

На правах рукописи

Окольнішников Виктор Васильевич

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск — 2006

Работа выполнена в Конструкторско-технологическом институте вычислительной техники СО РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор М.И. Нечепуренко

Официальные
оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.Г. Марчук
доктор физико-математических наук,
профессор В.К. Попков
доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Сухомлин

Ведущая организация: Институт системного
программирования РАН

Защита состоится "3" октября 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 003.061.02 при Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ИВМиМГ СО РАН.

Автореферат разослан "31" 08 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н.



С.Б.Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Имитационное моделирование — один из наиболее распространенных и мощных методов исследования сложных систем.

Имитационное моделирование, как составная часть информатики, прошло более чем 40-летний путь развития. В последние годы основным направлением развития имитационного моделирования в мире является распределенное имитационное моделирование.

Классическое (последовательное) имитационное моделирование реализуется на однопроцессорном компьютере. Распределенное (параллельное) имитационное моделирование охватывает весь спектр современной вычислительной техники: суперкомпьютеры, кластерные вычислительные системы, локальные и глобальные сети.

Распределенное имитационное моделирование позволяет решать задачи, требующие большого количества процессорного времени, интегрировать модели, исполняющиеся на различных (в том числе и географически отдаленных) вычислительных системах, разрабатывать тренажеры для исследования систем и обучения персонала.

В настоящее время в России наблюдается стремительный рост числа многопроцессорных вычислительных систем кластерного типа и их суммарной производительности. Одновременно растет потребность в имитационных моделях сложных систем, требующих большого количества вычислительных ресурсов.

Широкому использованию имитационного моделирования для многопроцессорных вычислительных систем в России препятствует отсутствие или недоступность систем распределенного имитационного моделирования. В связи с этим разработка методов параллельного исполнения имитационных моделей и разработка средств распределенного имитационного моделирования для многопроцессорных вычислительных систем является актуальной.

Использованию имитационного моделирования для многопроцессорных вычислительных систем препятствует также разнообразие типов многопроцессорных вычислительных систем. В связи с этим задача разработки переносимой системы распределенного имитационного моделирования также является актуальной.

Цель работы состоит в разработке архитектуры программного обеспечения, входного языка и алгоритмов синхронизации модельного времени системы распределенного дискретного имитационного моделирования, обладающей свойствами переносимости, эффективности, расширяемости, проверке полученных алгоритмов и подходов при разработке системы распределенного дискретного имитационного моделирования *Мера* для суперкомпьютера МВС-1000/М.

Методы исследований. При разработке системы *Мера* использовались математические методы для описания и исследования структуры и условий корректного исполнения формальной распределенной имитационной модели.

При разработке с помощью системы *Мера* имитационного стенда автоматизированной системы управления технологическими процессами Северомуйского тоннеля (АСУ ТП СМТ) использовались методы математического моделирования, численные методы.

Новизна. Новыми результатами, полученными в процессе выполнения диссертационной работы, являются:

- разработка архитектуры программного обеспечения, входного языка и алгоритмов синхронизации модельного времени переносимой системы распределенного имитационного моделирования;
- разработка первой для суперкомпьютера МВС 1000/М системы распределенного дискретного имитационного моделирования *Мера*;
- разработка семейства системы *Мера* для различных операционных систем;
- разработка имитационного стенда для проверки решений по созданию АСУ ТП движения железнодорожных составов по Северомуйскому тоннелю.

Теоретическая ценность результатов работы заключается в обосновании методов и алгоритмов, использованных при разработке системы распределенного имитационного моделирования, в предложенной методологии использования имитационного моделирования на этапах разработки и эксплуатации АСУ ТП транспортных систем.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- имитационный стенд АСУ ТП СМТ используется для разработки алгоритмов оптимального управления оборудованием СМТ и может быть использован при моделировании нештатных и чрезвычайных ситуаций;
- система распределенного имитационного моделирования *Мера* для МВС 1000/М может быть использована для моделирования систем, требующих для своего выполнения большого количества вычислительных ресурсов, систем, моделирование которых на традиционных вычислительных средствах ограничено вычислительными ресурсами.

Связь с государственными программами. Работы по тематике диссертации проводились в рамках следующих проектов, поддержанных РФФИ: 95-01-00900-а, 98-01-00720-а, 02-01-00688-а.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих Российских и международных конференциях:

- Пятый международный семинар “Распределенная обработка информации” (РОИ-95), Новосибирск, 1995;
- 15-th IMACS World Congress on Scientific Computation Modelling and Applied mathematics, Berlin, 1997;
- IASTED International Conference “Automation, Control, and Information Technology”, Novosibirsk, 2002;
- VIII International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, Moscow, 2002;
- Пятая международная конференция памяти академика А.П. Ершова “Перспективы систем информатики (PSI 03)”, Новосибирск, 2003.

- Международная научно-техническая конференция "Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике", Тюмень, 2003;
- The Second IASTED International Multi-Conference "Automation, Control, and Applications" Novosibirsk, 2005;
- Вторая Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД 2005), Санкт-Петербург, 2005;
- Вторая Всероссийской конференции с международным участием "Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы", Улан – Удэ, 2006.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 39 работ, в том числе 7 статей в рецензируемых изданиях, 17 публикаций в сборниках трудов международных конгрессов, симпозиумов, конференций, 5 публикаций в сборниках трудов Всероссийских конференций.

Личный вклад автора. Диссертационная работа обобщает многолетние работы автора в области имитационного моделирования.

В 1975 г. автором была разработана система имитационного моделирования Модель-6 для БЭСМ-6, являющаяся первой в СССР реализацией языка GPSS. Автор принимал участие в разработке систем реального времени и систем моделирования для МВК "Эльбрус", имеет работы по интеллектуальному имитационному моделированию и распределенному имитационному моделированию.

Результаты диссертации получены автором самостоятельно. Разработка системы распределенного имитационного моделирования выполнялась группой студентов и аспирантов под руководством автора. В АСУ ТП СМТ автором разработаны программная часть подсистемы управления и имитационный стенд.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации – 227 листов. Диссертация содержит 24 рисунков и таблиц, и список литературы, содержащий 215 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту доктору физико-математических наук, профессору М.И. Нечепуренко за поддержку и многолетнее сотрудничество, благодаря которому был получен ряд результатов диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, излагаются ее цели, указывается научная новизна полученных результатов, апробация работы, личный вклад автора и полученные результаты.

В главе 1 диссертации приводятся:

- сравнение распределенного имитационного моделирования с классическим последовательным имитационным моделированием (пп. 1.1 – 1.3.1);
- формальное описание распределенной имитационной модели и формальное описание проблем, возникающих при ее исполнении (п. 1.3.2);
- обзор методов синхронизации модельного времени в распределенном имитационном моделировании (пп. 1.3.3 – 1.4).

В главе 1 определена и исследована абстрактная распределенная модель, состоящая из N параллельных процессов:

$$DM = \bigcup_{k=1}^N lp^k,$$

$$lp^k = \{sm^k, T^k, S^k\},$$

$$S^k = \left\{ (Q_1^k, t_1^k), (Q_2^k, t_2^k), \dots, (Q_{m_k}^k, t_{m_k}^k) \mid t_1^k \leq t_2^k \leq \dots \leq t_{m_k}^k \right\}.$$

Здесь DM – распределенная модель, lp – процесс, sm – подмодель процесса, T – значение локальных часов модельного времени процесса, S – локальный список событий процесса, Q – событие в списке событий, t – модельное время наступления события Q (временная метка события Q).

Каждый процесс выполняется в собственном модельном времени как автономная последовательная модель. Процесс взаимодействует с другими процессами, передавая им сообщения. Асинхронное сообщение M_{ij} , передаваемое от

процесса lp^i процессу lp^j , в простейшем случае имеет следующую структуру:

$$M_{ij} = (Q^j, t^i).$$

Для распределенного моделирования критерий корректного исполнения имитационной модели сформулирован следующим образом: результат исполнения распределенной модели должен совпадать с результатом исполнения этой модели на однопроцессорном компьютере. Это означает, что для каждого параллельного процесса выполнение событий должно происходить в порядке не убывания их временных меток.

Нарушение этого порядка выполнения событий, названного автором "парадоксом времени", может произойти в случае получения процессом j от процесса i сообщения типа:

$$M_{ij} = (Q^j, t^i) | t^i < t^j.$$

Для борьбы с парадоксами времени в системе распределенного имитационного моделирования имеется специальная программа синхронизации модельного времени, реализующая алгоритм синхронизации модельного времени.

Алгоритмы синхронизации модельного времени делятся на два основных класса: консервативные и оптимистические.

Консервативные алгоритмы предотвращают возникновение парадоксов времени путем задержки процесса j . Оптимистические алгоритмы не задерживают процесс, но в

случае возникновения парадокса времени осуществляют "откат" процесса j до значения модельного времени $t_j = t_i$.

Глава 1 содержит результаты исследования проблем реализации распределенных имитационных моделей и является теоретическим обоснованием разработанных для системы распределенного имитационного моделирования *Мера* алгоритмов синхронизации модельного времени.

Основные результаты, изложенные в главе 1, опубликованы в [30].

В главе 2 диссертации приводятся:

- обоснования архитектуры системы распределенного имитационного моделирования *Мера*, обеспечивающей распределенное исполнение, переносимость, эффективность, расширяемость (пп. 2.1 – 2.2);
- обзор возможностей системы распределенного имитационного моделирования *Мера* на уровне ядра системы (п. 2.3);
- методы и алгоритмы, использованные при разработке системы распределенного имитационного моделирования *Мера* (пп. 2.4 – 2.6);
- примеры расширения ядра системы распределенного имитационного моделирования *Мера* с помощью библиотек общего пользования, специализированных библиотек, визуально-интерактивной оболочки и особенности реализаций членов семейства системы распределенного имитационного моделирования *Мера* (п. 2.7).

Основными качествами системы распределенного имитационного моделирования *Мера* являются: параллельное исполнение, переносимость, эффективность исполнения, расширяемость. Эти качества обеспечиваются за счет особенностей архитектуры программного комплекса системы *Мера*.

Программный комплекс системы *Мера* состоит из следующих слоев (рис.1):

- ядро;

- последовательная имитационная машина;
- распределенная имитационная машина;
- коммуникационная машина.



Рис 1. Структура системы распределенного имитационного моделирования *Мера*.

Каждый слой программного обеспечения системы распределенного имитационного моделирования *Мера* выполняет определенные функции. Каждый слой может послать команду вышестоящей по уровню иерархии машине. Формой посылки команды и получения ответа является вызов интерфейсной функции.

Основными функциями ядра являются: задание структуры модели, передача сообщений, задержка процессов, инициализация выполнения модели. Имеется возможность построения иерархической структуры модели и динамического изменения структуры модели во время выполнения.

Перечисленные выше функции определяют компактный, легко изучаемый программный пакет дискретного имитационного моделирования. Этот пакет для практического

использования расширен библиотеками общего пользования и библиотеками для специализированных приложений.

В системе *Мера* такими библиотеками общего пользования являются: генераторы случайных величин с заданным распределением вероятности, средства сбора и обработки статистической информации, средства работы с устройствами обслуживания по аналогии с языком GPSS и другие.

Примером специализированных приложений является визуально-интерактивная система моделирования транспортных систем, включающая дополнительные средства ввода-вывода и визуализации процесса и результатов моделирования.

Последовательная имитационная машина является системой поддержки последовательного исполнения (Run time system) модельных процессов в условном модельном времени. Такие функции ядра, как задержка процессов и выполнение модели, являются командами последовательной имитационной машины.

Последовательная имитационная машина выполняет функции классической квазипараллельной системы имитационного моделирования: продвижение локального модельного времени, задержка процессов на определенное модельное время или до выполнения некоторого условия, активизация процессов и другие.

Для исполнения модели на однопроцессорном компьютере требуется конфигурация системы *Мера* в составе ядра и последовательной имитационной машины. Для исполнения модели на многопроцессорной вычислительной системе требуется подключение дополнительных слоев программного комплекса системы *Мера*.

При многопроцессорном исполнении для продвижения модельного времени последовательная имитационная машина посылает команду распределенной имитационной машине.

Распределенная имитационная машина является системой поддержки исполнения модельных процессов в едином модельном времени, выполняемых на различных процессорах многопроцессорной или распределенной вычислительной системы.

В распределенной имитационной машине реализованы базовые классы для двух основных типов алгоритмов синхронизации модельного времени в распределенном имитационном моделировании — консервативного и оптимистического.

Основными функциями распределенной имитационной машины являются: запуск распределенной модели, синхронизация модельного времени, исключая или нейтрализующая парадоксы времени, останов распределенной модели, взаимодействие с коммуникационной машиной для физического обмена сообщениями между параллельно исполняемыми модельными процессами.

В 2000 г был принят международный стандарт IEEE 1516, более известный как HLA (High Level Architecture), целью которого является обеспечение переносимости (переиспользования) моделей, разработанных в рамках различных систем распределенного имитационного моделирования.

Система команд (интерфейс) распределенной имитационной машины совпадает с интерфейсом HLA в части сервисов управления временем (Time management services), которые синхронизируют продвижение локального модельного времени федератов при исполнении федерации.

При наличии библиотеки HLA выполнение большей части функций распределенной имитационной машины может заменить инфраструктура RTI (Runtime Infrastructure) HLA, что делает систему распределенного имитационного моделирования *Мера* более надежной и переносимой, а модели, разработанные с ее помощью, способными к переиспользованию и взаимодействию с моделями, разработанными в рамках других систем имитационного моделирования, соответствующих стандарту HLA.

Коммуникационная машина обеспечивает обмен сообщениями, как пользовательскими, так и служебными, между параллельно исполняющимися модельными процессами.

Передача сообщений в коммуникационной машине реализована на основе протокола посылки сообщений MPI (Message passing interface).

Использование MPI позволяет переносить систему распределенного имитационного моделирования *Мера* на другие вычислительные платформы, где имеется реализация MPI.

При многопроцессорном исполнении на каждом процессоре запускаются: система (подмодель), являющаяся структурной частью модели, распределенной на этот процессор, а также экземпляры последовательной имитационной, распределенной имитационной и коммуникационной машин. Межпроцессорная связь осуществляется с помощью MPI.

Использование MPI не является ограничением для переносимости системы *Мера*. MPI — это библиотека функций, обеспечивающая взаимодействие параллельных процессов с помощью механизма передачи сообщений. Это достаточно объемная и сложная библиотека, состоящая более чем из 125 функций. В системе *Мера* используются 15 общеупотребительных функций MPI.

Таким образом, для переносимости системы *Мера* может быть использована любая библиотека передачи сообщений, которая реализует эти 15 функций и имеет интерфейс, совпадающий с библиотекой MPI.

Семейство системы *Мера*. Особенностью системы распределенного имитационного моделирования *Мера* является наличие семейства совместимых по входному языку реализаций для различных операционных систем. Семейство системы распределенного имитационного моделирования *Мера* представлено на рис. 2.

Однопроцессорная реализация системы *Мера* под *Windows* на C++ представляет собой пакет дискретного имитационного моделирования в объеме ядра системы, расширенного общими библиотеками.

Для определенного класса моделей для автоматизации программирования типовых модельных конструкций был разработан специализированный пакет имитационного моделирования технологических процессов. Входным языком этого пакета является специализированный язык спецификаций.

Язык спецификаций использовался при моделировании технологических процессов в цехе химической очистки воды

при разработке АСУ ТП ХВО (Химводоочистки) Сургутской ГРЭС-1 [13, 14].

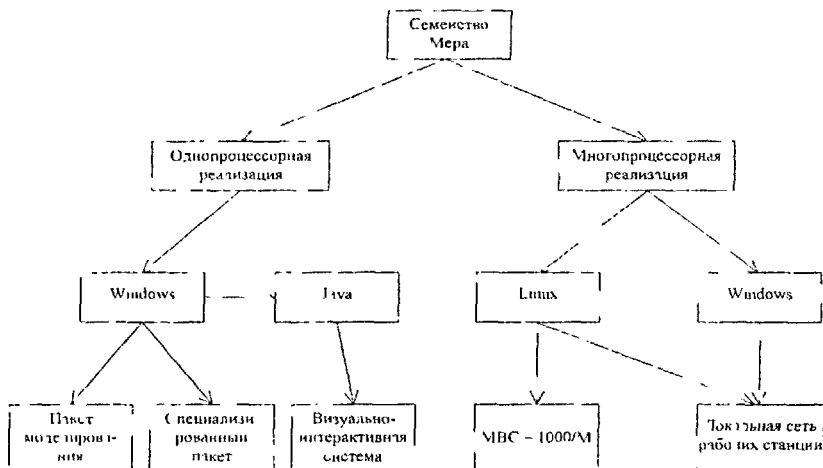


Рис. 2. Семейство реализаций системы распределенного имитационного моделирования *Мера*

На базе ядра системы *Мера* в среде Java разработана специализированная визуально-интерактивная система моделирования транспортных систем *Logistics Applet (LA)* [31].

Система *LA* обеспечивает следующие возможности: создание, исполнение и сохранение моделей, загрузку рисунка как пиктограммы транспортного средства, ускорение/замедление эффектов анимации, прокрутку изображения для просмотра различных частей модели, в том числе во время исполнения модели, сохранение моделей в формате xml и др.

В системе распределенного имитационного моделирования *Мера* для МВС 1000/М используется программный пакет MPI MPICH2 версии 1.0.1, поддерживающий режим работы *MPI_THREAD_MULTIPLE*.

Система *Мера* на МВС-1000/М была отгестирована на комплексе моделей передачи сообщений между отправителем и получателем и распределенной модели сети массового обслуживания.

Архитектура МВС-1000/128 Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ) и состав базового программного обеспечения функционально идентичны МВС-1000/М Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (МСЦ РАН, г. Москва). Это позволяет пользователю отладить распределенные модели на МВС-1000/М в ССКЦ и перенести их в случае недостатка вычислительных модулей на более производительную МВС-1000/М МСЦ РАН.

Основные результаты, изложенные в главе 2, опубликованы в [7, 8, 10–12, 13–15, 20, 22–24, 27, 31, 33, 34].

В главе 3 диссертации приводятся:

- постановка задач моделирования АСУ ТП (пп. 3.1, 3.2);
- определение структуры и функций типового имитационного стенда АСУ ТП, интегрированного с АСУ ТП, обоснование технологии использования имитационного стенда на всех этапах разработки и сопровождения АСУ ТП (п. 3.3);
- выбор структуры и функций имитационного стенда АСУ ТП Северомуйского тоннеля (СМТ) (пп. 3.4 – 3.7.2);
- математические модели параметров микроклимата СМТ (п. 3.7.3);
- практическая проверка технологии использования имитационного стенда на всех этапах разработки и сопровождения АСУ ТП на примере имитационного стенда АСУ ТП СМТ (пп. 3.7.4 – 3.8).

Разработка АСУ ТП является в настоящее время одной из наиболее трудоемких и наукоемких задач. АСУ ТП — это сложная, разнородная, иерархическая, распределенная программно-аппаратная система управления, работающая в реальном масштабе времени и включающая человека в контур управления.

Центральной частью АСУ ТП является подсистема управления, обеспечивающая выполнение основной функции АСУ ТП — управление технологическими процессами.

Сложностью подсистемы управления является:

- невозможность комплексной отладки и тестирования подсистемы управления в полном объеме на инструментальных средствах разработчика — отладочном стенде, ввиду невозможности подключения реального оборудования, управляемого АСУ ТП;
- невозможность комплексной отладки и тестирования системы в полном объеме на реальном объекте, ввиду нецелесообразности или небезопасности искусственного создания всевозможных (в том числе и нештатных) ситуаций.

Вместе с тем, отказ или неправильное функционирование подсистемы управления может принести значительный экономический, экологический или моральный ущерб. Наиболее подходящим методом решения этой проблемы является имитационное моделирование, а инструментом решения — имитационный стенд, включающий комплекс имитационных моделей, интегрированных с АСУ ТП. Под интегрированностью понимается использование в моделях интерфейсов других подсистем АСУ ТП и исполнение моделей как составных частей АСУ ТП.

В минимальном объеме имитационный стенд содержит набор основных подсистем АСУ ТП, обеспечивающих исполнение подсистемы управления, подсистему управления АСУ ТП, комплекс имитационных моделей.

Имитационный стенд может быть реализован как на одном компьютере, так и на локальной сети компьютеров, входящих в АСУ ТП. В случае локальной сети имитационные модели могут исполняться либо на специально выделенном для имитации компьютере, либо на одной из рабочих станций АСУ ТП, либо на нескольких станциях, если система моделирования поддерживает распределенное исполнение имитационных моделей.

В зависимости от состава и связей имитационных моделей имитационный стенд используется на различных этапах

разработки и сопровождения АСУ ТП и выполняет следующие функции:

- инструментальной среды для разработки, отладки и тестирования программ управления и подсистем АСУ ТП;
- тренажера для обучения управляющего персонала АСУ ТП;
- подсистемы АСУ ТП, включенной в оперативный контур, для предварительного просчета результатов действий диспетчера,
- интеллектуального "эксперта" для получения знаний по эксплуатации технологического объекта управления;
- средства презентации.

В диссертации приводятся обоснования состава и структуры типового имитационного стенда, обеспечивающего выполнение перечисленных функций. Эти положения были использованы и практически проверены при разработке АСУ ТП Северомуйского тоннеля (АСУ ТП СМТ).

Северомуйский железнодорожный тоннель (Байкало-Амурской магистраль) имеет длину 15,3 км и находится в эксплуатации с декабря 2003 года. Это самый длинный железнодорожный тоннель в России и входит в первую десятку самых длинных железнодорожных тоннелей в мире.

Особенностями эксплуатации СМТ являются следующие неагивные факторы:

- воздействие сурового климата, приравненного по степени суровости к субарктическому;
- вечная мерзлота;
- высокая сейсмичность — до 10 баллов по 12-балльной шкале,
- выход термальных вод с температурой 60–70 °С;
- выделение радона.

Для поддержания параметров микроклимата в тоннеле в допустимых пределах на порталах и свколах тоннеля установлено около 200 единиц тепловентиляционного, запорного, осветительного и другого технологического оборудования.

Для управления технологическими процессами в СМТ в КТИ ВТ СО РАН разработана АСУ ТП СМТ, обрабатывающая более 2500 входных и выходных сигналов.

Контроль и управление технологическим оборудованием СМТ осуществляет разработанная автором подсистема управления АСУ ТП СМТ, которая выполняет команды диспетчера и программы автоматического управления.

Программы автоматического управления разрабатываются с помощью разработанной под руководством автора визуально-интерактивной системы — Конструктора программ управления. Конструктор программ управления представляет собой систему технологического программирования, ориентированную на специалистов технологов.

На основании исследований, выполненных в ходе разработки структуры и функций типового имитационного стенда, и для практической проверки полученных результатов разработан имитационный стенд для АСУ ТП СМТ.

Имитационный стенд АСУ ТП СМТ включает в себя следующие модели: модель оборудования СМТ, модель внешней среды, модель движения железнодорожных составов, модель микроклимата тоннеля.

Модель оборудования СМТ состоит из множества моделей объектов оборудования, имитирующих работу реальных объектов оборудования.

В модели внешней среды имитируются значения параметров атмосферного воздуха: температуры и давления в точках выхода подземных коммуникаций тоннеля на поверхность. Значения параметров наружного воздуха на порталах тоннеля задаются таблично на основе средних значений, наблюдаемых за многолетний период.

В модели движения железнодорожных составов имитируется движение железнодорожного состава с соблюдением масштаба времени через тоннель (открытие/закрытие порталных ворот, положение железнодорожного состава на блок-участках тоннеля, состояние проходных и заградительных светофоров). Этот процесс визуализируется на мнемосхеме тоннеля в виде анимационного фильма.

Движение железнодорожных составов через тоннель имитируется по реальному расписанию или осуществляется циклически со средним значением интервалов движения железнодорожных составов в обоих направлениях, вычисленным по реальному расписанию.

Модель микроклимата тоннеля является самой сложной. Под микроклиматом понимается температура, давление и скорость движения воздуха в тоннеле. Особенностью СМТ является сложная топология вентиляционной сети. Для практического расчета распределения потоков воздуха Северомуйский тоннель представлен в виде ориентированного графа, имеющего m вершин и n дуг ($m = 33$, $n = 47$).

Расчет установившегося распределения потоков воздуха для вентиляционной сети СМТ выполняется с помощью итерационного решения известной системы алгебраических уравнений, составленных на основе первого и второго законов сетей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in V_\gamma} Q_i = 0, \quad \gamma = 1, \dots, m - 1 \\ \sum_{i \in M_\mu} h_i = H, \quad \mu = 1, \dots, n - m + 1 \end{array} \right.$$

Здесь V_γ — множество дуг, входящих в вершину γ , M_μ — множество дуг, входящих в независимый замкнутый контур μ

Для каждой дуги вентиляционной сети $1 \leq i \leq n$

$$h_i = R_1 \times Q_i^2 + R_2 \times Q_i,$$

где Q_i — поток воздуха, h_i — депрессия (перепад давлений), R_1 и R_2 — квадратичное и линейное сопротивления i ой дуги.

Для каждого вершины γ вентиляционной сети алгебраическая сумма величин потоков, входящих (выходящих)

в вершину (из вершины) равна 0. Для каждого независимого замкнутого контура μ алгебраическая сумма величин депрессий дуг, входящих в контур, равна 0, если в контуре нет источника тяги, или равна тяге H , развиваемой этим источником. После расчета потоков воздуха по дугам выполняется расчет температур в вершинах.

Модель установившегося состояния параметров микроклимата имеет следующие недостатки. Она упрощенно учитывает влияние давления и температуры на плотность воздуха. Поле температур при этом определяется на основе предварительно рассчитанных гидравлических параметров потока как отдельная задача.

Для устранения этих недостатков была разработана более точная математическая модель, в которой поля давлений, скоростей потоков воздуха и температур рассчитываются одновременно как взаимосвязанные параметры потока.

В качестве основных параметров потока воздуха для каждой дуги принимаются следующие параметры:

$P = P(x, t)$ — давление;

$T = T(x, t)$ — абсолютная температура;

$V = V(x, t)$ — средняя по сечению скорость.

Здесь x — координата вдоль направления дуги тоннеля, t — время.

Для каждой дуги эти величины определяются как решения следующей системы обобщенных уравнений гидравлического удара для идеального газа:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\gamma R Q_w}{\omega c_p}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{f_w}{\rho \omega} - g \frac{\partial z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{a^2}{c_p} \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\gamma Q_w}{\rho \omega c_p}$$

Здесь ρ — плотность воздуха, γ — показатель адиабаты, $a = \sqrt{\gamma RT}$, ω — площадь поперечного сечения ветви тоннеля, $Q_{\text{н}}$ — удельный тепловой приток извне на единицу длины дуги тоннеля, f_w — удельная сила сопротивления трения на единицу длины дуги тоннеля.

Величина $f_{\text{н}}$ вычисляется по формуле:

$$f_{\text{н}} = \lambda \frac{\rho |V| V}{8} \chi + \lambda_n \frac{\rho |V_{\text{н}} - V| \cdot (V_{\text{н}} - V)}{8} \chi_n,$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, λ_n — коэффициент гидравлического трения воздуха о стенки поезда, χ — периметр поперечного сечения тоннеля, χ_n — периметр поперечного сечения поезда, V_n — скорость поезда.

Полное описание математической модели, граничные условия и начальные значения параметров потоков воздуха приведены в [29].

Общая схема имитационного стенда АСУ ТП СМТ представлена на рис. 3. На различных этапах разработки АСУ ТП СМТ использовались различные конфигурации взаимодействия моделей и компонентов программного обеспечения АСУ ТП СМТ в рамках имитационного стенда АСУ ТП СМТ.

На этапе разработки, отладки и тестирования программ автоматического управления отсутствует связь подсистемы управления с реальным оборудованием СМТ.

На этапе опытной эксплуатации АСУ ТП СМТ отсутствует связь подсистемы управления с моделью микроклимата. АСУ ТП СМТ может работать на неполной конфигурации реального оборудования. В этом случае временно отсутствующее оборудование заменяет модель оборудования.

В дальнейшем развитии АСУ ТП СМТ предполагается включение модели микроклимата в оперативный контур управления АСУ ТП СМТ.

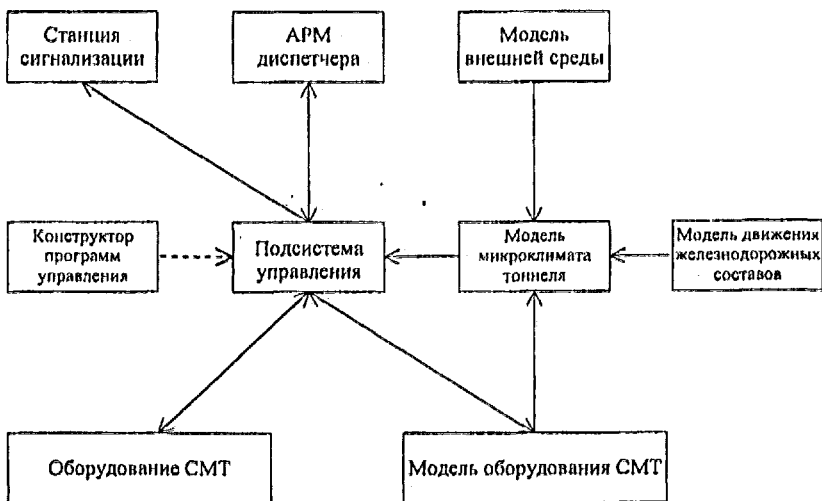


Рис. 3. Общая схема имитационного стенда.

В оперативном контуре управления АСУ ТП СМТ модель микроклимата тоннеля получает входные данные не от сопутствующих моделей (модель оборудования СМТ, модель внешней среды, модель движения железнодорожных составов), а непосредственно с датчиков АСУ ТП СМТ. На основании этих данных модель микроклимата рассчитывает "будущие" значения параметров микроклимата в тоннеле. Модель будет использована для прогнозирования состояния микроклимата СМТ и выдачи рекомендаций диспетчеру.

Основная задача АСУ ТП СМТ — поддержание параметров микроклимата внутри Северомуйского тоннеля в заданных пределах. При решении этой задачи возникает проблема оптимального использования тепловентиляционного оборудования. Целевой функцией для решения этой

оптимизационной задачи является расход электроэнергии при выполнении необходимых технологических и экологических условий внутри тоннеля.

В связи с этим основная задача имитационного стенда АСУ ТП СМТ заключалась в проверке и настройке различных программ автоматического управления, обеспечивающего эти условия. Полученные результаты были использованы при включении программ автоматического управления в состав АСУ ТП СМТ.

Комплекс моделей, входящих в имитационный стенд АСУ ТП СМТ, реализован с помощью системы имитационного моделирования *Мера*.

Система *Мера* предоставляет возможность моделирования в реальном масштабе времени. Масштаб задается в качестве параметра имитационного стенда.

В системе *Мера* имеется возможность задавать разные масштабы для разных периодов модельного времени. Например, для удобства визуализации происходит "замедление" моделирования при прохождении железнодорожного состава через тоннель и "ускорение" моделирования в интервалах между движениями железнодорожных составов.

Использование имитационного стенда на всех этапах проектирования, разработки, отладки и внедрения подсистемы управления и программ автоматического управления АСУ ТП СМТ в значительной степени способствовало успешному завершению разработки АСУ ТП СМТ. С 2005 г. АСУ ТП СМТ находится в опытной эксплуатации.

Основные результаты, изложенные в главе 3, опубликованы в [17–19, 21, 25–26, 28–29, 32].

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Основные результаты диссертации

- Предложены архитектура программного обеспечения, входной язык, алгоритмы синхронизации переносимой и расширяемой системы распределенного имитационного моделирования.
- Создана система распределенного имитационного моделирования *Мера* для многопроцессорной вычислительной системы МВС 1000/128. С использованием свойств переносимости и расширяемости создано семейство реализаций системы *Мера* для различных операционных систем.
- Предложены и обоснованы состав и функции имитационного стенда, методология использования имитационного стенда на всех этапах разработки и эксплуатации АСУ ТП.
- Создан имитационный стенд АСУ ТП Северомуйского тоннеля (АСУ ТП СМТ). Предложена математическая модель микроклимата СМТ. Получены имитационные модели в составе имитационного стенда. Практически проверено использование имитационного стенда на всех этапах разработки АСУ ТП СМТ. С использованием имитационного стенда выполнены отладка и тестирование подсистемы управления и программ автоматического управления АСУ ТП СМТ.

Список основных работ автора по теме диссертации

1. Окольнишников В.В. Система моделирования Модель-6 // Имитационное моделирование систем (СМ-3). — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1975. — С. 74–88.
2. Окольнишников В.В. Имитационное моделирование шахты как сети массового обслуживания // Системное моделирование-4. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976. — С. 91–104.

3. Катков В.Л., Окольнішников В.В., Резниченко Л.Л., Фишелев В.И. Имитационное моделирование систем машинной графики. — М.: ИТМ и ВТ АН СССР, 1977. — 70 с.
4. Ахламов А.Г., Бекетова Е.А., Окольнішников В.В. Программное обеспечение имитационного моделирования на ПЭВМ // Системное моделирование —17. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1991. — С. 3–33.
5. Окольнішников В.В. Черты реального времени в системе программирования АЛГОЛ-ЭЛЬБРУС // Управляющие системы и машины — Киев, 1991. — № 3. — С. 41–48.
6. Окольнішников В.В. Введение в языки реального времени. — Новосибирск: НГУ, 1993. — 63 с.
7. Окольнішников В.В. Предложения по разработке специализированной системы моделирования АСУ ТП топливно - энергетических устройств и систем // Системное моделирование—20. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1994. — С. 125–138.
8. Окольнішников В.В., Якимович Д.А. Входной язык специализированной системы моделирования АСУ ТП топливно-энергетических устройств и систем // Системное моделирование—20. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1994. — С. 139–151.
9. Окольнішников В.В., Ротова А.В. Базовые концепции входного языка интеллектуальной системы моделирования // Системное моделирование—20. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1994. — С. 59–74.
10. Окольнішников В.В., Ротова А.В. Направления развития средств имитационного моделирования // Системное моделирование—20. — Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1994. — С. 3–20
11. Нечепуренко М.И., Окольнішников В.В., Якимович Д.А. Имитационное моделирование систем управления в энергетике // Тр. Пятого междунар. семинара “Распределенная обработка информации” (РОИ-95). — Новосибирск, 1995 — С 221–226.

12. Okol'nishnikov V.V., D.A. Iakimovitch. Visual Interactive Industrial Simulation Environment // Proc. of the 15-th IMACS World Congress on Scientific Computation Modelling and Applied mathematics (Berlin, August 1997). — V. 3. Systems Engineering. — P. 391–395.
13. Zolotuchin Y.P., Okol'nishnikov V.V. Simulation of Control System for Water Treatment // Proc. of the Third International Congress of the Federation of European Simulation Societies. — Helsinki, 1998. — V. 3. — P. 526–529.
14. Золотухин Е.П., Окольников В.В. Моделирование системы химической очистки воды // Труды Шестого Международного семинара "Распределенная обработка информации". — Новосибирск, 1998. — С. 249–252.
15. Окольников В.В. Система моделирования распределенных систем реального времени // Системное моделирование: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ИВМиМГ. Т. 4 (22). — Новосибирск, 1998. — С. 129–140.
16. Окольников В.В., Рудометов С.В. Моделирование систем управления распределенных систем реального времени // Системное моделирование: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ИВМиМГ. Т. 4(22). — Новосибирск, 1998. — С. 141–150.
17. Окольников В.В. Информационно-функциональная модель АСУ ТП // Системное моделирование: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ИВМиМГ. Т. 5 (23). — Новосибирск, 1998. — С. 123–139.
18. Зензин А.С., Окольников В.В., Рудометов С.В. Интегрированная с АСУ ТП система распределенного моделирования // Труды Шестого Международного семинара "Распределенная обработка информации". — Новосибирск, 1998. — С. 511–514.
19. Okol'nishnikov V.V., Rudometov S.W. Distributed simulation system integrated into control system. // Proc. of 13th Europ. Simulation Multiconference. — Warsaw, 1999. — V. 2. — P. 510–512.
20. Нечепуренко М.И., Окольников В.В., Рудометов С.В. Разработка библиотеки параллельного имитационного моделирования с использованием MPI // Труды

- Всероссийской научной конференции "Высокопроизводительные вычисления и их приложения". — М.: Изд-во Московского университета, 2001. — С. 144–147.
21. Okol'nishnikov V.V. Development of Control Programs for Process Control System of North-Muisk Railway Tunnel // Proc. of the IASTED International Conference "Automation, Control, and Information Technology". — Novosibirsk, Russia, 2002 — P. 49–52.
 22. Okol'nishnikov V.V. Parallel Simulation System // Proc. of VIII International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research.. — Moscow, 2002.
 23. Окольнишников В.В. Система распределенного имитационного моделирования // Методы и средства обработки информации. — М.: МГУ им. М.В Ломоносова, 2003 — С. 468–473.
 24. Okol'nishnikov V.V. Simulation on parallel and distributed systems // Пятая международная конференция памяти академика А.П. Ершова "Перспективы систем информатики (PSI 03)". Рабочий семинар "Научное программное обеспечение". Доклады и тезисы. — Новосибирск, 2003. — С. 30–32.
 25. Окольнишников В.В. Использование имитационного моделирования при разработке АСУ ТП // Сборник докладов Первой всероссийской научно-практической конференции "Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках" (ИММОД 2003). — Санкт-Петербург, 2003. — Т. 2. — С. 178–180.
 26. Окольнишников В.В. Моделирование естественных и технологических процессов АСУ ТП Северо-Муйского тоннеля // Международная научно-техническая конференция "Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике". Материалы конференции. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. — С. 109–111.
 27. Victor Okol'nishnikov, Sergey Rudometov. Development of distributed simulation system // Lecture Notes Comput. Sci. — Berlin Springer, 2003. — V. 2763. — P 524–527.

28. Окольнишников В.В. Использование имитационного моделирования при разработке Автоматизированной системы управления технологическими процессами Северомуйского тоннеля // Вычисл. технологии. — 2004. — Т. 9, № 5. — С. 82–101.
29. Тарасевич В.В., Мороз А.А., Окольнишников В.В. Математическая модель управления вентиляционным режимом Северо-Муйского тоннеля // Труды VI Международной конференции "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". — Самара, 2004. — С. 397–402.
30. Окольнишников В.В. Представление времени в имитационном моделировании // Вычисл. технологии. — 2005. — Т. 10, № 5. — С. 57–80.
31. Okol'nishnikov V.V., Rudometov S.V. Simulation of Complex Transportation Systems // Proc. of the Second IASTED International Multi-Conference Software Engineering (ACIT-SE). — Novosibirsk, 2005. — P. 60–64.
32. Chernakov D.V., Okol'nishnikov V.V. Control Program Development System // Proc. of the Second IASTED International Multi-Conference Automation, Control, and Application (ACIT-ACA). — Novosibirsk, 2005. — P. 142–145.
33. Окольнишников В.В. Разработка системы распределенного имитационного моделирования для различных операционных сред // Сборник докладов Второй Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД 2005). — Санкт-Петербург, 2005. — Т. 1. — С. 256–260.

Околынишников Виктор Васильевич

Разработка средств
распределенного имитационного моделирования
для многопроцессорных вычислительных систем

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Издание подготовлено с использованием Microsoft Word

Подписано в печать 28.06.06. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,75. Уч.-изд. л. 1,75 Тираж 70. Заказ № 92

Отпечатано в ООО «Омега Принт»
630090 Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6

