

## Лекция 9. Комплексный подход к тестированию имитационной модели

**Цель лекции:** рассмотреть комплексный подход к тестированию имитационной модели

**Ключевые слова:** валидация модели, верификация имитационной модели, проверка адекватности модели

### Основные вопросы:

1. Валидация модели.
2. Верификация имитационной модели
3. Проверка адекватности модели
4. Валидация данных имитационной модели

После того, как имитационная модель реализована на ЭВМ, необходимо провести испытание, проверку модели. Это является чрезвычайно важным и ответственным моментом в имитационном моделировании. Проверка, выполненная не тщательно, может привести к неизвестным последствиям.

Поскольку моделирование связано с решением реальных задач, мы должны, прежде всего, быть уверены, что конечные результаты моделирования точно отражают истинное положение вещей, что модель не абсурдна, не дает нелепых ответов, оценить насколько модель и данные, полученные на ней, полезны и могут быть использованы при принятии решений, насколько точна разработанная модель.

Считается, что имитационные модели обладают высокой степенью изоморфизма (изоморфизм — сходство модели с объектом), т.к. существует взаимно однозначное соответствие между элементами модели и реального объекта моделирования, а также сохраняется характер взаимодействия между элементами (вы знаете, что имитационная модель призвана отражать структуру и внутренние связи моделируемой системы). Считается, что область пригодности модели тем обширнее, чем ближе структура модели к структуре системы и чем выше уровень детализации. Однако, большинство моделей все же гомоморфны. При построении любой модели используют упрощения, абстракции реальной системы, поэтому модель не является абсолютно точной в смысле однозначного соответствия её реальной системе. Кроме того, при описании системы, несмотря на наше стремление к объективности, действует субъективный фактор. Основной вопрос насколько модель может быть в известной степени гомоморфной, и в то же время точной.

Таким образом, на этапе исследования имитационной модели мы должны укрепить свое доверие к модели, убедиться, что модель функционально надежна, оценить ее достоверность. Исследователь должен провести серию

проверок, и в процессе проверки модели достигнуть приемлемого уровня уверенности, что выводы, сделанные на основе моделирования, будут правильными и применимыми для реальной системы.

Это сложная, философская проблема. Моделирование является методом научного познания окружающей действительности. Исторически существует несколько направлений в науке об отношениях к методам научного познания: эмпиризм, рационализм, абсолютный прагматизм.

На одном конце философского спектра находится эмпиризм, критерий которого — практика. Эмпирик считает, что должна быть проведена эмпирическая проверка любой испытуемой гипотезы (с помощью эксперимента, или на основе анализа эмпирических данных).

Рационализм основывается на применении методов формальной логики. Приверженцы рационализма считают, что модель есть совокупность правил логической дедукции (типа ";если, то";), которые могут привести от предпосылок к объективным выводам. Получается, что согласиться с правильностью модели, значит согласиться с основными предпосылками и логикой построения такой модели. (А вдруг исходные предпосылки необоснованны, ошибочны? Что, если мы моделируем всего лишь собственные мысли, имеющие мало отношения к реальной действительности? Такие вопросы всегда задает себе начинающий системный аналитик).

Третий философский подход - философия абсолютного прагматизма, у которого основной критерий - полезность, утверждает, что, модель должна с определенной точностью позволять достигать некоторых целей и давать полезные результаты, поэтому прагматика не интересуется внутренностью модели — ";черного ящика";, его интересуют лишь соотношения между входами и выходами модели.

Но истина, как говорят философы, посередине. Поэтому должна быть произведена всесторонняя проверка пригодности модели, комплексная оценка модели, отражающая все философские точки зрения.

В мировой практике имитационного моделирования к настоящему времени сформировались определённые концепции и сложились вполне устоявшиеся подходы к решению проблемы оценки достоверности имитационных моделей. Следует заметить, что оценка достоверности относится к числу ";вечных"; проблем имитационного моделирования. Такое положение обусловлено прежде всего спецификой применения имитационного моделирования как инструментария исследования, который в отличие от классических методов математического моделирования не обеспечивает проектировщиков и исследователей сложных систем соответствующими формализованными средствами определения (описания) таких систем. Однако нелишне заметить,

что простота реализации некоторых процедур исследования в имитационном моделировании, например, анализа чувствительности, делают метод имитационного моделирования привлекательным и доступным.

Исследованию различных аспектов проблемы оценки достоверности уделяли и уделяют много внимания известные учёные и специалисты в области имитационного моделирования Р.Шеннон [54], Н.П.Бусленко [11], Дж.Клейнен [20], В.В.Калашников [18], А.А.Вавилов, С.В.Емельянов [47], и др.

В середине 90-х годов прошлого века американские специалисты выполнили цикл работ применительно к проблеме оценки достоверности. Наиболее известными являются методологические схемы О.Балчи и Р.Сэджента [1-3,7] сформулированные как своего рода методолого-технологические стандарты решения указанной проблемы, согласно которым реализация задачи оценки достоверности есть многоэтапный итерационный процесс получения доказательства правильности и корректности выводов (или, по крайней мере, достижение приемлемого уровня уверенности в правильности таких выводов) относительно поведения исследуемой (проектируемой) системы. Вопросы практического использования этих стандартов рассматриваются в [4,6,56].

На практике выделяют 3 основные категории оценки: Оценка адекватности или валидация модели.

В общем случае валидации предполагает проверку соответствия между поведением имитационной модели и исследуемой реальной системы. Валидация модели (validation) есть подтверждение того, что модель в пределах рассматриваемой области приложений ведет себя с удовлетворительной точностью в соответствии с целями моделирования.

### Верификация модели

Это проверка на соответствие поведения модели замыслу исследователя и моделирования. Т.е. процедуры верификации проводят, чтобы убедиться, что модель ведет себя так, как было задумано. Для этого реализуют формальные и неформальные исследования имитационной модели.

Верификация имитационной модели предполагает доказательство возможности использования создаваемой программной модели в качестве машинного аналога концептуальной модели на основе обеспечения максимального сходства с последней. Цель процедуры верификации — определить уровень, на котором это сходство может быть успешно достигнуто.

Валидация и верификация имитационной модели связаны с обоснованием внутренней структуры модели, в ходе этих процедур проводятся испытания

внутренней структуры и принятых гипотез, исследуется внутренняя состоятельность модели.

### Валидация данных

Валидация данных (data validity) направлена на доказательство того, что все используемые в модели данные, в том числе входные, обладают удовлетворительной точностью и не противоречат исследуемой системе, а значения параметров точно определены и корректно используются.

Эти проверки связаны с проблемным анализом, т.е. анализом и интерпретацией полученных в результате эксперимента данных. Проблемный анализ — это формулировка статистически значимых выводов на основе данных, полученных в результате эксперимента на имитационной модели. Проверяется правильность интерпретации полученных с помощью модели данных, оценивается насколько могут быть справедливы статистические выводы, полученные в результате имитационного эксперимента. С этой целью проводят исследование свойств имитационной модели: оценивается точность, устойчивость, чувствительность результатов моделирования. Эти проверки связаны с выходами модели, сама имитационная модель рассматривается как черный ящик.

Таким образом, на этапе испытания и исследования разработанной имитационной модели организуется комплексное тестирование модели (testing) - планируемый итеративный процесс, направленный главным образом на поддержку процедур верификации и валидации имитационных моделей и данных.

Некоторые полезные процедуры тестирования рассмотрим ниже. Более широкое изложение методов тестирования имитационных моделей можно найти в специальной литературе [20, 33, 56].

### Проверка адекватности модели

При моделировании исследователя прежде всего интересует, насколько хорошо модель представляет моделируемую систему (объект моделирования). Модель, поведение которой слишком отличается от поведения моделируемой системы, практически бесполезна.

Различают модели существующих и проектируемых систем.

Если реальная система (или ее прототип) существует, дело обстоит достаточно просто. Поэтому для моделей существующих систем исследователь должен выполнить проверку адекватности имитационной модели объекту

моделирования, т.е. проверить соответствие между поведением реальной системы и поведением модели.

На реальную систему воздействуют переменные  $G^*$ , которые можно измерять, но нельзя управлять, параметры  $X^*$ , которые исследователь может изменять в ходе натурных экспериментов. На выходе системы возможно измерение выходных характеристик  $Y^*$ .

При этом существует некоторая неизвестная исследователю зависимость между ними  $Y^* = f^*(X^*, G^*)$ .

Имитационную модель можно рассматривать как преобразователь входных переменных в выходные. В любой имитационной модели различают составляющие: компоненты, переменные, параметры, функциональные зависимости, ограничения, целевые функции. Модель системы определяется как совокупность компонент, объединенных для выполнения заданной функции  $Y = f(X, G)$ . Здесь  $Y$ ,  $X$ ,  $G$  - векторы соответственно результата действия модели системы выходных переменных, параметров моделирования, входных переменных модели. Параметры модели  $X$  исследователь выбирает произвольно,  $G$  - принимают только те значения, которые характерны для данного объекта моделирования.

Очевидный подход в оценке адекватности состоит в сравнении выходов модели и реальной системы при одинаковых (если возможно) значениях входов. И те, и другие данные (данные, полученные на выходе имитационной модели и данные, полученные в результате эксперимента с реальной системой) — статистические. Поэтому применяют методы статистической теории оценивания и проверки гипотез.

Используя соответствующий статистический критерий для двух выборок, мы можем проверить статистические гипотезы ( $H_0$ ) о том, что выборки выходов системы и модели являются выборками из различных совокупностей или ( $H_1$ ), что они ";практически"; принадлежат одной совокупности.

Могут быть рекомендованы два основных подхода к оценке адекватности:

1 способ: по средним значениям откликов модели и системы.

Проверяется гипотеза о близости средних значений каждой  $n$ -й компоненты откликов модели  $Y_{n\text{известным}}$  средним значениям  $n$ -й компоненты откликов реальной системы .

Проводят  $N_1$  опытов на реальной системе и  $N_2$  опытов на имитационной модели (обычно  $N_2 > N_1$ ).

Оценивают для реальной системы и имитационной модели математическое ожидание и дисперсию, и соответственно.

Гипотезы о средних значениях проверяются с помощью критерия f-Стьюдента, можно использовать параметрический критерий Манны-Уитни и др.

Например, продемонстрируем использование f-статистики. Основой проверки гипотез является  $E_n = (Y_n - Y'_n)$ , оценка её дисперсии:

t-статистика:

.

Берут таблицу распределения t-статистики с числом степеней свободы:

$\alpha = N_1 + N_2 - 2$  (обычно с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$ ). По таблицам находят критическое значение  $t_{кр}$ . Если  $t_n \leq t_{кр}$ , гипотеза о близости средних значений n-й компоненты откликов модели и системы принимается. И т.д. по всем n компонентам вектора откликов.

2 способ: по дисперсиям отклонений откликов модели от среднего значения откликов систем.

Сравнение дисперсии проводят с помощью критерия F (проверяют гипотезы о согласованности), с помощью критерия согласия  $\chi^2$  (при больших выборках,  $n > 100$ ), критерия Колмогорова-Смирнова (при малых выборках, известны средняя и дисперсия совокупности), Кохрена и др.

Проверяется гипотеза о значимости различий оценок двух дисперсий: и .

Составляется F-статистика: (задаются обычно уровнем значимости

$\alpha = 0,05$ , при степенях свободы ), по таблицам Фишера для F-распределения находят  $F_{кр}$ . Если  $F > F_{кр}$ , гипотеза о значимости различий двух оценок дисперсий принимается, значит — отсутствует адекватность реальной системы и имитационной модели по n-ой компоненте вектора отклика.

Процедура повторяется аналогичным образом по всем компонентам вектора отклика. Если хотя бы по одной компоненте адекватность отсутствует, то модель неадекватна. В последнем случае, если обнаружены незначительные отклонения в модели, может проводиться калибровка имитационной модели (вводятся поправочные, калибровочные коэффициенты в моделирующий алгоритм), с целью обеспечения адекватности.

А если не существует реальной системы (что характерно для задач проектирования, прогнозирования)? Проверку адекватности выполнить в этом случае не удастся, поскольку нет реального объекта. Для целей исследования модели иногда проводят специальные испытания (например, так поступают при военных исследованиях). Это позволяет убедиться в точности модели,

полезности ее на практике, несмотря на сложность и дороговизну проводимых испытаний.

Могут использоваться и другие подходы к проведению валидации имитационной модели [56], кроме статистических сравнений между откликами реальной системы и модели. В отдельных случаях полезна валидация внешнего представления, когда проверяется насколько модель выглядит адекватной с точки зрения специалистов, которые с ней будут работать, так называемый тест Тьюринга (установление экспертами различий между поведением модели и реальной системы). В процессе валидации требуется постоянный контакт с заказчиком модели, дискуссии с экспертами по системе. Рекомендуются также проводить эмпирическое тестирование допущений модели, в ходе которого может осуществляться графическое представление данных, проверка гипотез о распределениях, анализ чувствительности и др. Важным инструментом валидации имитационной модели является графическое представление промежуточных результатов и выходных данных, а также анимация процесса моделирования. Наиболее эффективными являются такие представления данных, как гистограммы, временные графики отдельных переменных за весь период моделирования, графики взаимозависимости, круговые и линейчатые диаграммы. Методика применения статистических технологий зависит от доступности данных по реальной системе.

### Верификация имитационной модели

Верификация модели — есть доказательство утверждений соответствия алгоритма ее функционирования замыслу моделирования и своему назначению. На этапе верификации устанавливается верность логической структуры модели, реализуется комплексная отладка с использованием средств трассировки, ручной имитации, в ходе которой проверяется правильность реализации моделирующего алгоритма.

Комплексные процедуры верификации включают неформальные и формальные исследования программы-имитатора. Неформальные процедуры могут состоять из серии проверок следующего типа: проверка преобразования информации от входа к выходу; трассировка модели на реальном потоке данных (при заданных  $G$  и  $X$ ):

$X$  изменяется по всему диапазону значений контролируется  $Y$ ;

о можно посмотреть, не будет ли модель давать абсурдные ответы, если ее параметры будут принимать предельные значения;

о ";проверка на ожидаемость";, когда в модели заменяют стохастические элементы на детерминированные и др.

Полезным при решении указанных задач могут быть также следующие приёмы [56]:

обязательное масштабирование временных параметров в зависимости от выбранного шага моделирования (валидация данных);

валидация по наступлению "событий"; в модели и сравнение (если возможно) с реальной системой;

тестирование модели для критических значений и при наступлении редких событий;

фиксирование значений для некоторых входных параметров с последующим сравнением выходных результатов с заранее известными данными;

вариация значениями входных и внутренних параметров модели с последующим сравнительным анализом поведения исследуемой системы;

реализация повторных прогонов модели с неизменными значениями всех входных параметров;

оценка фактически полученных в результате моделирования распределений случайных величин и оценок их параметров (математическое ожидание и дисперсия) с априорно заданными

значениями;

сравнение исследователями поведения и результатов валидируемой модели с результатами уже существующих моделей, для которых доказана достоверность;

для существующей реальной исследуемой системы предсказание её будущего поведения и сравнение прогноза с реальными наблюдениями.

Формальные процедуры связаны с проверкой исходных предположений (выдвинутых на основе опыта, теоретических знаний, интуитивных представлений, на основе имеющейся информации). Общая процедура включает:

построение ряда гипотез о поведении системы и взаимодействии ее элементов;

проверка гипотез с помощью статистических тестов: используют методы статистической теории оценивания и проверки гипотез (методы проверки с помощью критериев согласия ( $\chi^2$ , Колмогорова-Смирнова, Кокрена и др.), непараметрические проверки и т.д., а также дисперсионный, регрессионный, факторный, спектральный анализы).

Валидация данных имитационной модели



Валидация данных имитационной модели предполагает исследование свойств имитационной модели, в ходе которого оценивается точность, устойчивость, чувствительность результатов моделирования и другие свойства имитационной модели.

Наиболее существенные процедуры исследования свойств модели: оценка точности результатов моделирования; оценка устойчивости результатов моделирования;

оценка чувствительности имитационной модели.

Получить эти оценки в ряде случаев бывает весьма сложно. Однако без успешных результатов этой работы, доверия к модели не будет, невозможно будет провести корректный проблемный анализ и сформулировать статистически значимые выводы на основе данных, полученных в результате имитации.

### **Контрольные вопросы**

1. Валидация модели.
2. Верификация имитационной модели
3. Проверка адекватности модели
4. Валидация данных имитационной модели

### **Основная литература:**

1. Варфоломеев В.И. Алгоритмическое моделирование элементов экономических систем. Практикум. Уч.пособие. Москва «Финансы и статистика» . 2000.
2. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ. Монография, Москва, Мир.1987.
3. Шукаев Д.Н. Имитационное моделирование на ЭВМ. Уч.пос.Алматы, 1995.
4. Шукаев Д.Н. Моделирование случайных закономерностей на ЭВМ. Уч.пос. Алма-Ата, 1991.
5. Шукаев Д.Н., Абдуллина В.З., Муртазина А.У. Методические указания к практическим занятиям по курсу «Моделирование систем». Алма-Ата 1985.
6. Шукаев Д.Н., Абдуллина В.З., Муртазина А.У. Методические указания к лабораторным занятиям по курсу «Моделирование систем».Алма-Ата 1987.
7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. Монография, изд-во «Мир»1978.
8. Гмурман В.Е.Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике Уч.пос для вузов.М.;Высш.школа, 1999.

9. Исмаилова Р.Т. Методические указания по курсу Имитационному моделированию для практических и самостоятельных работ. Алматы, КазНТУ, 2003г.
10. Исмаилова Р.Т. Методические указания по курсу Имитационному моделированию для лабораторных и самостоятельных работ .Алматы, КазНТУ, 2003г.