

На правах рукописи

Щетинин Денис Вячеславович

**УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕСТАМИ
СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАЗЕМНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

05.13.11 — математическое и программное обеспечение вычислительных
машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тверь 2008

Работа выполнена на Кафедре информационных технологий Факультета прикладной математики и кибернетики Тверского Государственного Университета.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Местецкий Леонид Моисеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Эрлих Александр Игоревич

кандидат физико-математических наук
Майсурадзе Арчил Ивериевич

Ведущая организация: Московский Государственный Технический
Университет Гражданской Aviации

Защита состоится _____ г. в _____ ч. на заседании диссертационного совета Д002.017.02 при Вычислительном центре им. А. А. Дородницына Российской Академии наук по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВЦ РАН.

Автореферат разослан

2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

В. В. Рязанов

Общая характеристика работы

Предмет исследования

Предметом данной работы является проблема **технической организации процесса разработки и программной реализации имитационных моделей**.

Под программной реализацией здесь понимается весь спектр задач, связанных с преобразованием знаний о предметной области и пользовательских требований в имитационный программный комплекс. Эти задачи тесно связаны между собой и должны рассматриваться совместно. Процесс создания сложных программных систем должен основываться на определенной **методологии**, обеспечивающей успешное решение всего комплекса проблем в целом с помощью согласованных между собой методов решения отдельных задач.

Практическое применение методологии может потребовать определенной адаптации предлагаемого процесса разработки к особенностям конкретной предметной области. Имитационное моделирование имеет ряд таких особенностей. В связи с важной ролью имитационного моделирования в науке, технике, экономике и др., технические аспекты методологии программной реализации имитационных моделей заслуживают специального исследования.

Актуальность темы

Необходимость повышения эффективности технологий разработки, развитие информационных технологий, их широкое распространение и рост конкуренции на рынке информационных услуг заставляют сегодняшних разработчиков моделей работать в весьма жестких условиях. По сравнению с аналогичными проектами 70-х, 80-х и даже 90-х годов на порядки сокращены людские, временные и материальные ресурсы, которые могут быть привлечены для создания системы. Эти обстоятельства в сочетании с увеличением сложности моделируемых систем и требований к качеству имитационных программных комплексов делают весьма актуальной проблему повышения эффективности процесса разработки имитационных программных комплексов.

Имитационное моделирование представляет собой метод исследо-

вания сложных систем. В результате процесс разработки имитационных моделей сопровождается *постоянным изменением требований* (и к самой модели, и к программному комплексу, в состав которого она входит). Соответственно, процесс разработки имитационной программной системы должен строиться как процесс постепенного формирования и уточнения требований к создаваемому программному продукту, то есть **итеративно**. При этом полностью спланировать его на ранних стадиях работы практически невозможно. Следовательно, программная реализация будет постоянно подвергаться изменениям. Поэтому эффективная методология создания имитационных моделей должна обеспечивать постоянную стоимость внесения изменений в существующий программный код на протяжении всего времени разработки — то есть, обеспечивать *гибкость*.

Традиционно методы разработки сложных программных систем ориентированы главным образом на подробное предварительное планирование всех этапов создания системы и в этом смысле являются *прогнозирующими* — пытаются предугадать все возможные проблемы, с которыми разработчики могут столкнуться в процессе разработки и учесть их в проекте будущей системы. Очень часто такая организация процесса разработки требует привлечения больших коллективов разработчиков и приводит к весьма большим временным и материальным затратам. Но самое главное — использование прогнозирующих методологий не обеспечивает возможности внесения существенных изменений в требования по ходу разработки, так как это повлечет за собой нарушение всего плана работ и необходимость возврата к начальным стадиям (анализ требований — планирование — проектирование).

Проблема обеспечения гибкости программной системы в условиях ограниченных ресурсов, не может быть решена одними только техническими усовершенствованиями. Многие из созданных ранее методов и технологий разработки имитационных моделей в этих условиях оказываются неадекватными. Специализированные визуально-ориентированные инструменты для описания систем позволяют относительно успешно решать определенный круг типовых задач и тем самым несколько сокращать затраты на построение моделей «с нуля». Но при этом такие задачи, как формализация требований, контроль соответствия системы этим требованиям, локализация и контроль изменений, поиск источников ошибок и т.д. — то есть, все те задачи, которые и составляют сложность общей проблемы обеспечения гибкости, — не снимаются, и их ре-

шение становится даже сложнее.

Приходится констатировать, что на сегодняшний день наметилось существенное отставание имитационного моделирования от других областей информационных технологий и программирования, где проблема гибкости решается на методологическом уровне. Во второй половине 90-х гг. основные подходы к решению этих проблем были сформулированы и опубликованы в виде манифеста гибких технологий. Данное направление, а также предложенные подходы достаточно быстро были признаны актуальными и перспективными, начались масштабные исследования по этой теме. К настоящему времени сформировался уже целый ряд гибких методологий, которые нашли свое применение на практике в конкретных областях: прикладные программные комплексы, базы данных, сетевые технологии, web-сервисы, разработка пользовательских интерфейсов и т.д.

В данной работе рассматривается технический аспект организации разработки, который можно понимать как перевод плохо формализованных и неструктурированных требований, предъявляемых к программному продукту, на формализованный компьютерный язык. Среди различных подходов и методов, призванных обеспечить гибкость программного кода в техническом аспекте, выделяется методология управляемой тестами разработки (Test-Driven Development), синтезирующая в себе такие методы как «проектирование в коде», «сначала тесты», «постоянная переработка кода». Данный подход, разработанный около 10 лет назад, уже достаточно хорошо зарекомендовал себя и широко применяется на практике. Однако, вопрос использования данной методологии в имитационном моделировании остается малоизученным.

Таким образом, проблема организации процесса разработки имитационных моделей на основе гибких методологий, и, в частности, ее технический аспект является актуальной темой исследования.

Цель работы

Цель работы — повышение эффективности разработки систем имитационного моделирования за счет обеспечения *гибкости* их программной реализации.

Предлагаемый подход к решению

Как отмечалось выше, для достижения поставленной цели предлагается использовать идеи и принципы гибких методологий, ориентированных на обеспечение эффективной разработки в условиях изменяющихся требований. Гибкие методологии позволяют получить:

- более высокую частоту выпуска промежуточных версий
- высокую степень интерактивности взаимодействия клиент – разработчик
- снижение временных и материальных затрат при развитии модели «от простого к сложному» за счет более полного использования результатов (программного кода), полученных на предыдущих итерациях.

В конечном итоге, повышается вероятность успешного завершения проекта, уменьшаются материальные и временные затраты на разработку, снижается риск существенных потерь при неудачах.

Предлагаемый подход основывается на использовании методологии *Test-Driven Development* (управляемой тестами разработки), фокусирующейся на инженерно-технических аспектах разработки программного обеспечения. Данная методология предлагает управлять процессом разработки с помощью постоянно развивающейся системы спецификаций, записанных в виде автоматических программных тестов. За счет этого данный подход позволяет:

- перевести процесс отражения требований в программный код на более формализованный уровень;
- организовать итеративную разработку, обеспечивая контроль изменений на всех этапах от формализации требований до их воплощения в программном коде;
- значительно упростить и ускорить создание детальной документации к системе (ее роль играют тесты), которая остается актуальной на протяжении всей разработки;
- использовать методологически упорядоченные и поддерживаемые соответствующими автоматизированными средствами подходы к адаптации существующих программных систем к новым требованиям.

Но применение данной методологии в такой специфической области как имитационное моделирование сталкивается с целым рядом проблем. В данной работе рассматриваются эти проблемы и предлагаются пути их разрешения, обобщенные в *метод управляемого тестами имитационного моделирования*.

Новое решение в области технологий имитационного моделирования и программирования требует не только теоретического обоснования, но и проведения экспериментальных исследований на реальном проекте сложной системы моделирования. В данной работе материалом для экспериментальной проверки стала разработка модели наземного движения воздушных судов в составе программного комплекса, поддерживающего принятие решений по управлению крупным аэропортом.

Задачи исследования

В соответствии с выбранным подходом для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Провести теоретическое обоснование использования гибких методологий в имитационном моделировании дискретных систем
- Разработать метод управляемого тестами имитационного моделирования
- Разработать имитационную модель сложной системы, на примере которой будут продемонстрированы основные аспекты практического применения предложенного метода
- Экспериментально показать практическую эффективность метода управляемого тестами имитационного моделирования на примере реального, полномасштабного имитационного программного комплекса.

Результаты, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

- Метод управляемого тестами имитационного моделирования
- Созданная с использованием данного метода имитационная модель наземного движения воздушных судов по летному полю аэропорта и программный комплекс для проведения имитационных экспериментов с ней
- Программный комплекс для подготовки, проведения и анализа результатов моделирования движения воздушных судов по летному полю аэропорта, разработанный с использованием и поддерживающий применение метода управляемого тестами имитационного моделирования

Научная новизна

Впервые в области имитационного моделирования представлен метод, реализующий идеи и принципы гибких методологий — метод управ-

ляемого тестами имитационного моделирования. Предложенные способы создания программных управляющих тестов позволяют организовать итерационную разработку моделей сложных систем.

Разработанная с использованием данного метода имитационная модель аэропорта представляет собой первую отечественную разработку такого масштаба и функционального наполнения в этой области. Подобные зарубежные разработки могут рассматриваться лишь как отдаленные прототипы, поскольку известные публикации по этим моделям не раскрывают ни принципов математического моделирования, ни технологии создания моделей.

Практическая значимость

Метод управляемого тестами имитационного моделирования позволяет сократить сроки и материальные затраты на разработку имитационных моделей, повысить качество, надежность и точность моделирования.

Имитационная модель наземного движения воздушных судов и программный комплекс на ее основе позволяют получить более точные и надежные прогнозы при решении задач по управлению аэропортом. Это повышает безопасность полетов и дает значительный экономический эффект за счет снижения затрат на проведение ремонтных работ и крупных реконструкций, более рациональной организации движения воздушных судов, возможности выбора более продуктивных вариантов расписаний и, в конечном итоге, повышения пропускной способности аэропорта.

Апробация

Представленные в работе результаты докладывались и обсуждались на I-ой и II-ой всероссийских конференциях «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (Санкт-Петербург, 23 – 24 октября 2003 г. и 19 – 21 октября 2005 г. соответственно), конференции «Интеллектуализация обработки информации» (Алушта, Украина, 14 – 19 июня 2004 г.), на семинарах в ВЦ РАН и ТвГУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе, 1 работа [5] в рецензируемом журнале, рекомендуемом ВАК, и 6 работ в других

изданиях: [1, 2, 3, 4, 6, 7].

Внедрение результатов

Выносимые на защиту методы были реализованы, исследованы и использованы для решения прикладных задач в ходе работ по проектам реконструкции международных аэропортов «Шереметьево», «Домодедово».

Краткое содержание

Во **введении** представляется тема работы, обосновывается ее актуальность, проводится обзор литературы, формулируются цель и задачи, рассматриваются полученные результаты, их новизна, а также приводится структура работы.

В **первой главе** обосновывается необходимость разработки метода построения имитационных моделей и программных комплексов на основе итеративного процесса развития системы по принципу «от простого к сложному». В основу предлагаемого метода положены принципы и подходы гибких методологий и, в частности, методологии *Test-Driven Development*¹.

Суть предлагаемого метода заключается в использовании *автоматических программных тестов* для спецификации выявленных требований непосредственно в программном коде, реализующем имитационную модель.

Тестом назовем программную систему, специальным образом анализирующую поведение другой (тестируемой) программной системы и возвращающая значения «*истина*» (тест «*работает*») или «*ложь*» (тест «*проваливается*») в зависимости от выполнения заданного в тесте условия. Таким образом, тест формально описывает условия, которым должна удовлетворять программная система. Каждая итерация начинается с создания теста, который описывает те возможности, которые будут реализованы в системе на данной итерации.

В соответствии с рассматриваемым методом процесс разработки строится как последовательность итераций. На каждой итерации создается очередная версия программной системы, включающая новые по отношению к предыдущим версиям возможности. Структура итерации

¹Kent Beck. Test-Driven Development: By Example. Addison-Wesley, 2003

представлена на рис. 1.

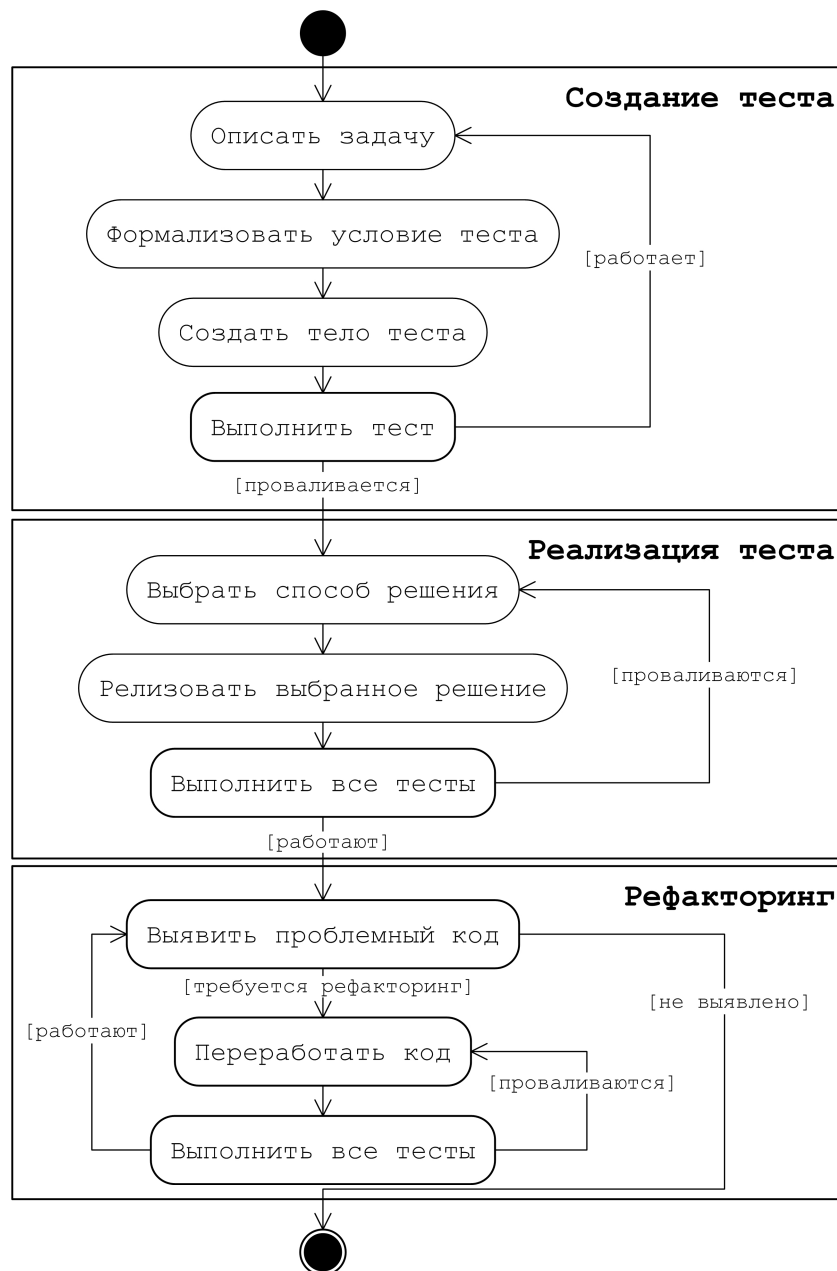


Рис. 1. Схема итерации в контексте управляемой тестами разработки

Такая организация процесса разработки имеет целый ряд достоинств, среди которых прежде всего следует отметить следующие:

- Тесты, выступая в роли средства формализации результатов планирования, анализа и проектирования, и формируя спецификацию для реализации в программном коде, тем самым позволяют управлять процессом разработки
- Система тестов выполняет роль индикатора функционального состояния системы, дает возможность контролировать изменения, и тем самым обеспечивает надежную основу для развития системы

- Тесты являются средством контроля качества программной системы, причем как с точки зрения «внешней» функциональности системы (интересующей конечного пользователя), так и с точки зрения ее внутреннего устройства и программной реализации (важной для разработчиков)
- Тесты являются весьма эффективным средством документирования, поскольку наборы тестов достаточно подробно и абсолютно адекватно описывают поведение системы на всех уровнях абстракции

В целом, данный подход позволяет получить высокое качество программного продукта, снижая при этом затраты на формализацию требований и управление процессом разработки, внесение изменений в существующий программный код, документирование. Таким образом, методология управляемой тестами разработки обеспечивает необходимую степень гибкости. Однако ее использование в контексте имитационного моделирования связано с рядом потенциальных проблем, определяемых особенностями данной предметной области, в первую очередь, обусловленных исследовательским характером разработки имитационной модели и определением требований к программному комплексу в процессе разработки; динамической природой объекта моделирования; значительным количеством случайных факторов; большим объемом данных, характеризующих результаты моделирования и др.

В связи с этим применение метода управляемой тестами разработки для создания имитационных моделей становится нетривиальной задачей. Метод управляемого тестами имитационного моделирования основывается на следующих принципах построения системы тестов.

Создавать направляющие разработку тесты предлагается в соответствии с характерным масштабом осреднения времени² на различных уровнях абстракции модели. В первом приближении можно выделить два базовых подхода: на основе числовой оценки выходных параметров медленной модели (*статистические тесты*) и анализ поведения быстрых моделей в составе тестируемой системы (*событийное тестирование*). Событийное тестирование может быть реализовано в различных временных масштабах: от детального анализа отдельных событий, происходящих в элементарных компонентах системы, до более обобщенной оценки функционирования более крупных подсистем на более длительных отрезках времени. Удобным инструментом здесь являются *протоколы* — коллекции данных, с нужной степенью детализации описывающих

²Ю. Н. Павловский. Имитационные модели и системы. М.: ФАЗИС: ВЦ РАН, 2000

события в моделируемой системе. Тестирование на основе протоколов, таким образом, занимает промежуточное положение между базовыми подходами, давая возможность варьировать степень детализации при тестировании.

Важную роль с точки зрения повышения эффективности метода управляемого тестами имитационного моделирования играет техника *суррогатных объектов* (*mock objects*). Суть ее состоит в замене в тестах реальных сложных объектов на фиктивные, упрощенно эмулирующие нужный аспект поведения своего прототипа. Это позволяет минимизировать проблемы, связанные с необходимостью организации контекста функционирования тестируемой системы, давая возможность создавать более компактные модульные тесты.

Таким образом, метод управляемого тестами имитационного моделирования состоит в конкретизации способов создания тестов в рамках общей методологии Test-Driven Development.

Во **второй главе** в качестве материала для экспериментальной проверки положений метода управляемого тестами имитационного моделирования рассматривается задача моделирования наземного движения воздушных судов (ВС) по летному полю с целью принятия и обоснования решений по управлению аэропортом (АП). В частности, рассматриваются задачи оценки проектных решений по реконструкции крупного международного АП.

Данный проект является не упрощенным учебным, а реальным полномасштабным проектом, достаточно полно отражающим основные аспекты и нюансы практического применения предложенного метода.

Сложность управления крупным аэропортом определяется целым рядом факторов: необходимостью комплексного учета огромного количества различных факторов, взаимосвязи которых необозримы и носят сложный нелинейный характер, наличием многочисленных неопределенностей, связанных с самой спецификой авиаперевозок: нарушениями графиков подготовки судов к полету, опозданиями в прилете судов, нештатными техническими ситуациями, влиянием погодных условий и т.п. Следует также учитывать особые требования к безопасности и надежности функционирования такой системы. При принятии решений проектировщики и руководители должны получить аргументированные количественные оценки, описывающие поведение АП в различных условиях и режимах работы. Для этого нужны соответствующие методы, базирующиеся на точных математических методах прогнозирования. Но при этом

из рассмотрения не должны исключаться и экспертные методы анализа.

Наиболее важными показателями эффективности работы АП являются показатели *пропускной способности*. Известно, что задача оценки пропускной способности относится к теории массового обслуживания. АП может рассматриваться как система (или сеть) массового обслуживания (СМО). Однако прямое применение методов теории массового обслуживания для получения достаточно точной и детальной аналитической модели в рассматриваемом контексте практически невозможно. Входной поток заявок данной системы определяется прибытием и отправлением ВС и является нестационарным, к тому же обладает последствием. Поскольку время обслуживания отдельных заявок (определяемых временем руления ВС) зависит от структуры рулежной сети и от текущей ситуации на летном поле, нужно учитывать эту информацию при определении состояния СМО, что приводит к большой размерности вектора состояния. Саму СМО приходится рассматривать как многоканальную. Процессы обработки заявок (передвижения ВС) не описываются марковскими цепями. Эти и другие проблемы не позволяют получить аналитическую модель, обеспечивающую получение необходимых для принятия управляющих решений оценок. Альтернативой является технология имитационного моделирования, которую можно рассматривать как синтез традиционных математических подходов и (относительно) новых информационных технологий. Использование компьютерных имитационных моделей позволяет сочетать точность, надежность и обоснованность математических моделей с возможностью обработки больших объемов информации на современных вычислительных устройствах, обеспечивающих возможность детального анализа сложных систем, визуализации результатов прогнозирования, проведение экспертных оценок различных вариантов управляющих и проектных решений и т.п.

В данном конкретном случае компьютерная имитация даст возможность с нужной степенью детализации промоделировать процессы, учитывая при этом все параметры проектных решений и статистические данные потоков ВС, получить как точные количественные оценки, так и обеспечить проведение качественного экспертного анализа. Имитационная модель аэропорта представляет интерес только в составе программного комплекса, который обеспечивает решение всех задач, связанных с проведением имитационных экспериментов: подготовку исходных данных, численную обработку выходных данных модели и получение статистических результатов, визуализацию полученных результатов и дина-

мики функционирования системы, обоснование полученных результатов.

Формулируются следующие основные требования к модели и поддерживающему ее использованию программному комплексу:

- Работа АП должна моделироваться для различных вариантов расписаний авиаперевозок, как существующих (например, с целью проверки адекватности модели), так и прогнозных, полученных в результате модификации существующих
- В программном комплексе должна быть реализована возможность описания вариантов проектных решений, а также существующих условий работы АП в виде специальных объектов — *сценариев*, — допускающих простые способы создания, манипуляции и использования для проведения имитационных экспериментов
- Программный комплекс должен обеспечить расчет показателей качества и возможность варьирования (пользователем модели) параметров и алгоритмов вычисления этих показателей в зависимости от решаемой задачи и условий
- Для получения экспертных оценок программный комплекс должен предоставить графическое анимированное отображение процесса движения ВС по летному полю как в реальном, так и в ускоренном масштабах времени
- Программный комплекс должен обеспечить проверку адекватности результатов моделирования (как формальными методами на основе количественного анализа результатов моделирования, так и при помощи экспертной оценки)

Проведение экспериментов с имитационной моделью должно обеспечить достаточно подробную информацию о динамике работы АП. Однако, для проведения сравнительного анализа качества работы АП нужно иметь небольшой, обозримый набор количественных показателей. Выбор и формализация показателей качества процессов наземного движения ВС осуществляется на основе анализа показателей пропускной способности АП. Наиболее значимыми показателями, характеризующими процесс движения ВС на летном поле в течение суток (по характеристикам времени руления и задержки во времени руления), являются:

- суточная динамика прилета и вылета ВС;
- суточная динамика количества ВС, стоящих в очередях;
- распределение времени руления ВС в течение суток;
- максимальное количество ВС, которым одновременно пришлось ожидать во время руления, за сутки;

- среднее время простоя в очередях по всем ВС за сутки;
- среднее время руления по всем ВС за сутки.

Имея оценки этих показателей, можно произвести сравнительный анализ работы АП в различных условиях и при различных исходных данных. Основными показателями при этом являются (1) способность АП в принципе обслужить весь поток ВС, предусмотренный расписанием, и (2) выполнение нормативов по времени руления ВС при вылете.

Важным вопросом является выбор технологии моделирования. Он связан с рядом конструкторских решений, принимаемых на основе анализа предъявляемых к системе требований и существующих технологий имитационного моделирования. Так, функционирование АП удобно описывать в терминах отдельных событий, таких как «начало движения по рулежной дорожке», «изменение скорости», «взлет», «посадка» и т.д. Причем по времени эти события распределены неравномерно. Соответственно, имитационную модель наземного движения ВС целесообразно строить как *дискретную систему*. Наилучшее соотношение качества и точности моделирования в этой ситуации дает метод *изменяющегося шага по времени* (до следующего события). Программно модель реализована на универсальном языке программирования (*C++*) с использованием *ориентированной на имитационные процессы* библиотеки моделирования.

В **третьей главе** подробно рассматривается реализация имитационной модели наземного движения ВС. В соответствии с предложенным методом разработка включает в себя несколько итераций, в частности, здесь подробно анализируются следующие этапы:

- создание простейшей модели АП как одноканальной системы массового обслуживания
- моделирование работы элементов рулежной сети
- моделирование принятой в АП организации движения
- моделирование движения с изменяющейся скоростью и соблюдение дистанции между ВС

Каждая итерация начинается с неформального словесного описания задачи. Далее рассматриваются:

1. Формализация задачи в виде автоматического программного теста.
2. Реализация теста — изменение программной системы, обеспечивающее успешное выполнение этого теста, а также всех остальных тестов в системе.

В работе рассматриваются основные аспекты реализации: классы, до-

бавляемые в систему, их интерфейсы; алгоритмы, реализующие наиболее важные методы, в том числе изменения в системе тестов.

3. Рефакторинг — изменения программной системы, направленные на улучшение ее внутренней структуры, но не изменяющее ее внешнее поведение.

Поскольку для имитационного моделирования характерно накопление изменений, запутывающих программный код и снижающих общую вычислительную эффективность, данный этап особо важен.

Рассмотренный процесс разработки наглядно показывает возможности методологии управляемого тестами имитационного моделирования по итерационной организации разработки. В частности, методология обеспечивает решение следующих задач:

- формализованную спецификацию решаемых на каждой итерации задач, выполняемую непосредственно в программном коде в виде автоматизированного теста
- управление процессом разработки, путем варьирования спецификациями в создаваемых тестах
- контроль внесения изменений в программный код, за счет использования созданных тестов в качестве индикаторов функционального состояния программной системы
- управление качеством программного кода, оцениваемого по трудоемкости создания теста для очередной задачи,
- создание подробной технической документации к разрабатываемой системе, роль которой в значительной степени выполняют тесты

Успех разработки любой имитационной модели во многом определяется полнотой и точностью исходных данных. При использовании метода управляемой тестами разработки необходимость в качественных данных еще больше возрастает. Для успешного решения проблемы сбора, анализа и обработки исходной информации в рамках данного исследования была разработана методика и реализована поддерживающая ее использование подсистема в программном комплексе.

В качестве исходных данных для модели наземного движения воздушных судов выделены: описание структуры рулежной сети и параметров отдельных ее элементов; характеристики ВС; алгоритмы и параметры диспетчерского управления; правила организации полетов в районе АП; статистические данные по работе АП; реальные и прогнозные расписания полетов в различных формах представления распределения случайных величин, характеризующих задержки прибытия рейсов, пробега

ВС при посадке.

Характерной особенностью имитационного моделирования является большое число неопределенностей на входе модели. Одним из способов противодействия этой проблеме является использование *сценариев*. В рамках сценария составляется правдоподобная гипотеза о значениях неопределённых факторов (погода, расписание, случайные опоздания и т.д.), и в результате задача упрощается. Поскольку в рамках исследования нужно проанализировать целый ряд таких гипотез, количество сценариев может быть весьма большим. Соответственно, нужен механизм конструирования сценариев и подготовки данных для их построения.

В задаче моделирования АП сценарий включает в себя:

- погодные условия;
- параметры организации воздушного движения: курс взлета/посадки, режим использования взлетно-посадочных полос, конфигурацию рулежной сети;
- расписание полетов (авиапотоки).

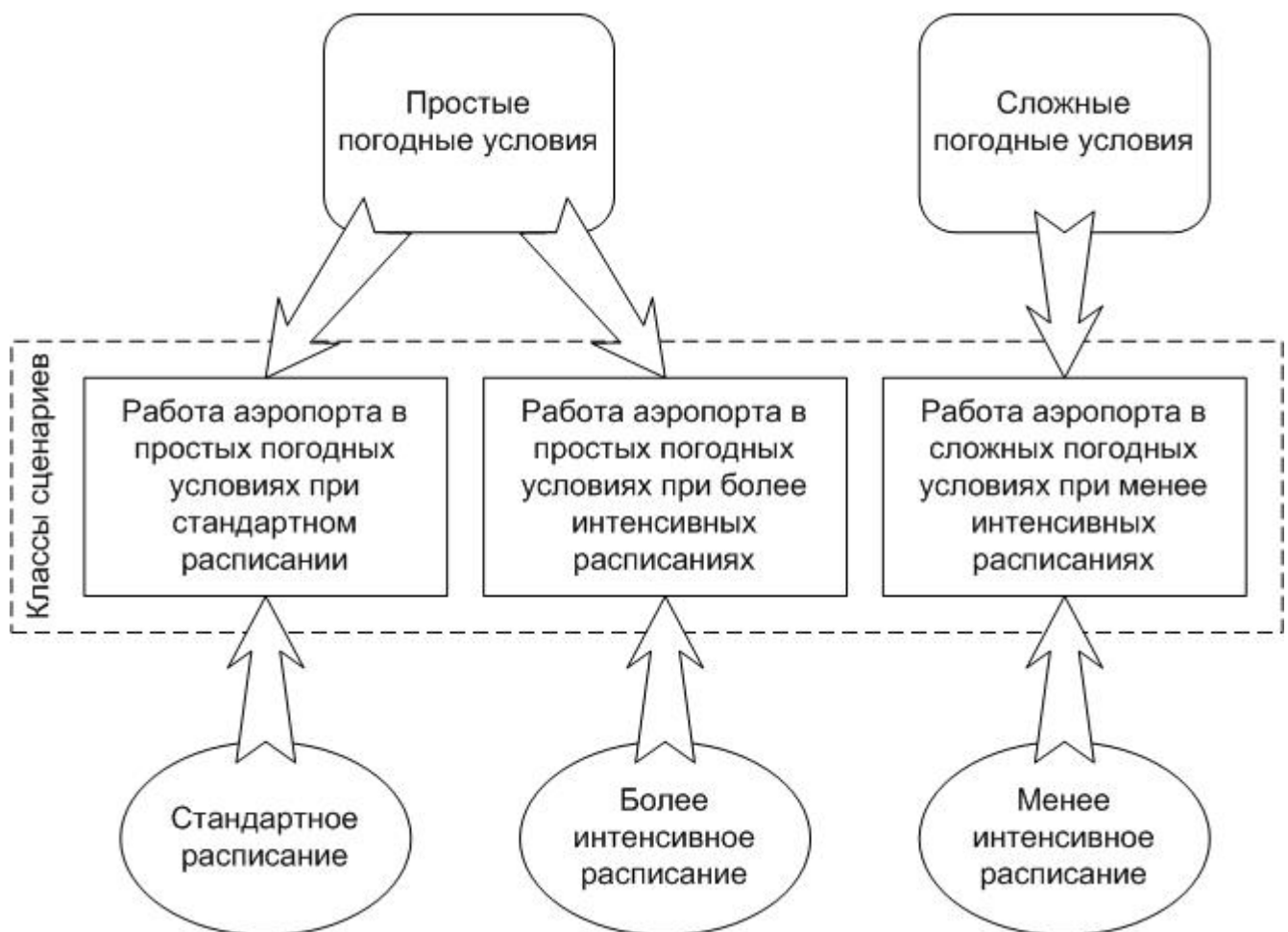


Рис. 2. Принятые классы сценариев

Очевидно, проведение имитационных экспериментов с большим количеством сценариев является трудновыполнимой на практике задачей. Разработанный программный комплекс позволяет сформировать набор наиболее важных сценариев и провести по ним имитационные эксперименты. Так, при анализе вариантов реконструкции АП «Шереметьево», в частности, для оценки варианта постройки третьего терминала, рассматривались три группы сценариев — см. рис. 2

Далее в главе рассматривается архитектура всего программного комплекса (см. рис. 3) и устройство имитационной модели.

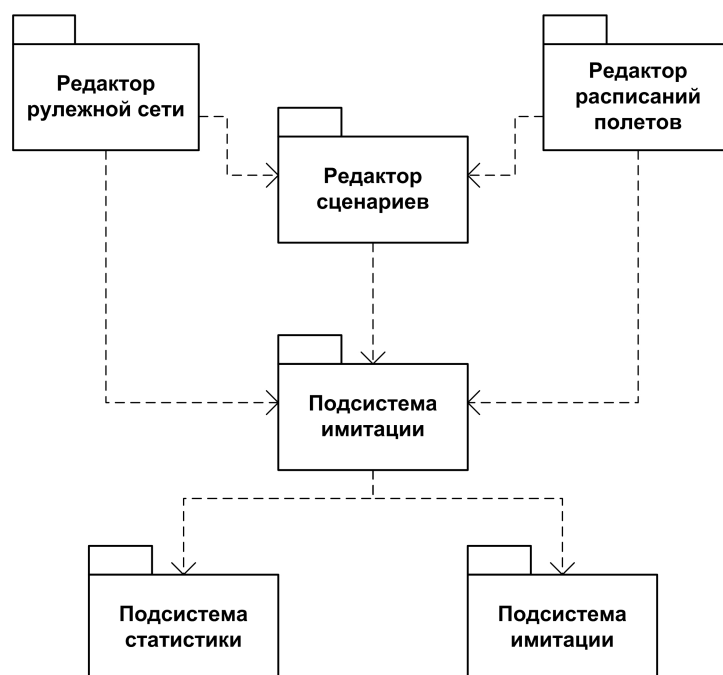


Рис. 3. Структура программного комплекса

Редакторы рулежной сети, расписания полетов и сценариев позволяют удобно, с использованием визуальных средств подготовить исходные данные для проведения имитационных экспериментов.

Подсистема статистики обеспечивает проведение количественного анализа результатов отдельных прогонов модели и имитационных экспериментов, обрабатывая полученные в ходе моделирования данные и представляя их в численном и графическом виде.

Подсистема визуализации дополняет подсистему статистического анализа результатов моделирования, предоставляя пользователю возможность с нужной точностью проследить развитие процессов в аэропорту, оценить различные аспекты его функционирования, обнаружить «узкие места» и т.п. Такие возможности очень важны, поскольку тем самым обеспечивается проведение экспертного анализа с целью получения

и обоснования качественных оценок работы АП. Кроме того, отображение результатов моделирования в визуальных терминах заметно упрощает постановку и формулирование задач, представление текущих результатов заказчику, решение проблемы валидации и верификации модели, оценки ее адекватности, а также обучения пользователей и введение модели в эксплуатацию.

Основными компонентами имитационной модели наземного движения воздушных судов являются: рулежная сеть и ее элементы, ВС, диспетчерские службы.

Рулежная (маршрутная) сеть представляется в виде ориентированного размеченного графа $\Gamma = \langle V, L, p \rangle$, где

V — множество вершин, соответствующих выбранным конечным точкам линейных отрезков рулежной сети АП

$L = \{ \langle u, v \rangle : u, v \in V \}$ — множество дуг (ориентированных ребер), описывающих отдельные участки рулежной сети

$p : L \rightarrow F$, F — множество меток (параметров, ассоциированных с дугами графа и определяющих поведение ВС на соответствующем участке).

Граф Γ назовем *графом рулежной (маршрутной) сети АП*. Отдельные участки рулежной сети представляются парами вида $\langle l, p(l) \rangle$ ($l \in L$), которые были названы *локациями*. В программной реализации с локациями связан ряд алгоритмов, обеспечивающих моделирование движения ВС по рулежной сети (механизм блокировок, определение скорости движения, выбор маршрута руления и т.д.), а также визуализацию самих локаций и движения по ним с помощью аппарата кривых Безье.

Параметры ВС в модели представляются следующими атрибутами: идентификатор; тип (тяжелое, среднее, легкое); тип рейса (прилет или вылет); маршрут движения; текущая локация; расстояние, пройденное по текущей локации; скорость; интервал движения; признак выполнения посадочной или взлетной операции и связанные с этим параметры; посадочные характеристики ВС.

Описывается также модель работы диспетчерских служб: диспетчера воздушной зоны, диспетчера старта и посадки, диспетчера руления.

Поведение модели в динамике реализуется с помощью следующих имитационных процессов:

- *Движение ВС по маршруту.*

Данный имитационный процесс обеспечивает моделирование изменения положения самолетов на летном поле АП.

- *Управление скоростью ВС.* Этот процесс управляет скоростью ВС, с целью соблюдения минимально допустимой дистанции между ВС и соблюдения ограничений, действующих на отдельных участках рулежной сети.
- *Управление взлетами.* Данный имитационный процесс обеспечивает выдачу разрешения на выполнение взлетной операции.
- *Моделирование входного потока ВС.* Этот имитационный процесс обеспечивает своевременное появление ВС в системе (с учетом случайных отклонений от времени, указанного в расписании).

Оценка адекватности разработанной имитационной модели в работе проводится на примере задачи анализа вариантов реконструкции АП «Шереметьево», в частности изучения и оценки возможности постройки нового терминала. Анализ проводился путем сравнения параметров функционирования АП в двух конфигурациях: *существующей* (два терминала) и *перспективной* (три терминала). В частности, были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведена сравнительная оценка работы АП в двух указанных конфигурациях при хороших погодных условиях и при авиа- и пассажиропотоках нынешней интенсивности.
2. Проведена сравнительная оценка работы АП в двух указанных конфигурациях при ухудшении погодных условий
3. Проведена сравнительная оценка работы АП в двух указанных конфигурациях при хороших погодных условиях и при перспективных авиа- и пассажиропотоках.
4. Выполнена оценка адекватности моделирования на основе вычислительных экспериментов с существующими расписаниями полетов.

Количественные оценки на основе χ^2 -критерия показывают, что распределения времени ожидания ВС при простых погодных условиях и базовом расписании в существующей конфигурации и в конфигурации с новым терминалом практически (с вероятностью более 0,99) совпадают. То есть, ввод в эксплуатацию третьего терминала не скажется на качестве работы АП в простых погодных условиях при условии сохранения нагрузки.

На основе оценок, полученных в ходе проведения вычислительных экспериментов, также показывается, что модель достаточно полно и точно моделирует работу АП в простых погодных условиях на реальном расписании. Экспертные оценки, полученные путем визуального анализа результатов моделирования специалистами, подтверждают выводы об

адекватности разработанной модели.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы:

- Проведено теоретическое обоснование использования гибких методологий в имитационном моделировании дискретных систем
 - Разработан метод управляемого тестами имитационного моделирования
 - На примере разработки имитационного программного комплекса моделирования наземного движения воздушных судов экспериментально показана практическая эффективность данного метода
 - В рамках разработки данного имитационного программного комплекса решены следующие задачи:
 - Проведен анализ предметной области, выбраны и формализованы показатели качества работы аэропорта, обосновано применение гибких методологий разработки
 - Разработана методика сбора и подготовки исходных данных для построения направляющих тестов
 - С использованием предложенного метода создана имитационная модель наземного движения воздушных судов по летному полю аэропорта, обеспечивающая получение количественных оценок показателей качества и проведение экспертного анализа работы аэропорта
 - Создан программный комплекс, обеспечивающий проведение имитационных экспериментов с целью получения точных количественных и экспертных (качественных) оценок эффективности работы аэропорта при заданных условиях для различных вариантов управляющих решений.
- Использование гибких методологий и метода управляемого тестами имитационного моделирования позволило разработать сложный программный комплекс в достаточно сжатые сроки силами небольшого коллектива разработчиков.
- Проведена верификация и установлена адекватность имитационной модели и получаемых с ее помощью прогнозных оценок решаемым задачам

Таким образом, эффективность метода обоснована как теоретиче-

ски, так и опытно-экспериментальным путем.

Публикации автора по теме диссертации

- [1] Имитационное моделирование аэропорта — инструмент обоснования решений / Д. Щетинин, Л. Местецкий, А. Исаев, А. Федоров // *Аэропорт Партнер*. — 2002. — № 5–6.
- [2] *Щетинин, Д.* Библиотека имитационного моделирования систем с дискретными событиями C++SIM / Д. Щетинин // Сборник докладов I-ой всероссийской конференция «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (ИММОД-2003). — Т. I. — СПб: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2003.
- [3] *Щетинин, Д.* Управляемая тестами разработка в применении к имитационному моделированию / Д. Щетинин // Сложные системы: обработка информации, моделирование и оптимизация: Сборник научных трудов. — Тверь: Тверской Государственный Университет, 2005.
- [4] *Щетинин, Д.* Управляемая тестами разработка имитационных моделей / Д. Щетинин // Сборник докладов II-ой всероссийской конференция «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (ИММОД-2005). — Т. I. — СПб: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2005.
- [5] *Щетинин, Д.* Управляемое тестами имитационное моделирование / Д. Щетинин // *Программные продукты и системы*. — 2007. — № 3.
- [6] *Щетинин, Д.* Имитационная модель наземного движения воздушных судов в аэропорту / Д. Щетинин, Л. Местецкий // Сборник докладов I-ой всероссийской конференция «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (ИММОД-2003). — Т. II. — СПб: ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2003.
- [7] *Щетинин, Д.* Прогнозирование пропускной способности аэропорта на основе имитационного моделирования / Д. Щетинин, Л. Местецкий, А. Федоров // Интеллектуализация обработки информации: те-

зисы докладов Международной научной конференции. — Симферополь: Крымский научный центр НАН Украины, 2004.