

АБДУЛИН ЕВГЕНИЙ РУДОЛЬФОВИЧ

**МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
И ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
МУЛЬТИМЕДИЙНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Специальность:

**05.13.11 "Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей"**

**Москва
2011**

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институт проблем информатики РАН

Научный руководитель — доктор технических наук
Будзко Владимир Игоревич

Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук
Синицин Владимир Игоревич
кандидат технических наук
Басок Борис Моисеевич

Ведущая организация — Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления им. В.А.
Трапезникова РАН

Защита диссертации состоится «30» ноября 2011 г.
в 16 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д002.073.01 при
Учреждении Российской академии наук Институт проблем информатики РАН
по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской
академии наук Институт проблем информатики РАН.

Автореферат разослан «» 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.073.01
доктор технических наук, профессор Гринченко С.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сфера применения многофункциональных мультимедийных комплексов (ММК) постоянно расширяется. Сегодня она охватывает широкий спектр приложений, включая учебные аудитории, конференц-залы, комплексные системы мониторинга, ситуационные центры и центры управления и т.д. Развитие ММК характеризуется возрастанием сложности их архитектуры. В крупных приложениях управление ММК требует значительного количества обслуживающего персонала, в связи с этим для автоматизации управления ММК применяются интегрированные системы управления (ИСУ). Отказы в работе ИСУ нарушают работу всего ММК: делают недоступными его сервисы, в частности, своевременную выдачу пользователям аудио и видеинформации. Это может привести к принятию пользователями неверных решений и нарушениям в функционировании удаленных управляемых объектов. Причинами отказов могут быть человеческий фактор и ошибки в программном обеспечении (ПО) ИСУ. Человеческий фактор может сыграть отрицательную роль в человеко-машинном взаимодействии операторов ИСУ с системой, особенно в случае плохо построенного человеко-машинного (пользовательского) интерфейса ПО ИСУ ММК. ПО ИСУ ММК и его пользовательский интерфейс во многом определяют функциональные возможности, производительность и надежность ММК в целом.

При этом актуальной является задача минимизации совокупной стоимости владения ММК с ИСУ при достижении требуемых параметров функционирования ММК.

Исследованию вопросов, связанных с проектированием эффективного ПО, анализу его надежности и отказоустойчивости, а также с проектированием и реализацией человека-машинного взаимодействия с использованием различных интерфейсных средств (клавиатура, “мышь” и др.), в различные годы были посвящены труды таких ученых, как В.М. Глушков, В.П. Иванников, С.А. Орлов, У. Ройс, Б. Боэм, Х. Фам, М. Фаулер, К. Бек (проектирование ПО); В.В. Липаев, Г. Майерс, Б. Бейзер (надежность ПО); А.П. Ершов, С.В. Емельянов, В.П. Зинченко, В.И. Медведев, А.Б. Леонова, С. Кард, А. Ньювелл, Д. Раскин, Д. Кирас, Б. Джон, Д. Андерсон (человеко-машинное взаимодействие).

Однако, вопросы проектирования ПО и человека-машинного взаимодействия для ИСУ ММК с учетом использования в данных системах в качестве интерфейсных средств среднеформатных сенсорных панелей, исследованы недостаточно.

В связи с этим можно сформулировать *актуальную научно-техническую задачу* повышения эффективности проектирования ПО и человеко-машинного взаимодействия ИСУ ММК с пользовательским интерфейсом на среднеформатных сенсорных панелях с целью обеспечения снижения затрат на разработку и функционирование ИСУ ММК, что приводит к снижению совокупной стоимости владения системой в целом.

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы разработать методику проектирования программного обеспечения и человека-машинного взаимодействия ИСУ ММК, позволяющую решить поставленную научно-техническую задачу.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка технологического подхода к проектированию ПО ИСУ ММК;
2. Разработка метода построения программного кода, обеспечивающего надежную работу ИСУ ММК;
3. Анализ подходов к проектированию пользовательского интерфейса, с целью разработки метода, позволяющего сократить количество обслуживающего персонала ИСУ ММК и время выполнения задач пользователем;
4. Анализ и разработка формальных критериев качества пользовательского интерфейса на среднеформатных сенсорных панелях;
5. Экспериментальная проверка точности моделирования интерфейса формальными методами и сравнения различных подходов к проектированию интерфейса;
6. Разработка методики применения данных подходов и методов при проектировании ПО ИСУ ММК.

Данные задачи были решены в ходе работы.

Объектом исследования являются интегрированные системы управления многофункциональными мультимедийными комплексами.

Предметом исследования является: 1) технологический подход к проектированию программного обеспечения таких систем; 2) мультипрограммный режим работы ПО ИСУ ММК и проблема возникновения “тупиков” на уровне прикладного ПО; 3) человеко-машинный интерфейс ИСУ ММК.

Содержание диссертационного исследования соответствует специальности 05.13.11 "Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей" (пункты 1, 3, 6, 7, 10 паспорта специальностей ВАК).

Методическая база исследования построена на достижениях отечественных и зарубежных ученых в области проектирования ПО и человеко-машинного взаимодействия, а также методах структурного программирования, семантического анализа и других научных дисциплинах.

При анализе разработанных методов и алгоритмов использовались следующие методы моделирования: инженерные модели интерфейсов Keystroke-Level Model (KLM), методы построения сетевых графиков с выделенным критическим путем, модели прогнозирования надежности ПО Джелински-Моранды и Миллса.

В качестве **информационной базы исследования** использовались: материалы специальных периодических изданий, нормативная документация (ГОСТы, стандарты международных организаций), открытые ресурсы сети Интернет.

Новизна работы состоит в том, что:

- разработана методика проектирования ПО и человеко-машинного взаимодействия ИСУ ММК;
- разработан метод предотвращения "тупиков" на уровне прикладного ПО ИСУ ММК с помощью языковых средств разработки ПО ИСУ ММК;
- проведена формализация пользовательского интерфейса ИСУ ММК и на её основе предложены критерии качества пользовательских интерфейсов на среднеформатных сенсорных панелях;
- применен сигнатурный анализ в целях выявления ошибок в гипотезах о расстановке ментальных операторов в модели KLM;
- в целях синтеза адекватных моделей KLM разработан алгоритм построения сетевых графиков с выделенным критическим путем на основе результатов моделирования (визуализации) с помощью когнитивной архитектуры ACT-R (Adaptive Control of Thought—Rational).

Достоверность полученных результатов подтверждается теоретической обоснованностью применяемых к исследованию научных методов, практическим применением разработанной методики для задач проектирования и внедрения ПО ИСУ ММК и их пользовательских

интерфейсов а также экспериментальной проверкой характеристик ПО ИСУ ММК, разработанного в соответствии с предложенной в работе методикой.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в том, что разработанная методика проектирования ПО и человеко-машинного взаимодействия ИСУ ММК повышает эффективность разработки и функционирования различных ММК в учебных аудиториях, конференц-залах, комплексных системах мониторинга, ситуационных центрах и центрах управления.

Разработанная методика позволяет также сократить совокупную стоимость владения ММК с ИСУ за счет повышения надежности их ПО, производительности труда обслуживающего персонала и сокращения его численности. Снижается необходимое время обучения для работы с системой и вероятность ошибки пользователя. Общие методические рекомендации по разработке ПО ИСУ ММК позволяют унифицировать процессы проектирования, моделирования, реализации и внедрения ПО ИСУ, в состав которого входит интерфейсы на сенсорных панелях. Такая унификация обеспечивает разработку ПО ИСУ ММК с заданным уровнем качества и снижает материальные затраты на создание и внедрение ИСУ в интересах различных заказчиков.

Реализация результатов исследования. Методика проектирования программного обеспечения и человеко-машинного взаимодействия для интегрированных систем управления многофункциональными мультимедийными комплексами была реализована при разработке и внедрении более 30 проектов в интересах Национального Банка Республики Татарстан, Главных управлений Банка России по Астраханской, Брянской, Ульяновской, Воронежской областям, и других Территориальных учреждений Банка России.

Реализация подтверждается четырьмя Актами о внедрении результатов исследований. В дальнейшем полученные результаты планируется использовать при создании новых систем управления и мониторинга в реальном времени, а также расширении функциональных возможностей и масштабировании уже созданных систем.

Апробация. Основные положения диссертационной работы доложены на пяти научных конференциях, посвященных информационным технологиям и человеко-машинному взаимодействию:

- международная конференция “Human Factors in Computing Systems”, CHI 2011, ACM SIGCHI, Ванкувер, Канада;

- международная конференция “Новые информационные технологии и менеджмент качества”, NIT&QM’2010, Белек, Турция;
- научно-техническая конференция “Ситуационные центры и информационно-аналитические технологии поддержки принятия решений-2010”, Москва, Россия;
- 59-я и 60-я Научно-Технические конференции Московского Института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета) Москва, Россия.

Отдельные результаты планируется использовать в учебном процессе в технических вузах при преподавании курсов “Человеко-машинное взаимодействие” и “Тестирование программного обеспечения” и сопряженных с ними дисциплин.

На защиту выносятся следующие полученные автором **научные результаты**:

1. Технологический подход к проектированию программного обеспечения интегрированных систем управления многофункциональными мультимедийными комплексами, ориентированный на повышение надежности функционирования ПО ИСУ ММК и реализацию эффективного пользовательского интерфейса;
2. Метод построения программного кода интегрированных систем управления многофункциональными мультимедийными комплексами, предотвращающий возникновение “тупиков” на уровне прикладного программного обеспечения;
3. Средства формализации основных понятий человека-машинного (пользовательского) интерфейса и допустимых над ними математических действий;
4. Метод построения адекватных моделей KLM с корректирующей обратной связью.

Публикации. Основные положения диссертационного исследования отражены в 8 публикациях общим объемом 4,6 печатных листа, из них 4,5 авторских (в изданиях, рекомендованных ВАК – 3 публикации, общим объемом 3 печатных листа, из них 3 авторских).

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, 16 таблиц, 24 рисунков, заключения, четырех приложений,

списка литературы, включающего 108 наименований. Объем основного текста работы – 144 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, сформулирована научно-техническая задача исследования, указана степень разработанности проблемы, обозначены цель работы, объект, предмет и область исследования, перечислены составляющие его методической и информационной базы, приведены основные задачи исследования. Обоснованы научная новизна, достоверность результатов исследования, приведена практическая ценность работы, сведения о реализации результатов исследования.

В **первой главе** – «**Методические вопросы построения управляющих систем и их программного обеспечения**» – проводится анализ существующих методов, составляющих теоретическую и практическую базу проектирования ПО, обозначаются основные проблемы их применения при разработке ПО ИСУ ММК. Формулируется также описательная и формализованная постановка задачи.

Рассматривается архитектура изучаемых систем – ИСУ ММК, а также особенности их интерфейсных средств, в качестве которых применяются среднеформатные (диагональ от 7 до 17 дюймов) сенсорные панели. Приводятся результаты исследований рынка устройств, использующих такие интерфейсные средства – данный сегмент рынка демонстрирует бурный рост, темпы которого, согласно прогнозам, будут увеличиваться. Производится обзор методического обеспечения организации процесса разработки ПО.

Проанализированы три основных технологических подхода к проектированию ПО (водопадный, инкрементный, эволюционный), рассмотрены типовые требования к ПО, критерии, показатели, параметры и индикаторы, особенности организации процесса разработки ПО ИСУ ММК, взаимодействия между заказчиком и исполнителем. Требования по надежности к ПО ИСУ ММК выражены в конкретных значениях сопряженных параметров (индикаторов).

Поскольку в ИСУ ММК в качестве системного ПО используется операционная система реального времени (ОСРВ), показано, что при разработке методики создания прикладного ПО ИСУ ММК необходимо учитывать особенности ОСРВ. Программный код прикладного ПО ИСУ ММК состоит из нескольких компонентов, в том числе: подпрограмм, инициализирующей части, обработчиков прерываний и регулярной части.

Алгоритм выполнения данного кода средствами ОСРВ можно обобщённо представить в виде модели на основе асинхронной нераскрашенной неингибиторной сети Петри без приоритетов и свойства самомодификации (рис. 1):

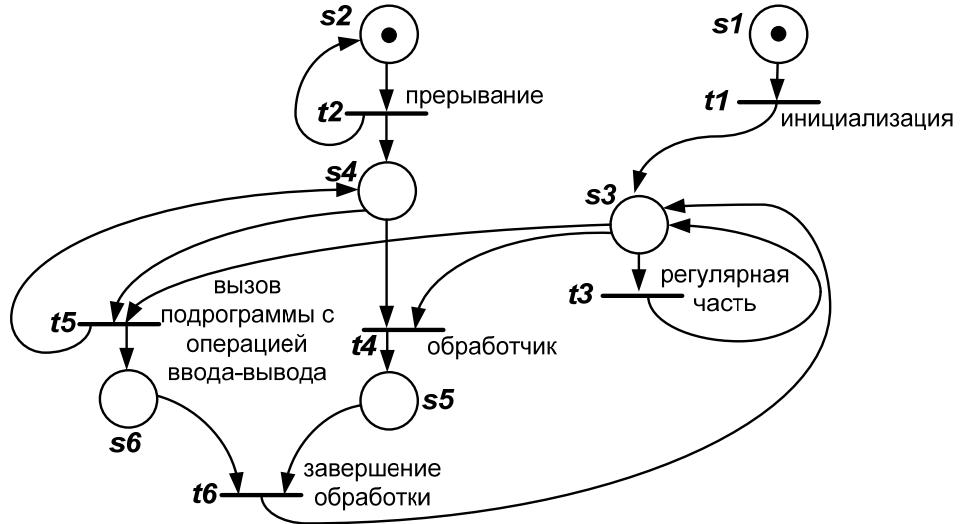


Рис. 1. Модель функционирования прикладного ПО для ОСРВ ИСУ ММК

Если данный алгоритм не учитывается, возникает проблема взаимных блокировок, или “тупиков” (deadlocks), которые приводят к потере работоспособности ИСУ ММК. Возникновение такой ситуации рассмотрено на примере типовой задачи при реализации алгоритмов управления. Возникновение “тупика” показано с помощью матричного метода расчета достижимости маркировок в сетях Петри (1):

$$M_K = M_0 + f(\sigma)D, \quad (1)$$

где M_K – конечная маркировка, M_0 – начальная маркировка, $f(\sigma)$ – вектор срабатывания переходов, $D = D^+ - D^-$; D^+ – матрица входных дуг, D^- – матрица выходных дуг.

Матричное уравнение (1) для сети на рис. 1 сводится к решению системы линейных уравнений (2):

$$\begin{cases} x_1 = 1 \\ x_1 - x_4 - x_5 + x_6 = 0 \\ x_2 - x_4 = 0 \\ x_4 - x_6 = 1 \\ x_5 - x_6 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений (2) имеет следующие корни: $x_1=1$; $x_2=0$; $x_3=c_1$; $x_4=0$; $x_5=0$; $x_6=-1$; $c_1 \in N$. В связи с тем, что один из корней указанной системы уравнений является отрицательным, конечная маркировка, обозначающая успешное завершение обработки прерывания, недостижима. “Тупик” определяется маркировкой $M_T=(0 \ 1 \ 0 \ c_1 \ 0 \ 1)$, $c_1 \in N$, при которой не может сработать ни один переход, кроме $t2$.

Обосновано существование решений задачи по предотвращению “тупиков”, представлен один из вариантов такого решения (на основе базовых методов программирования).

Обоснована важная роль пользовательского интерфейса в аппаратно-программных комплексах, в частности, системах управления, а также важность своевременного проектирования пользовательского интерфейса.

В работе качество пользовательского интерфейса оценивается с помощью двух ключевых параметров – времени выполнения задач пользователем и информационная эффективность. Данный параметр представляет собой соотношение объема информации, которую теоретически необходимо системе получить от пользователя для начала работы, к объему информации, который фактически необходимо передавать системе пользователю через её пользовательский интерфейс.

Рассмотрены существующие подходы к проектированию интерфейса для аппаратно-программных систем от ведущих мировых производителей прикладного ПО – Sun, Apple, Microsoft, произведен их семантический анализ. Результат данного анализа показал наличие дополнительных неявных направлений. Данные направления нередко являются отступлениями или даже прямыми нарушениями изложенных производителями основных положений их подходов в области создания пользовательских интерфейсов. Как результат, снижается эффективность внедрения новых систем, увеличиваются материальные и временные издержки, связанные с владением новой системой.

В первой главе также показано, что существует актуальная **научно-техническая задача** повышения эффективности проектирования ПО и человеко-машинного взаимодействия ИСУ ММК с целью обеспечения снижения затрат на разработку и функционирование ИСУ ММК, что приводит к снижению совокупной стоимости владения системой в целом. Данная задача рассматривается в работе как совокупность следующих подзадач:

- Разработка технологии проектирования ПО ИСУ ММК;
- Предотвращение “тупиков” на уровне ПО ИСУ ММК;

- Разработка метода проектирования эффективного пользовательского интерфейса ИСУ ММК;
- Построение и проверка гипотез о расстановке ментальных операторов в модели KLM пользовательского интерфейса ИСУ ММК;
- Разработка методики применения разработанных методов при проектировании ПО ИСУ ММК.

Во второй главе – «Разработка подходов и методов проектирования программного обеспечения и человеко-машинного взаимодействия в многофункциональных мультимедийных комплексах» – основное внимание уделено описанию разработанных подходов и методов, производится их теоретический анализ.

Проанализированы существующие технологические подходы к проектированию ПО на предмет соответствия требованиям, указанным в постановке задачи. Показано, что наиболее близко данным требованиям соответствует эволюционный подход.

На основе данного подхода, сформулированных требований, результатов проведенного анализа, а также теоретического обобщения опыта развертывания ИСУ ММК, разработан и представлен технологический подход к проектированию ПО ИСУ ММК. Данный технологический подход призван обеспечить необходимое качество продукта (соответствие ГОСТ Р ИСО 9001-2008), а также надежность работы системы как неотъемлемой части качественной реализации человеко-машинного взаимодействия на наиболее высоком иерархическом уровне – уровне управления проектом.

Поскольку время выполнения задачи пользователем при работе с системой и информационная эффективность являются количественными характеристиками (показателями качества разработки интерфейса), по их значению возможно проводить сравнение различных вариантов интерфейса, а также оценивать качество их разработки. При введении разработчиком ПО индикаторов (пороговых значений), возможно оценивать необходимость внесения изменений в разработанный интерфейс. В связи с этим в работе проанализированы следующие варианты реализации процесса разработки и тестирования пользовательского интерфейса ИСУ ММК по отношению к проектированию системы в целом:

- по результатам внедрения;
- по результатам разработки;

- на стадии проектирования.

Показано, что наиболее экономически выгодным является третий вариант. Это происходит за счет того, что первый и второй вариант предусматривают повышенный уровень затрат материальных, временных и человеческих ресурсов на внесение изменений в уже готовом к выпуску продукте, а в первом варианте, дополнительно – в уже внедренной системе. В третьем варианте необходимость внесения изменений определяется на стадии моделирования, т.е. до осуществления цикла разработки подготовки продукта для подготовки его к выпуску. Это снимает необходимость повышенных затрат ценных ресурсов.

Своевременное проектирование интерфейса позволит решить ещё один существенный вопрос – создать структуру человека-машинного взаимодействия максимально близкой для выполнения стоящих перед пользователем будущей системы задач, что позволяет спроектировать и реализовать интуитивно понятный интерфейс.

Ввиду необходимости априорного анализа ключевых свойств интерфейсов, разработанных на стадии проектирования системы в целом, произведен выбор средств моделирования процесса человека-машинного взаимодействия. Рассмотрены два основных класса методов моделирования, обладающих заданными характеристиками – когнитивные архитектуры и инженерные модели. На основании сравнительного анализа выбран класс методов – инженерные модели GOMS (models of Goals, Operators, Methods and Selection rules), в данном классе выбрана модель KLM как удовлетворяющая заданным требованиям и при этом наиболее простая по сравнению с другими (CPM-GOMS (Cognitive-Perceptual-Motor GOMS), NGOMSL (Natural GOMS Language) и т.д.). Данная модель основана на спецификации действий пользователя на элементарном уровне, как физических – нажатие клавиши, перемещение указателя “мыши”, так и ментальных – ментальной подготовке (например, выборка из рабочей памяти названия команды). Каждое действие пользователя, называемое оператором, ассоциировано с некоторым времененным значением. Суммируя значения всех операторов в модели, можно получить априорную оценку времени выполнения задачи пользователем на конкретном варианте интерфейса.

Необходимо отметить, что временнóе значение ментального оператора является наибольшим среди определенных в модели KLM, в связи с чем при анализе интерфейсов количество ментальных операторов в структуре модели имеет важное значение. Однако, их расстановка (и, соответственно, общее

количество) является нетривиальной задачей ввиду отсутствия четких правил, которые можно применить на всём множестве ситуаций. Существуют лишь приближенные эмпирические правила, в связи с чем расстановка ментальных операторов для модели KLM основывается на некоторой гипотезе. Если эта гипотеза неверна, то ввиду большой весовой доли временных значений ментальных операторов, итоговая оценка модели будет обладать значительной погрешностью, а сами модели будут признаны неадекватными. Таким образом, существует научная проблема построения и коррекции гипотез о ментальных действиях пользователя при реализации человека-машинного взаимодействия. С связи с этим сформулирована задача разработки метода, ориентированного на решение данной проблемы.

Технологический подход к проектированию ПО ИСУ ММК предусматривает включение в процесс проектирования создание макетов пользовательского интерфейса ИСУ ММК и получения априорных оценок его ключевых характеристик. Данный подход подразумевает введение понятий большого и малого циклов. Результатом применения большого цикла является конечная полнофункциональная версия ПО, а малого – модификация существующей полнофункциональной версии с целью устранения выявленных ошибок. На рис. 2. приведена структурная схема циклов, цветом выделены начальные этапы каждого из них:

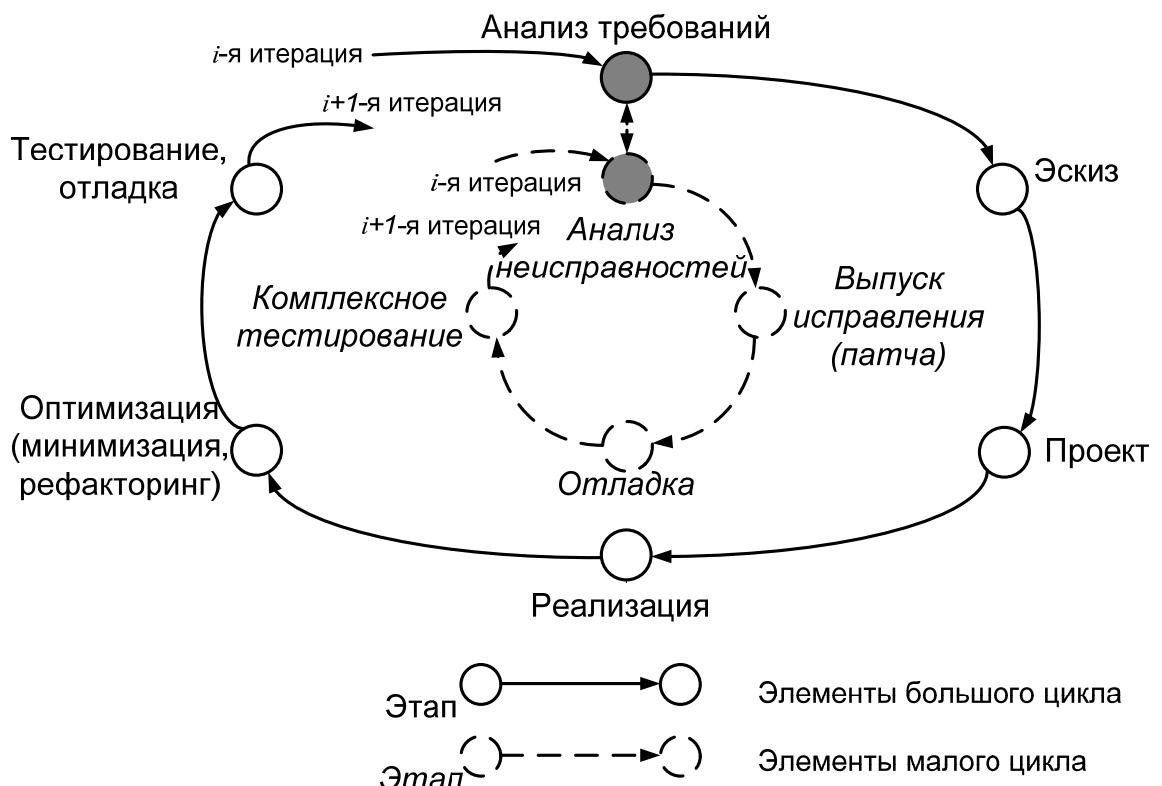


Рис 2. Структурная схема циклов

В работе определены и обоснованы длительности каждой из стадий.

Формирование алгоритма применения циклов с целью определения количества применений каждого из них ($n_{БЦ}$ и $n_{МЦ}$) и их очередности основано на результатах, полученных в ходе теоретических изысканий, а также эмпирическим путем. Число последовательных применений большого цикла не должно быть меньше двух. В противном случае теряется одно из основных свойств эволюционного подхода – возможность разработки следующей конечной версии ПО на основе высказанных заказчиком уточненных требований. Требования уточняются (как правило, при этом происходит их существенное расширение), заказчиком на основании результатов пробного применения более ранних версий продукта, а также (по возможности) – участия в его разработке. Такое уточнение сопровождается внесением соответствующих изменений в ТЗ с целью более достижения более полного соответствия требованиям по реализации производственных задач заказчика.

Согласно определению, малый цикл предусматривает модификацию продукта, которая в случае внесений новых элементов в его структуру, должна быть протестирована на предмет внесенных ошибок. В связи с этим число последовательных применений малого цикла также не должно быть меньше двух.

Ограничения по времени разработки ПО предусматривают оптимизацию временных затрат, следовательно их увеличение производится лишь в случае выявления такой необходимости. Разрабатываемый подход в заданных условиях предусматривает двукратное применение большого цикла, а затем – двукратное применение малого цикла, т.е. $n_{БЦ}=2$; $n_{МЦ}=2$:

- первое применение большого цикла (выпуск версии 1.0) – разработка исходной версии ПО с учётом пожеланий заказчика, выраженных формализованным образом (ТЗ);
- второе применение большого цикла (выпуск версии 2.0) – разработка версии ПО, с учётом скорректированных требований заказчика и выявленных особенностей реализации;
- первое применение малого цикла (выпуск версии 2.1) – устранение выявленных проблем функционирования (ошибок), внедрение программных средств защиты от неверных действий;
- второе применение малого цикла (выпуск версии 2.2) – устранение ошибок, внесенных на предыдущем шаге.

Для обеспечения надежной работы системы на более низком иерархическом уровне – уровне выполнения программного кода, разработан метод построения программного кода прикладного ПО ИСУ ММК с учетом

особенностей ОСРВ. Данный метод направлен на решение проблемы возникновения “тупиков” на уровне прикладного ПО ИСУ ММК. Эта проблема может быть решена также путем применения базовых методов программирования (рис. 1), однако, такое решение имеет ряд недостатков по сравнению с разработанным методом: а) приоритетность выполнения ключевых элементов кода становится самой низкой из возможных; б) такое решение имеет меньшую надежность и масштабируемость; в) существует риск изменения области памяти, выделенной обрабатывающей алгоритмической структуре, из-за прерывания её выполнения.

Модель сети Петри для данной задачи, при применении предлагаемого метода, выглядит во многом схоже с вариантом, представленным на рис. 1, с той лишь разницей, что переход **t5** и позиция **s3** соединяются дополнительным ребром. Это позволяет исключить отрицательные корни в системе уравнений, описывающих данную сеть Петри. Следовательно, “тупиков” при реализации данного решения не возникнет.

На основе результатов применения предлагаемого метода сформулированы практические рекомендации к разработке программного обеспечения в условиях ОСРВ применительно к ИСУ ММК.

Дальнейшее решение поставленной в главе 1 задачи производится непосредственно на иерархическом уровне построения интерфейса пользователя. На основании дополненной понятийной базы, обобщения существующего методического аппарата проектирования пользовательских интерфейсов, а также практики его применения, предложен метод построения пользовательского интерфейса ИСУ ММК. Данный метод основан на следующих десяти положениях:

1. немодальность (отсутствие режимов);
2. монотонность (наличие единственного способа выполнения конкретной задачи);
3. унификация (применение набора команд, одинакового для всех приложений);
4. видимость (доступность для восприятия пользователем всех доступных в данный момент действий);
5. модели “предмет-действие” (пользователь сначала выбирает предмет действия, а затем – необходимое действие);
6. структурная оптимизация для любых алгоритмов действий пользователя;
7. защита контента (от последствий нештатных ситуаций и случайных действий пользователя);

8. однородность рабочей среды (независимость представления данных пользователю от текущего приложения);
9. обеспечение обратной связи для любых действий пользователя;
10. состоятельность (очевидность для пользователя способа применения того или иного элемента интерфейса).

В качестве дополнения к существующей теоретической базе в научную практику автором введены новые элементы формализованной понятийной базы. Определение интерфейса сформулировано на основе теории множеств следующим образом: пользовательский интерфейс – это набор $UI=(E, S, A, V, R, P, I)$, где $E=(e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n)$ – множество элементов интерфейса; $S=(s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n)$ – множество состояний элемента; $A=(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ – множество операций по входу; $V=(v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n)$ – множество операций по воздействию; $R=(r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n)$ – множество операций по результату; $P=(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n)$ – множество параметров по входу, $I=(i_1, i_2, \dots, i_i, \dots, i_n)$ – множество операций индикации. Определены также функциональные составляющие интерфейса, предложена их классификация по функциональной нагрузженности.

Помимо определений, введены понятия допустимых действий над обозначенными элементами, т.н. кванторов вызова. Квантор вызова имеет три вида, показанные формулами:

$S_T \xrightarrow{a_T P_T} V_T$ – квантор вызова первого вида, когда с помощью некоторой операции по входу $a_T \in A$ и некоторого подмножества (набора) параметров $P_T \in P$ вызывается некоторое упорядоченное подмножество (набор) операций по воздействию V_T ;

$V_T \xrightarrow{\Theta} R_T$ – квантор вызова второго вида, когда система в ответ на появление на её входе упорядоченного подмножества (набора) операций по воздействию V_T через временные интервалы (упорядоченное множество) $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n\}$ выдает на выход соответствующее упорядоченное множество операций по результатам R_T

$R_T \xrightarrow{I_T} S_N$ – квантор вызова третьего вида, когда с помощью некоторого множества элементов операций индикации I_T , соответствующего элементам множества R_T элементы интерфейса переводятся в некоторое новое состояние S_N

Кванторы первого и второго, второго и третьего вида можно объединять, образуя сложные кванторы из двух или трех кванторов. Объединение возможно

тогда и только тогда, когда соответствующие множественные аргументы кванторов эквивалентны. Например, $V_1 \rightarrow R_1$ можно объединить с $R_1 \rightarrow S_1$, получив сложный квантор $V_1 \rightarrow R_1 \rightarrow S_1$, но не с $R_2 \rightarrow S_3$.

Функционально полным квантором вызова называется такой составной квантор вызова, который включает в себя последовательно кванторы вызова первого, второго, и третьего вида, например:

$$S_1 \rightarrow V_1 \rightarrow R_1 \rightarrow S_2$$

Физический смысл функционально полного квантора вызова состоит в активации пользователем определенного элемента интерфейса и изменение состояния данного интерфейса в соответствии с реакцией системы.

Применительно к пользовательским интерфейсам, данные понятия дополняют существующий аппарат математической теории множеств.

В главе 2 также formalизованы в виде критериев основные положения метода проектирования интерфейса ИСУ ММК, изложенные в главе 1. Так, например, критерий немодальности определен следующим образом: любому элементу множества A и, связанному с ним множеству P в любой момент времени соответствует определенное упорядоченное подмножество элементов V . Состав и порядок элементов в указанном подмножестве является константой.

Иначе говоря: для любого элемента $a_i \in A$, такого, что существуют функции $\zeta(a_i)$ и $\xi(a_i)$, отображающие данный элемент на множества E и P соответственно, существует функция $\rho(a_i)$, значение которой есть некоторое подмножество $V_s \in V$, причем данное отображение является константой, и не существует другого отображения на множество V для указанного элемента множества A . Данное функциональное сопоставление элементов множеств A и E единственно.

Математическая запись критерия немодальности представлена формулой (3):

$$\forall a_i : \begin{cases} a_i \in A; \\ \exists! \xi(a_i) = e_i : e_i \in E; \exists! \rho(a_i) = V_s \Rightarrow \begin{cases} V_s \in V; \\ V_s = \text{const.} \end{cases} \\ \exists \zeta(a_i) = P_s : P_s \in P. \end{cases} \quad (3)$$

При выполнении данного условия активация пользователем каждого элемента интерфейса в любой момент времени будет воспринято системой независимо от состояния других элементов этого интерфейса.

Для решения проблемы построения и проверки гипотез о расстановке ментальных операторов в модели KLM, разработан специальный метод,

который также используется для коррекции данных гипотез. Метод включает в себя два последовательно выполняемых этапа:

1. Специальная подготовка к проведению и обработка результатов экспериментов; при этом эксперимент проводится таким образом, чтобы каждый шаг пользователя при выполнении задачи (а не только начало и окончание её выполнения), при взаимодействии с системой фиксировался с соответствующей временной меткой. Обработка же результатов должна подразумевать получение на её выходе полной экспликации действий пользователя на уровне, максимально приближенном к уровню операторов модели KLM;
2. Применение специально разработанного алгоритма, позволяющего преобразовывать визуальное представление (визуализацию) ACT-R в сетевой график с выделенным критическим путем для уточнения гипотезы о расстановке ментальных операторов, используемой в модели KLM, что позволяет повысить точность временных прогнозов модели. Выявление и коррекция ошибок производятся с помощью сигнатурного анализа (под сигнатурой в данной работе понимается последовательность временных интервалов, каждый из которых соответствует элементарному действию в смысле модели KLM, т.е. может быть сопоставлен с оператором KLM.).

Метод позволяет получать модели KLM с достаточным уровнем адекватности (погрешность – менее 10%).

В третьей главе – «Разработка программного обеспечения для интегрированных систем управления многофункциональными мультимедийными комплексами» – рассмотрены вопросы применения разработанной методики на практике. Обоснована эффективность разработанных подходов и методов посредством исследования статистических результатов их применения. Приведены примеры реализованных проектных решений (ИСУ ММК учебного класса с возможностью оперативного преобразования в опорный центр технической поддержки, ИСУ ММК актового и конференц-залов, ИСУ ММК кабинетов руководителей высшего звена, ИСУ ресурсами системы многоточечной видеоконференцсвязи ММК). Разработаны практические рекомендации по применению предлагаемой методики.

Представлены результаты проверочного расчета надежности ПО данных ИСУ ММК, разработанного с использованием технологического подхода к проектированию ПО ИСУ ММК. Для оценки надёжности ПО использовались модели Джелински-Моранды и Миллса (табл. 1):

Табл. 1. Результаты обработки полученных статистических данных на основе моделей Джелински-Моранды и Миллса

Объект	1	2	3
Объём кода, строк	1320	3612	1642
Интервал времени между обнаружением первой и последней ошибки (в скобках – общее время наблюдения), дни	41(45)	44(45)	24(45)
Число обнаруженных ошибок, шт.	9	11	6
Число внесенных ошибок, шт.	20	32	32
Число найденных внесенных ошибок, шт.	19	30	31
Оценка числа ошибок по модели Джелински-Моранды, шт.	9,773	11,641	5,731
Оценка числа ошибок по методу максимального правдоподобия по методу Миллса, шт.	9,474	11,733	6,194
Оценка времени до обнаружения следующей ошибки, дни	19,856	18,843	—
Вероятностная величина, характеризующая достоверность оценки по методу Миллса	0,690	0,549	0,842

Данные результаты показывают, что требования по надежности, предъявляемые к ПО ИСУ ММК, выполнены. Снижение обнаруженного и ожидаемого количества ошибок на единицу объема кода, а также повышение оценки достоверности в третьем случае связано с тем, что при создании ПО ИСУ ММК данного объекта использовался компонентный подход.

В данной главе также приведены результаты экспериментального исследования, целью которого являлась проверка эффективности метода построения интерфейса ПО ИСУ ММК на среднеформатных сенсорных панелях. Исследование проводилось на действующих ИСУ ММК. Участниками являлись сотрудники эксплуатирующих подразделений. В ходе исследования рассматривались три варианта интерфейса – интерфейс с модальным всплывающими окнами (далее – интерфейс 1), интерфейс с немодальными всплывающими окнами, но включающий в себя другие модальные элементы (далее – интерфейс 2), и полностью немодальный интерфейс (далее – интерфейс 3). Интерфейс 3 построен в соответствии с методом, предлагаемым в данной работе.

Задача построения модели KLM и произведения необходимых вычислений была решена при помощи автоматизированного программного средства CogTool. Исходные данные для CogTool собирались при помощи лог-системы, реализованной автором в ПО ИСУ ММК. Основная задача лог-системы – генерация логов, соответствующих всем событиям, значимым для

эксперимента, с присвоенной временнóй меткой, в виде текстовых файлов. При первичной обработке данных текстовых файлов использовалось ПО EventsAnalyzer, разработанное лично автором. Указанное ПО, используя в качестве входных данных текстовый файл лог-системы и заданную пару событий, разницу во времени которых необходимо измерить, генерировало таблицу в формате MS Excel, в которой были вписаны разности во времени между каждой парой событий, встречающейся в лог-файле. Далее, используя функциональный инструментарий пакета MS Excel, полученные результаты измерений анализировались на предмет получения описательной статистики.

Результаты экспериментального исследования свидетельствуют о том, что модель KLM при применении предложенной в диссертации методики применима к интерфейсам ИСУ ММК на среднеформатных сенсорных панелях, а также о том, что интерфейс 1 имеет существенно большее время выполнения задач на нём, чем на других интерфейсах. Лучшим вариантом с точки зрения выполнения задач пользователем является интерфейс 3 (табл. 2, рис. 3). Дополнительно интерфейс 3 обеспечивает более высокий уровень комфорта пользователя при работе.

Табл. 2. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных для рассматриваемых вариантов интерфейсов

Номер интерфейса	1	2	3
Результат измерений, секунд	22,522	12,157	10,747
Предварительная оценка по CogTool, секунд	22,718	12,255	10,598
Расхождение по модели CogTool, %	0,863%	0,800%	1,406%

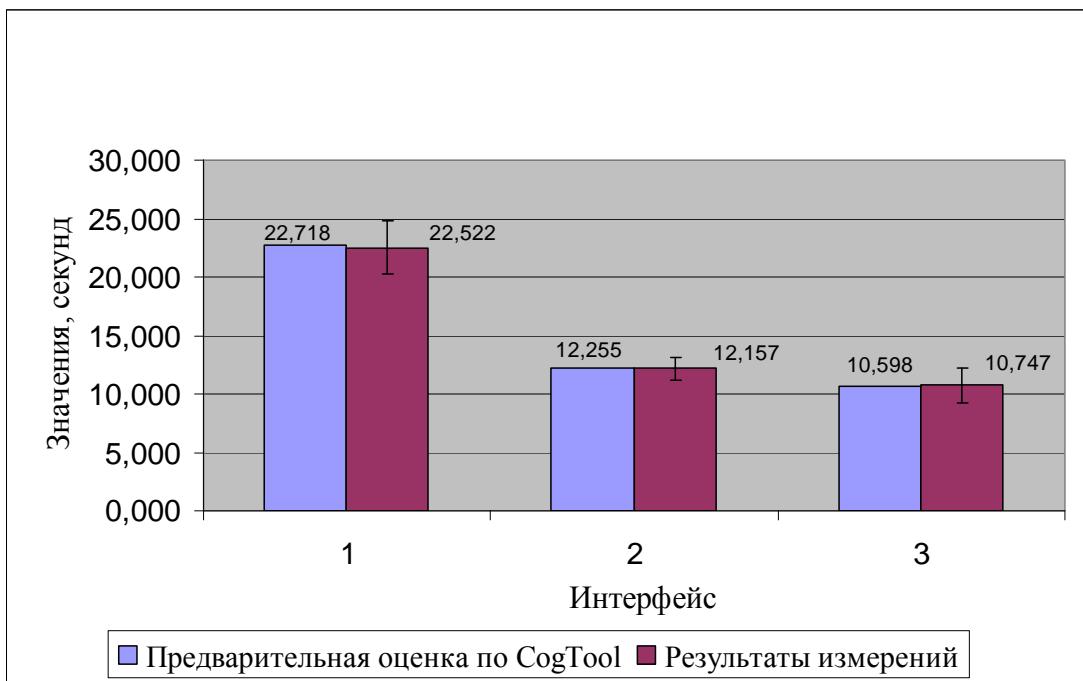


Рис 3. Результаты проверки прогнозов ПО CogTool

На промежуточном этапе исследования оценивалась информационная эффективность интерфейса. Полученные значения информационной эффективности (табл. 3) также подтверждают преимущество интерфейса 3.

Табл. 3. Исходные данные для расчета и результаты расчета информационной эффективности

№ задачи	Интерфейс с модальными рорир-окнами (интерфейс 1)			Интерфейс с немодальными рорир-окнами (интерфейс 2)			Полностью немодальный интерфейс (интерфейс 3)		
	миним. необх. кол-во инф., бит	фактич. необх. кол-во инф., бит	инф. эффект.	миним. необх. кол-во инф., бит	фактич. необх. кол-во инф., бит	инф. эффект.	миним. необх. кол-во инф., бит	фактич. необх. кол-во инф., бит	инф. эффект.
4	15,299	35,405	43,2%	15,299	33,405	45,8%	15,299	27,791	55,1%

При построении модели KLM была принята гипотеза о расстановке ментальных операторов, построенная в соответствии с существующими подходами и рекомендациями. В дальнейшем на основе базовых экспериментальных данных и визуальном представлении когнитивной архитектуры ACT-R гипотеза была скорректирована в соответствии с предложенным методом. Показано увеличение точности исходной модели за счет уменьшения её погрешности с 8% до 1–2%.

Можно утверждать, что метод применим и для более сложных по содержанию и структуре моделей KLM. При решении более масштабных задач прогнозируется уменьшение погрешности с 15% до уровня не более чем 5%. Ещё более значимого эффекта возможно достигнуть при моделировании работы системы, предусматривающей одновременное выполнение оператором систем управления нескольких операций, так как в этом случае потенциал аппарата сетевого моделирования будет задействован наиболее полно. Данный аспект применения метода, равно как и работу оператора рассматриваемых систем управления в экстремальных условиях, можно оценить при проведении дополнительного исследования.

В заключении приводятся основные выводы по работе:

1. Разработанная методика проектирования ПО ИСУ ММК позволяет существенно снизить совокупную стоимость владения ИСУ ММК и управляемым объектом. Это происходит за счет увеличения

производительности труда персонала, что приводит к сокращению его необходимой численности; а также сокращения временных затрат на разработку и функционирование системы;

2. Технологический подход к проектированию ПО ИСУ ММК, позволяет разрабатывать ПО ИСУ ММК с заданными параметрами времени разработки и надежности, что подтверждено проверочными расчетами по моделям Джелински-Моранды и Миллса;

3. Разработанный метод построения программного кода ПО ИСУ ММК с учетом особенностей ОСРВ позволяет предотвращать взаимные блокировки – “тупики” на уровне прикладного ПО, предотвращая временные задержки по восстановлению работоспособности системы. Эффективность метода подтверждена результатами моделирования на основе сетей Петри, показана его роль в реализации человека-машинного взаимодействия в разрабатываемом ПО;

4. Метод построения пользовательских интерфейсов ИСУ ММК на среднеформатных сенсорных панелях позволяет разрабатывать эффективные интерфейсы, ориентированные на цели человека и его особенности, что повышает его потребительские характеристики – снижает время обучения работе с системой, время выполнения пользовательских задач, а также необходимое количество обслуживающего персонала. Метод основан на разработанных формальных критериях качества пользовательских интерфейсов. В диссертации проведено экспериментальное исследование, подтверждающее точность моделирования пользовательских интерфейсов формальными методами, а также более высокую эффективность пользовательских интерфейсов, созданных по предложенному методу, по сравнению с базовыми;

5. Метод построения моделей KLM с корректирующей обратной связью позволяет синтезировать модели KLM, которые обладают необходимым и достаточным уровнем адекватности для моделирования пользовательских интерфейсов ИСУ ММК на среднеформатных сенсорных панелях, что также подтверждено результатами экспериментального исследования;

6. Разработанная методика проектирования ПО ИСУ ММК на основе ОСРВ может быть применена при проектировании широкого спектра аппаратно-программных комплексов, в которых осуществляется человеко-машинное взаимодействие посредством среднеформатных сенсорных панелей.

В приложения вынесены поясняющие и вспомогательные материалы.

Перечень публикаций по теме диссертации:

1. Абдулин Е. Р. Разработка прикладного программного обеспечения для систем реального времени с заданными параметрами функционирования / **Системы высокой доступности.**, М.: “Радиотехника”, №1, т.6 2010. С.19-34.
2. Абдулин Е. Р. Решение задачи разработки прикладного программного обеспечения для интегрированных систем управления на базе операционных систем реального времени в условиях ограниченности временных ресурсов. / **Системы высокой доступности**, М.: “Радиотехника”, №4 2010. С.4-13.
3. Абдулин Е. Р. Метод построения и проверки гипотез о ментальных действиях пользователя при реализации человеко-машинного взаимодействия / Управление большими системами. Специальный выпуск 30.1 “Сетевые модели в управлении”. М.: ИПУ РАН, 2010. С. 104-127.
4. Abdulin E. (2011) Using the Keystroke-Level Model for designing user interface on middle-sized touchscreens. Extended Abstracts of CHI 2011 (Vancouver, BC, Canada, May 7 – 12, 2011) ACM, New York;
5. Абдулин Е. Р. “Организация структуры человека-машинного взаимодействия при создании интегрированных систем управления”, VII международная конференция “Новые информационные технологии и менеджмент качества, NIT&QM’2010”, 2010;
6. Абдулин Е. Р. “Научно-методический подход к разработке интерфейсов интегрированных систем управления”, 59-я Научно-Техническая конференция МИРЭА, 2010;
7. Абдулин Е. Р. “Метод построения инженерных моделей пользовательского интерфейса с корректирующей обратной связью”, 60-я Научно-Техническая конференция МИРЭА, 2011;
8. Абдулин Е. Р., Абросимов В.К. “Организация управления многофункциональным мультимедийным комплексом ситуационной комнаты”, конференция “Ситуационные центры и информационно-аналитические технологии поддержки принятия решений”, 2010 (личный вклад диссертанта – описание структуры интегрированных систем управления и опыта применения таких систем);