикладных задач в соответствующих предметных областях.

В указанных условиях особую значимость в жизнедеятельности человека начинают приобретать вопросы моделирования окружающего его мира, в качестве базовых элементов которого выступают реально существующие и создаваемые материальные и абстрактные объекты, социальные субъекты (сам человек, организации, государство и т. п.), а также отношения между ними и окружающей действительностью [1]. Необходимо отметить, что одной из основных особенностей современных объектов-оригиналов (реальных или абстрактных) с которыми приходится сталкиваться на практике, является их чрезвычайно высокая сложность [2–6], проявляющаяся в виде: *структурной сложности, сложности функционирования* (поведения), *сложности выбора поведения, сложности развития*.

В этих условиях для описания такого рода объектов приходится использовать не одну, а несколько моделей [1–7]. С момента появления первого наскального рисунка и по настоящее время, ознаменованное полётами в космос, созданием сложнейших производственных комплексов и распределённых информационно-вычислительных сетей (например, Internet), человечеством создано множество различных классов моделей, которые находят всестороннее применение в различных отраслях науки, культуры, производства.

Важное место в общей структуре моделей, используемых на практике, отводится имитационным моделям (ИМл), инструментальным средствам и технологиям имитационного моделирования (ИМ). Ежегодно в мире проводится несколько международных конференций, на которых в прямой постановке рассматриваются проблемы теории и практики имитационного моделирования и возможные пути решения указанных проблем [4–6, 8–10]. Однако, несмотря на то, что к настоящему времени в рассматриваемой предметной области получены важные теоретические и практические результаты, из-за целого ряда объективных и субъективных причин (методологических, технологических, финансовых, образовательных и т. п.) при создании и применении ИМл допускается множество ошибок и некорrekтностей, а эффективность использования ИМл, к сожалению, продолжает оставаться достаточно низкой. В этих условиях весьма актуально проанализировать причины и наметить возможные пути выхода из создавшейся ситуации в области ИМ.

### Место и роль имитационного моделирования в современной квалиметрии моделей и полимодельных комплексов

К настоящему времени теория, методы и технологии создания (использования) различных классов моделей развиты достаточно хорошо. Исследования в этой отрасли научных знаний продолжают с неослабевающей интенсивностью, охватывая всё но-

---

\* Данная работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 07-07-00169, № 06-07-89242, № 05-08-18111), ИСА РАН (проект № 2.5), СПб. НЦ РАН (проект № 12)

вые и новые классы моделей и предметные области. Однако в современных условиях, к сожалению, практически остаётся не решённой проблема оценивания качества моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного синтеза новых моделей либо выбора из числа уже существующих моделей наиболее предпочтительных моделей, предназначенных для решения конкретных прикладных задач. Актуальность данной проблемы в ещё большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а полимодельным комплексом, в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых должна оцениваться своей системой показателей. Проведенный анализ показывает, что решение перечисленных проблем целесообразно проводить, базируясь на единых методологических и технологических основах, разрабатываемых в настоящее время в рамках *квалиметрии моделей и полимодельных комплексов* [7, 11]. Важным объектом исследования в рамках рассматриваемой теории является ИМл и технологии ИМ.

Появление ИМ и превращение его в эффективное средство анализа сложных и больших систем было, с одной стороны, обусловлено потребностями практики, а с другой – развитием метода статистических испытаний (метод Монте-Карло), открывшего возможность моделировать случайные факторы, которые существенно влияют на процесс функционирования систем. Кроме того, была создана материальная (аппаратурная) база для реализации ИМл — мощные вычислительные средства второго и третьего поколения.

Введение понятия ИМ в науке (начало 60-х годов) было сопряжено с возникновением определенной терминологической путаницы, разнообразием трактовок этого понятия. Одна из причин, повлиявших на это, связана с тем, что сам термин, обозначаемый в англоязычной литературе как *simulation* (лат. *simulation* – симулирование, уподобление) и введенный в отечественной литературе как «имитационное моделирование» (лат. *imitation* – подражание, имитация), неудачен с чисто лингвистической точки зрения, поскольку в первом случае его можно перевести просто как «моделирование», а во втором – истолковать в тавтологическом смысле, рассматривая термины «имитация» и «моделирование» как синонимы («моделирующее моделирование»). В действительности, когда речь идет об ИМ, то имеется в виду моделирование особого рода, противостоящее в известном смысле аналитическому моделированию. Последнее связано с двумя основными обстоятельствами: во-первых, имитационная модель должна с необходимой полнотой воспроизводить как структуру объекта-оригинала, так и его функционирование (при обязательном сохранении схожести поведения по отношению к объекту-оригиналу), а во-вторых, ИМ ориентируется на получение знаний о прототипе не путем аналитического исследования или однократных численных расчетов, а путем целенаправленных экспериментов на ИМл [2, 3, 12–14].

В настоящее время при рассмотрении ИМ принято выделять два больших класса моделей: специально сконструированные материальные ИМл и математические ИМл, для реализации которых необходимо привлечение ЭВМ.

В общем случае структура как аналитической, так и ИМл открытой системы может быть задана следующим образом:

$$S \subseteq X \times Y, \quad (1)$$

где  $X$  – множество входных воздействий;  $Y$  – множество выходных воздействий;  $S$  – заданное отношение (либо совокупность взаимосвязанных отношений  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , полученная при декомпозиции отношения  $S$ ). Множество  $X$  представляется декартовым произведением  $X \subseteq U \times L$ , где  $U$  – множество непосредственно контролируемых (наблюдаемых, управляемых) входных воздействий, а  $L$  – множество входных воздей-

ствий, о которых имеется только косвенная информация. Сведения об элементах множества можно задавать по-разному, используя, например, детерминированные, вероятностные, статистические, нечеткие математические структуры либо их комбинацию. В общем случае элементы множеств  $X$  и  $Y$  являются функциями времени (либо какого-нибудь другого независимого аргумента):  $x \in X$ ,  $y \in Y$ ,  $x:U \rightarrow L$ ,  $y:T \rightarrow B$ , где  $T$  – множество моментов времени;  $A$  – алфавит объекта  $X$ ;  $B$  – алфавит объекта  $Y$ ,  $X \subseteq A^T$ ,  $Y \subseteq B^T$ . Тогда модель (1) может быть задана как отношение вида [13]

$$S \subseteq A^T \times B^T.$$

При аналитическом описании объекта моделирования отношение  $S$  (на алгоритмическом уровне описания) задается, как правило, в явном виде с использованием алгебраических, интегро-дифференциальных, конечно-разностных, дифференциальных и других функциональных соотношений или логических условий, что позволяет лицу, принимающему решения (ЛПР), получать в общем виде зависимости искомых характеристик (выходных воздействий) от входных воздействий. При этом необходимость применения на практике ЭВМ для исследования и использования аналитической модели возникает в том случае, когда данная модель (отношение  $S$ ) имеет большую размерность и (или) сложную структуру. Все это не позволяет ЛПР вручную в явном виде получать окончательное решение прикладной задачи на аналитической модели за заданное время. Поэтому на ЭВМ осуществляется поиск решения (либо непосредственное моделирование  $S$ ) с использованием численных методов.

В ИМл объекта отношение  $S$  (либо отношения  $S_i$ ,  $i=1, \dots, N$ ) в большинстве случаев задается алгоритмически, т. е. только машинный эксперимент на ЭВМ позволяет определить указанную зависимость. Таким образом, ИМл — это такие модели, с помощью которых нельзя заранее вычислить или предсказать результат поведения реально существующего (либо создаваемого) объекта. Для этого необходим машинный эксперимент с моделью на ЭВМ при заданных входных воздействиях.

В ранее выполненных работах [7, 11, 15] были определены основные проблемы квалиметрии математических моделей, среди которых особое место занимают проблемы оценивания и управления качеством моделей. Рассмотрим более подробно содержание и возможные пути решения данных проблем применительно к ИМл.

### **Методологические и технологические проблемы имитационного моделирования**

#### *Проблема оценивания степени адекватности имитационных моделей*

Одна из центральных проблем теории математического моделирования сложных организационно-технических систем (СОТС) в целом и ИМ указанных систем в частности заключается в обеспечении требуемой степени адекватности рассматриваемого класса моделей по отношению к моделируемым объектам-оригиналам  $Ob_{<>}^{op}$ . Данное требование обязательно для любых случаев построения моделей и моделирующих систем. При этом очевидно, что на практике следует говорить не о полной адекватности, а лишь об адекватности в некотором смысле (о требуемом уровне адекватности). Для СОТС одна модель может отражать лишь какую-либо сторону, аспект прототипа, поэтому понятие адекватности «вообще» для такой модели не существует, речь может идти лишь об адекватности отражения данного аспекта. Оценку степени адекватности всегда следует проводить с учетом того, в какой степени на данной модели могут быть достигнуты цели, поставленные при исследовании каждого конкретного вопроса, для решения которого необходимо прибегать к моделированию.

Причинами неадекватности ИМл некоторого объекта оригинала  $Ob_{<>}^{op}$  (в нашем случае – СОТС) могут быть неточные исходные предпосылки в определении типа и структуры моделей, погрешности измерений при проведении испытаний (экспериментов), вычислительные погрешности при обработке измерительной информации. Использование неадекватной модели может привести к значительным экономическим потерям, аварийным ситуациям, к невыполнению задач, поставленных перед реально существующей системой [7, 15, 16].

Для определённости, следуя работам [2, 16], рассмотрим два класса моделируемых систем. **К первому классу** мы отнесём системы, с которыми можно проводить эксперименты (испытания) и получать, путём измерений, значения тех или иных характеристик указанных систем. Обобщённой моделью такого рода систем является ИМл динамической системы (ДС) [1, 2, 7, 12], задаваемая кортежем следующего вида:

$$r = \langle X, V, Y, T, \varphi, \psi \rangle, \quad (2)$$

где  $X, V, Y, T$  — соответственно множества состояний, входных, выходных воздействий, множество моментов времени;  $\varphi, \psi$  – переходное и выходное отображения вида

$$\varphi: T \times X \times V \rightarrow X; \quad (3)$$

$$\psi: T \times X \times V \rightarrow Y, \quad (4)$$

которые при построении ИМл задаются алгоритмически.

При этом множество входных воздействий, в общем случае, представляет собой декартово произведение множества управляющих воздействий ( $U$ ) и множества возмущающих воздействий ( $\Xi$ ):  $V = U \times \Xi$ . Ранее уже указывалось, что при исследовании СОТС создают нескольких вариантов ИМл, описывающих с различной степенью детализации указанную систему. В этих условиях можно уже формально описывать и решать задачи оценивания и управления качеством ИМл первого класса. Обобщённая технология решения данных задач представлена на рисунке.

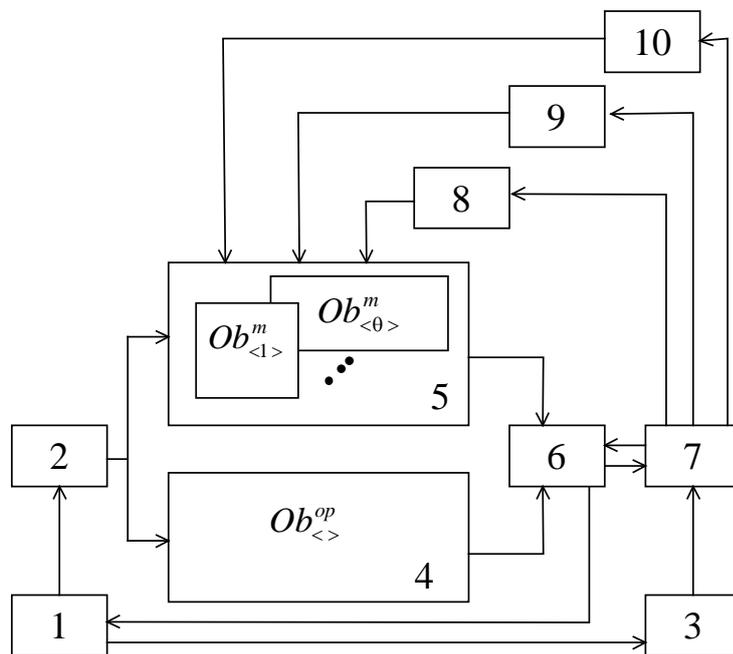
В качестве примеров систем первого класса можно, в первую очередь, назвать все созданные и создаваемые человеком технико-технические системы и комплексы, работающие в автоматическом режиме.

**Ко второму классу моделируемых систем** мы отнесём те из них, с которыми невозможно проведение экспериментов (в соответствии с технологией, представленной на рисунке) и получение требуемых характеристик (например, элементов множеств  $X$  и  $Y$ ). К такого рода системам относятся крупномасштабные экономические и социальные системы, сложные организационно-технические системы, функционирующие в условиях существенной неопределённости воздействия внешней среды [1, 3]. Важную роль в таких системах играет человеческий фактор (организационные структуры).

Рассмотрим последовательно варианты оценивания адекватности  $Ob_{<>}^m$  для перечисленных классов систем. Допустим, что имеется возможность ввести метрическое пространство математических образов, описывающих  $Ob_{<>}^{op}$  и  $Ob_{<>}^m$ . Тогда в качестве меры близости модели к объекту целесообразно использовать расстояние  $\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$  между точками, которое должно удовлетворять аксиомам тождества, симметрии и треугольника [15]. В идеальной ситуации указанная мера близости объекта и модели должна равняться нулю. Однако на практике в силу ряда причин (принципиальное отличие  $Ob_{<>}^m$  от  $Ob_{<>}^{op}$ , неопределённость исходных данных, измерительные и вычислительные погрешности и т.п.) вероятность (возможность) получения условия

$$\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m) = 0 \quad (5)$$

близка к нулю. Поэтому реально условие адекватности должно иметь вид



**Рис.1. Обобщённая технология оценивания и управления качеством моделей объектов первого класса:**

- 1 – формирование целей функционирования  $Ob_{<>}^{op}$ ; 2 – формирование входных воздействий;
- 3 – формирование целей ИМ; 4 – моделируемая система (объект  $Ob_{<>}^{op}$ ) первого класса;
- 5 – ИМл ( $Ob_{<\theta>}^m$ ) исследуемой системы  $Ob_{<>}^{op}$ ; 6 – оценивание качества ИМл (полимоделных комплексов); 7 – управление качеством ИМл; 8 – управление параметрами ИМл;
- 9 – управление структурами ИМл; 10 – изменение концепции описания ИМл

$$\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m) \leq \varepsilon, \quad \varepsilon > 0. \quad (6)$$

Условие (5), которое имеет чисто теоретическое значение, назовем условием абсолютной адекватности, а условие (6) назовем  $\varepsilon$ -адекватностью. Попутно отметим, что в ходе реализации той или иной технологии моделирования при переходе от одного этапа моделирования к другому этапу степень адекватности модели  $\rho$ , как правило, ухудшается:

$$\rho_1 \leq \rho_2 \leq \rho_3 \dots \rho_l = \rho, \quad (7)$$

где  $\rho_l$  – мера адекватности  $Ob_{<>}^m$  на  $k$ -м этапе реализации заданной технологии моделирования. Применительно к первому классу  $Ob_{<>}^{op}$  рассматриваемые меры адекватности могут быть заданы в различном виде. Так, при детерминированном описании данных систем чаще всего используются метрики Евклида, Чебышева, Хэмминга, Ли и др. [10, 12]. В качестве аргумента в соответствующих функционалах рассматривают величину разности выходных воздействий, получаемых на объекте ( $\bar{y}^{(0)}(t)$ ) и модели ( $\bar{y}(t)$ ). В стохастическом случае могут быть предложены меры адекватности, основанные на количественном оценивании расстояний между случайными выборками (первая ситуация), полученными в ходе экспериментов  $Ob_{<>}^{op}$  и  $Ob_{<>}^m$ , и расстояниями между стати-

стическими законами, построенными по этим выборкам (вторая ситуация). В табл. 1 приведён ряд примеров задания метрик для первой ситуации.

Таблица 1

**Примеры задания метрик для первой ситуации**

№ пп	Условия существования метрики	Вариант задания метрики
1	Независимые наблюдения за скалярными нормально распределёнными выходными воздействиями при условии равенства дисперсии $\sigma_y^2 = \sigma_{y^{(0)}}^2 = \sigma^2$	$\rho_1 =  \bar{y} - \bar{y}^{(0)}  \frac{\sqrt{m \cdot n}}{\sigma^2 \sqrt{m+n}}$ $\rho_2 = (\bar{y} - \bar{y}^{(0)})^2 \frac{\sqrt{m \cdot n}}{\sigma^2 \sqrt{m+n}}$
2	Независимые наблюдения за скалярными нормально распределёнными выходными воздействиями при условии равенства математических ожиданий $\bar{y} = \bar{y}^{(0)}$	$\rho_3 =  \sigma_y^2 - \sigma_{y^{(0)}}^2 $ $\rho_4 = (\sigma_y^2 - \sigma_{y^{(0)}}^2)^2$
3	Независимые наблюдения за скалярными экспоненциально распределёнными выходными воздействиями с плотностью распределения вероятностей вида $\varphi_y = \lambda e^{-\lambda y}$	$\rho_5 =  \lambda - \lambda^{(0)} $ $\rho_6 = (\lambda - \lambda^{(0)})^2$

В табл. 1 приняты следующие условные обозначения:  $\bar{y}$ ,  $\bar{y}^{(0)}$ ,  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_{y^{(0)}}^2$  – статистические математические ожидания и дисперсии случайных величин  $\bar{y}(t)$ ,  $\bar{y}^{(0)}(t)$ ,  $t \in T$ ;  $\lambda$ ,  $\lambda^{(0)}$  – статистические оценки интенсивности обслуживания входного сигнала  $v(t) \in V$ ;  $m$ ,  $n$  – количество элементов в соответствующих выборках. В общем случае  $\bar{y}^{(0)}(t) \in Y^{(op)}$ ,  $\bar{y}(t) \in Y$  являются выборками  $N$ -мерных нормально распределённых генеральных совокупностей [15]. Обозначим через  $\bar{Y}_{<N>}^{(op)}$  и  $\bar{Y}_{<N>}$  статистические математические ожидания векторных случайных величин  $Y_{<N>}^{(op)}$  и  $Y_{<N>}$  соответственно. В случае равенства  $\bar{Y}_{<N>}^{(op)} = \bar{Y}_{<N>}$  метрики  $\rho_1$  и  $\rho_2$  теряют смысл. Для указанных случаев в качестве мер адекватности могут быть выбраны следующие вероятности

$$P_1[\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m) = 0] \geq 1 - \delta, \tag{8}$$

$$P_2[\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m) \leq \varepsilon] \geq 1 - \delta, \tag{9}$$

где  $\delta$  – малая положительная величина. Плотность распределения расстояния  $\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$  в этом случае должна быть «сконцентрирована» в районе начала координат. Для проверки адекватности модели объекту по соотношениям (8)–(9) необходимо задаваться величинами  $\varepsilon$  и  $\delta$ , найти функцию или плотность распределения расстояния  $\rho(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$ , вычислить вероятность  $P_1$ ,  $P_2$  и сравнить её с величиной  $(1-\delta)$ . В работах [7, 15] предложены другие метрики, позволяющие оценивать степень адекватности стохастических моделей.

Количественная оценка адекватности моделей  $Ob_{<>}^m$ , описывающих системы (объекты) второго класса, по предложенным ранее метрикам затруднена, так как непо-

средственное определение характеристик вида  $\bar{y}^{(0)}$  путём проведения экспериментов (исследований) с указанными системами требует, во-первых, очень больших затрат ресурсов (финансовых, временных, материальных) и, во-вторых, в ряде ситуаций просто нереализуемо (моделирование аварий, катастроф, военных действий). Кроме того, в данных ситуациях само понятие «адекватность модели» требует уточнения. В этом случае целесообразно говорить уже *о полезности*, пригодности модели  $Ob_{<>}^m$  для решения какого-то конкретного класса задач, связанных с системой  $Ob_{<>}^{op}$ .

Будем предполагать, что для описания некоторой системы второго класса  $Ob_{<>}^{op}$  предложено  $k$  моделей:  $M_1(\Gamma_{<p_1>})$ ,  $M_2(\Gamma_{<p_2>})$ , ...,  $M_k(\Gamma_{<p_k>})$ , каждая из которых характеризуется своей структурой (структурами) и набором параметров  $\Gamma_{<p_j>}$ ,  $j = 1, \dots, k$ . Вначале остановимся на ситуации, когда структуры моделей фиксированы и ИМл отличаются друг от друга составом параметров, точные значения (либо вероятностные, нечёткие распределения) которых, как правило, неизвестны. Необходимо в данном случае из множества моделей  $\{M_j(\Gamma_{<p_j>})\}$  выбрать наиболее предпочтительную модель (пригодную, полезную) [14]. Кроме того, будем предполагать, что перечисленные ИМл используются для решения задач прогнозирования и выбора оптимальных вариантов функционирования системы  $Ob_{<>}^{op}$  с точки зрения заданного обобщённого показателя эффективности  $J$ . Значения данного показателя зависят от варианта выбранных управляющих воздействий и значений параметров ИМл, с помощью которых указанный выбор состоялся:

$$J_{jj} = J_{jj}(u_j, M_j(\Gamma_{<p_j>})).$$

Пусть заранее неизвестно, какие фактические значения примут параметры реальной системы. Таким образом, мы имеем ситуацию выбора в условиях неопределённости сведений о поведении реальной системы  $Ob_{<>}^{op}$ . Для снятия данной неопределённости должна вводиться дополнительная информация (гипотезы).

Рассмотрим самую простую ситуацию, при которой  $Ob_{<>}^m$  зависит только от одного параметра  $p$ , который, в свою очередь, принимает конечное множество значений:  $p \in \{p_1, p_2, \dots, p_b\}$ . При этом от такого же параметра, принимающего те же значения, зависит результат функционирования реальной системы  $Ob_{<>}^{op}$ . Однако заранее неизвестно, какое фактическое значение примет параметр  $p$  в системе  $Ob_{<>}^{op}$ . Допустим, что любое отклонение параметра ИМл  $M(p)$  от значения этого же параметра на реальном объекте приводит к «ущербу» (потерям в эффективности), которое будем оценивать с помощью показателя  $J$ . Для дальнейшего решения задачи составим табл. 2 значений показателя эффективности вида  $J_{v\mu} = J_{v\mu}(u_v, p_\mu)$ , где  $J_{v\mu}$  — значение показателя при  $u_v$  варианте функционирования  $Ob_{<>}^{op}$ , рассчитанном на ИМл  $M(p_v)$  при фактическом значении параметра  $p_\mu$ . На основе табл. 2 построим табл. 3 рисков, вычисляемых по формуле  $\Delta J_{v\mu} = |J_{vv} - J_{v\mu}|$ .

Таблица 2

Значения показателя эффективности

вида  $J_{v\mu} = J_{v\mu}(u_v, p_\mu)$

$p_\mu$	$p_1$	$p_2$	...	$p_b$
$p_1$	$J_{11}$	$J_{12}$	...	$J_{1b}$
$p_2$	$J_{21}$	$J_{22}$	...	$J_{2b}$
...	...	...	...	...
$p_b$	$J_{b1}$	$J_{b2}$	...	$J_{bb}$

Таблица 3

Значения рисков вида

$\Delta J_{v\mu} = |J_{vv} - J_{v\mu}|$

$p_\mu$	$p_1$	$p_2$	...	$p_b$
$p_1$	0	$\Delta J_{12}$	...	$\Delta J_{1b}$
$p_2$	$\Delta J_{21}$	0	...	$\Delta J_{2b}$
...	...	...	...	...
$p_b$	$\Delta J_{b1}$	$\Delta J_{b2}$	...	0

В этом случае задача о выборе наиболее пригодной ИМл сводится к задаче выбора стратегии (значения параметра  $p$ ), которая будет предпочтительнее остальных. В качестве критерия оптимизации выберем критерий минимального риска

$$J' = \min_v \max_\mu \Delta J_{v\mu} \tag{10}$$

Если заданы вероятности  $q_1, q_2, \dots, q_b$  появления значений параметра  $p: p_1, p_2, \dots, p_b$ , то оптимальной стратегией будет стратегия, минимизирующая средний риск:

$$J'' = \min_v \sum_{\mu=1}^b \Delta J_{v\mu} q_\mu \tag{11}$$

Если рассматривать общий случай выбора многопараметрической ИМл из заданного множества моделей  $\{M_j(\Gamma_{<p_j>})\}$ , то данную задачу целесообразно решать в следующем порядке. В начале для каждой фиксированной ИМл  $M_j(\Gamma_{<p_j>})$  находятся наилучшие сочетания значений параметров в соответствии с предложенными выше критериями, т.е. находим  $M_j^* = M_j(\Gamma_{<p_j>}^*)$ . В результате уже получаем  $k$  моделей  $M_1^*, M_2^*, \dots, M_k^*$  с фиксированными параметрами. Из этих моделей, используя аналогичную процедуру, выбираем наилучшую модель. К настоящему времени предложены также варианты расчета показателей адекватности моделей, описывающих системы 1-го класса для тех ситуаций, когда в них (системах) изменяются не только значения параметров, но и структуры [7].

*Проблема обеспечения гармоничного взаимодействия пользователей с вычислительной средой, в рамках которой реализуются ИМл (создание интеллектуального интерфейса)*

Опыт эксплуатации различных классов интегрированных систем поддержки принятия решений (ИСППР) показывает, что формализованные модели (прежде всего математические модели) не позволяют в полной мере учесть все многообразие возможных вариантов функционирования СОТС. Поэтому особую актуальность начинает приобретать вопрос объединения формализованных процедур анализа и выбора, реализованных в рамках соответствующих ИМл, входящих в состав ИСППР, и творческих возможностей пользователей.

*Проблема обеспечения открытости имитационных моделей и комплексов (ИМлК) и их способности к адаптации, самоорганизации и развитию*

Анализ процессов создания, эксплуатации и совершенствования СОТС показывает, что «внешняя среда», с которой взаимодействует СОТС, постоянно изменяется, это, в свою очередь, приводит к изменению параметров и структур указанных объектов. В этих условиях, разработанные на различных этапах с различными целями ИМл и комплексы, а также методы и алгоритмы манипулирования данными моделями могут лишь приближенно отражать необходимые свойства исследуемых элементов и подсистем СОТС.

Создание универсальных моделей и алгоритмов, реализующих, например, все основные функции управления СОТС применительно к различным предметным областям, также затруднено. Поэтому реально на практике в зависимости от складывающейся обстановки должен конструироваться или выбираться наиболее пригодный в силу своих свойств вариант ИМл (входящий в состав ИСППР) и соответствующий ему алгоритм решения той или иной задачи автоматизированного управления СОТС. Таким образом, СОТС и ее ИСППР, находящиеся в условиях воздействия нестационарной внешней среды, только тогда будут способны обеспечивать выработку эффективных плановых и регулирующих воздействий, когда будут наделены особыми механизмами (процедурами) адаптации и, в перспективе, самоорганизации, обеспечивающими целенаправленное изменение параметров моделей и самих моделей и алгоритмов ИСППР с учетом возможных вариантов выдачи управляющих воздействий в будущем, что позволяет приспособить СОТС к будущему развитию как объектов управления, так и внешней среды. Конструирование или выбор типа ИМл и алгоритма ИСППР должны являться функцией специально выделенной подсистемы (адаптера), входящей в состав ИСППР. С помощью данного адаптера путем проведения параметрической и структурной адаптации (а в перспективе и самоорганизации) соответствующих компонентов СПМО обеспечивается согласование свойств СОТС со средой, что позволяет сократить до минимума число ситуаций, при которых ИСППР не сможет выдать рекомендации по управлению СОТС на различных этапах их жизненного цикла.

Адаптация рассматриваемых СОТС, ИСППР предполагает адаптацию к «прошлому» и к «будущему». Для реализации указанных механизмов адаптации необходимо, чтобы в составе ИСППР имелись такие процедуры, которые обеспечивают накопление и сохранение уникального опыта работы органов управления, выявление закономерностей течения процессов управления, фиксацию этого опыта в формализованном виде: в форме алгоритмов переработки информации о компонентах вектора состояния СОТС, в форме параметров законов управления, в форме решающих правил (алгоритмов) принятия рациональных решений, либо в форме записей в базе данных или базе знаний.

Среди частных проблем, связанных с созданием и применением ИМлК, можно выделить:

а) *проблему обеспечения простоты и оптимальности построения каждой конкретной имитационной модели.* Данная проблема непосредственно связана с проблемой обеспечения необходимой степени адекватности моделирования. В самом деле, для достижения необходимой степени адекватности иногда приходится идти на существенное усложнение модели, построения вместо одной модели целого моделирующего комплекса. Однако даже в этом случае, если существует возможность выбора между различными классами моделей (либо комбинациями этих моделей), позволяющими обеспечивать примерно одинаковую степень адекватности моделирования, очевидно, из этих моделей целесообразно выбирать наиболее простую. В этом и состоит суть оптимальности построения (выбора) моделей.

б) *проблему обеспечения эффективной машинной реализации ИМл.* Решение данной проблемы, прежде всего, предполагает обеспечение высокой эффективности реализации вычислительного процесса, организованного с учетом конкретных свойств разработанных моделей и алгоритмов (степени связности алгоритмов, возможности распараллеливания счета при решении задач, решение задач в оверлейных режимах).

в) *проблему обеспечения возможности моделирования с различными масштабами времени;*

г) *проблему нахождения обоснованного компромисса между универсальностью и проблемной ориентацией ИМлК.*

Известно, что никакая система, ориентированная на ИМ со встроенным (т. е. жестким) интерпретатором, *универсальной быть не может.* Логика интерпретатора в руководствах по инструментальным средствам, обеспечивающим процессы ИМ, как правило, не освещается (единственное исключение – знаменитая «красная книга» Т. Дж. Шрайбера). Поэтому «модельер» всегда может натолкнуться на неожиданный отказ или ошибку, которую невозможно диагностировать. В идеальной инструментальной системе должен быть прямой доступ к цепи будущих событий интерпретатора – под ответственность пользователя и с гарантией возможности восстановления штатного режима. Следует также отметить, что популярна точка зрения, согласно которой при достаточном числе испытаний, проводимых с ИМл, можно получить все требуемые результаты с любой точностью. Однако реальные датчики равномерных псевдослучайных чисел отнюдь не идеальны, и отмахиваться от данной проблемы нельзя. Приведем, к примеру, наблюдаемую зависимость от числа испытаний  $N$  погрешности  $\delta$  расчета числа  $\pi$  методом статистических испытаний через долю точек, попавших во вписанный в квадрат круг (кстати, это поучительный пример статистических испытаний *без имитации*):

N	$\delta$	N	$\delta$	N	$\delta$
1 тыс.	9.8e-2	50 тыс.	2.8e-3	2 млн.	-1.4e-4
2 тыс.	8.6e-2	100 тыс.	8.3e-3	5 млн.	-1.0e-5
5 тыс.	5.6e-3	200 тыс.	4.3e-3	10 млн.	2.9e-4
10 тыс.	1.8e-2	500 тыс.	4.3e-3	20 млн.	4.2e-5
20 тыс.	2.2e-3	1 млн.	2.0e-3	50 млн.	1.2e-4

Как мы видим, монотонность убывания погрешности по числу испытаний отнюдь не гарантируется. Отметим также, что пик исследований по датчикам случайных чисел (ДСЧ) остался в прошлом – когда работали на гораздо более слабых ЭВМ и число испытаний вынужденно ограничивалось десятками тысяч. «Дальние» зоны работы датчиков исследованы плохо. Поэтому рекомендуется отлаживать модель на задаче с известным решением (здесь могут помочь численные методы теории очередей) и затем подобрать датчики и число испытаний, при которых имитация обнаруживает наилучшее согласие с эталоном. Другая альтернатива – исследование и использование продвинутых схем генерации равномерных псевдослучайных чисел. Наличие в инструментальных системах (ИС) генераторов случайных величин с разными законами распределения – это обман потребителей. Трудно представить себе пользователя ИС, который по реальным данным установит, что он имеет дело с логарифмически логистическим распределением, и сам подберет его параметры методом наибольшего правдоподобия. Гораздо более типична ситуация, когда известны два-три начальных момента и можно сформулировать обоснованные предположения о типе распределения. Чтобы реально воспользоваться вышеупомянутыми генераторами, необходимы встроенные в ИС *сред-*

ства подбора параметров распределений – по методу моментов или квантилей. Говоря о существующих инструментальных системах ИМ, следует указать, что они в большинстве случаев не имеют гибких средств управления визуализацией процесса. Приведем данные по длительности прогона одной и тоже GPSS-модели в зависимости от уровня визуализации:

- все окна закрыты – 4 с;
- выводится таймер – 97 с;
- открыты окно блоков (схема модели) и таймер – 5271 с (почти полтора часа).

Ясно, что визуализация результатов должна быть *настраиваемой* (например, обновление картинки в точках логарифмической шкалы – см. таблицу погрешностей расчета числа  $\pi$ ). Это намного увеличит темп работы модели при сохранении ее наглядности.

Перечисленный перечень проблем ИМ далеко не исчерпывающий. Об этих проблемах достаточно подробно говорилось в аналитических обзорах, выполненных по результатам ранее проведенных конференций ИММОД-2003, ИММОД-2005 [8, 9]. В этих же обзорах были подробно проанализированы и типовые недостатки докладов, представленных на соответствующих конференциях. Среди этих недостатков наиболее характерными были: «глобальные» претензии авторов на создание «методологий», «концепций», «универсальных систем и технологий моделирования» всех возможных типов систем обслуживания; в ряде докладов вместо конструктивного решения задач ИМ проводилось нагромождение постановочных конструкций, отсутствовала в явном виде новизна полученных результатов, а в некоторых случаях, к сожалению, в тексте докладов были просто ошибки. Программный комитет конференции ИММОД-2007 при подготовке данной конференции постарался учесть все ранее высказанные критические замечания. Поэтому одна из основных задач данной конференции состоит в том, чтобы, во-первых, учесть все ранее высказанные предложения по повышению качества представляемых докладов и, во-вторых, определить наиболее перспективные пути дальнейшего решения перечисленных проблем теории и практики имитационного моделирования.

### **Перспективы использования имитационных моделей и комплексов**

В настоящее время проблема разработки и использования компьютерных, в том числе имитационных моделей СОТС находится в центре внимания ученых и специалистов, связанных с развитием экономик и общества в целом. Наиболее характерным примером этого является новая стратегическая компьютерная инициатива (НСКИ), разработанная в США в 2005 году. Эта инициатива оформлена в виде аналитического доклада президенту США: «Вычислительная наука: обеспечение конкурентоспособности Америки» («Computational Science: Ensuring Americas Competitiveness»), который был разработан и представлен президентским комитетом по информационным технологиям (PITAC — President's Information Technology Advisory Committee).

Данное предложение рассматривается разработчиками в качестве новой стратегической компьютерной инициативы (СКИ) США, направленной на дальнейшее повышение конкурентоспособности научных разработок и технологий страны. СКИ связана с развитием и использованием передовых вычислительных методов и средств для понимания и решения сложных проблем в науке, экономике, технике и обществе.

По мнению авторов доклада «вычислительная наука» интегрирует три основных элемента:

1. Алгоритмы (численные и нечисленные) и программное обеспечение для моделирования и имитации (algorithms and modeling and simulation software), разработанные для решения научных, инженерных и гуманитарных проблем.

2. Информатику (computer and information science), которая развивает и оптимизирует современные аппаратно-программные средства, сетевые технологии и информационный менеджмент как компоненты, необходимые для решения прогнозируемых сложных вычислительных проблем.

3. Компьютерную инфраструктуру (computing infrastructure), поддерживающую решение научных и инженерных задач и развивающуюся информатику.

Вычислительная наука, имеющая такую структуру, представляется авторами доклада новой третьей «колонной» в здании науки XXI века. Две ранее известные колонны – теория и физический эксперимент.

Представляется, что рассмотренное предложение РИТАС в определенной мере перекликается с инициативой академика А. А. Самарского, с которой он выступил в восьмидесятых годах прошлого столетия в нашей стране.

А. А. Самарский активно пропагандировал математическое моделирование и вычислительный эксперимент, настойчиво доказывал научной общественности и руководителям государства важность и незаменимость их для решения крупных научно-технических, социальных, экономических и оборонных проблем.

А. А. Самарским и его учениками разработаны методологические, научные и технологические основы вычислительного эксперимента. В методологическом отношении задача математического моделирования сводится к реализации триады: модель–алгоритм–программа. Технологическая цепочка вычислительного эксперимента включает еще два этапа: расчеты на ЭВМ и обработку результатов [3, 12, 17].

Во введении к работе [17] авторы отмечают: «Постоянное совершенствование триады математического моделирования и ее внедрение в современные информационно-моделирующие системы – методологический императив. Лишь его выполнение дает возможность получать так нужную нам высокотехнологичную, конкурентоспособную и разнообразную материальную и интеллектуальную продукцию».

С участием А. А. Самарского в 1986 г. было подготовлено и принято Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР об усилении научно-исследовательских работ в области математики. В этом документе, в частности, предлагалось разработать общегосударственную программу широкого использования методов математического моделирования в различных отраслях народного хозяйства. Фактически намечалось создание службы математического моделирования, своеобразной математической индустрии, аналогичной индустрии энергетики или транспорта. Была надежда, что быстрое развертывание программы во многом определит лицо научно-технического прогресса в стране в конце XX – начале XXI веков.

К сожалению, события и процессы девяностых годов, приведшие к распаду СССР, помешали осуществлению мероприятий, запланированных в указанном постановлении.

Сравнение содержания и наполнения этапов моделирования и вычислительного эксперимента с указанными выше тремя составляющими американской стратегической компьютерной инициативы позволяет сделать вывод об их определенной корреляции.

Представляется, что сегодня Россия должна проявить определенную реакцию на НСКИ США и предложить свою соответствующую комплексную целевую национальную программу развития фундаментальных и прикладных основ в области информатики, информационных технологий и моделирования.

### Литература

1. **Савин Г. И.** Системное моделирование сложных процессов. М.: Фазис, 2000.
2. **Аврамчук Е. Ф., Вавилов А. А., Емельянов С. В. и др.** Технология системного моделирования / Под общ. ред. С. В. Емельянова. М.: Машиностроение, 1988.
3. **Краснощёков П. С., Петров А. А.** Принципы построения моделей. М.: Фазис, 2000. 400 с.
4. <http://www.wintersim.org>
5. <http://www.scs.org>
6. <http://www.liophant.org/scsc>
7. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория систем и управления. 2004. № 6. С. 5–16.
8. **Плотников А. М., Рыжиков Ю. И.** Первая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2003. Итоги и перспективы // Вестник технологии судостроения. 2004. № 12. С. 69–73.
9. **Рыжиков Ю. И., Плотников А. М.** Вторая всероссийская научно-практическая конференция ИММОД-2005. // Вестник технологии судостроения. 2006. № 16. С. 67–73.
10. 21<sup>st</sup> European Conference on Modelling and Simulation, June 4–6, Prague, Czech Republic, Proceedings, 2007, Prague. 826 pp.
11. **Юсупов Р. М., Иванищев В. В., Костельцев В. И., Суворов А. И.** Принципы квалиметрии моделей // IV Международная конференция «Региональная информатика-95», тезисы докладов. СПб. 1995. С. 90–91.
12. **Калашников В. В., Немчинов Б. В., Симонов В. М.** Нить Ариадны в лабиринте моделирования. М.: Наука, 1993. 192 с., ил.
13. **Месарович М., Такахара Я.** Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978.
14. **Шеннон Р.** Имитационное моделирование – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
15. **Юсупов Р. М.** Элементы теории испытаний и контроля технических систем/Под ред. Р. М. Юсупова. М.: Энергия, 1977. 189 с.
16. **Ростовцев Ю. Г., Юсупов Р. М.** Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования// Известия вузов. Приборостроение. № 7, 1991. С. 7–14.
17. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с.