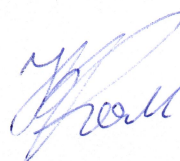


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники»



На правах рукописи

КОМАРОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ВРЕМЕННЫМ
РАЗДЕЛЕНИЕМ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ РЕСУРСОВ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (промышленность)»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:

Сарафанов Альберт Викторович

доктор технических наук, профессор

Красноярск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	19
1.1 Анализ основных тенденций применения метода разделения времени в различных сферах деятельности	19
1.1.1 Развитие концептуального базиса коллективного пользования вычислительными ресурсами	19
1.1.2 Анализ ключевых направлений прикладного применения метода разделения времени	23
1.1.3 Автоматизированные системы экспериментальных исследований с временным разделением	30
1.2 Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как объект диссертационного исследования	37
1.2.1 Обобщенная структурная схема построения МРИУС	37
1.2.2 Исследование функциональных ограничений построения МРИУС	47
1.2.3 Выработка требований к параметрам оперативности функционирования МРИУС	50
1.3 Анализ проблематики и постановка задач диссертационного исследования	55
1.4 Выводы по главе 1	67
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ	69
2.1 Разработка информационной модели проектного решения МРИУС	69
2.2 Принципы сокращения области поиска допустимых вариантов проектных решений МРИУС	78
2.2.1 Принцип иерархичности	78
2.2.2 Принцип ограничения количества допустимых альтернатив	83
2.2.3 Принцип унификации	86

2.3 Разработка критерия оценки технического уровня проектных решений МРИУС.....	89
2.4 Исследование потенциальных направлений повышения технического уровня МРИУС.....	94
2.5 Методология проектирования МРИУС.....	97
2.6 Выводы по главе 2.....	102
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МРИУС.....	104
3.1 Разработка базовых структур аппаратного построения МРИУС.....	104
3.1.1 Однообъектовая базовая структура.....	106
3.1.2 Многообъектовые базовые структуры.....	107
3.2 Разработка методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС.....	116
3.3 Разработка методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС	121
3.4 Разработка математических моделей динамики функционирования МРИУС.....	129
3.4.1 Постановка задачи моделирования.....	129
3.4.2 Базовые аналитические модели.....	134
3.4.3 Базовая имитационная модель.....	143
3.5 Разработка методики формирования граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС.....	151
3.6 Разработка методики оценки технических характеристик МРИУС.....	155
3.7 Разработка методики расчета функций параметрической чувствительности.....	160
3.8 Выводы по главе 3.....	163
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МРИУС.....	165
4.1 Метод накопления апостериорной информации о длительностях функциональных операций.....	165
4.2 Метод оптимизации операций управления.....	167
4.2.1 Описание метода оптимизации операций управления.....	167

4.2.2 Исследование эффективности метода оптимизации операций управления.....	176
4.3 Метод временного разделения многократных измерений.....	179
4.3.1 Описание метода временного разделения многократных измерений.....	179
4.3.2 Исследование эффективности метода временного разделения многократных измерений.....	186
4.4 Метод распараллеливания функциональных операций.....	189
4.4.1 Описание метода распараллеливания функциональных операций.....	189
4.4.2 Исследование эффективности метода распараллеливания функциональных операций.....	196
4.5 Обобщенный анализ эффективности применения методов повышения оперативности функционирования.....	199
4.6 Выводы по главе 4.....	206
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА СОСТАВА БАЗЫ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МРИУС.....	208
5.1 Разработка базового измерительного обеспечения МРИУС.....	209
5.1.1 Базовые алгоритмы спектрального измерения параметров сигналов в МРИУС.....	209
5.1.2 Комплекс базовых унифицированных виртуальных приборов.....	218
5.2 Разработка базовых шаблонов проектирования графического интерфейса пользователя.....	224
5.3 Разработка методики формирования базы данных инженерных решений МРИУС.....	230
5.4 Разработка методики проектирования МРИУС.....	236
5.5 Разработка методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации.....	243
5.6 Выводы по главе 5.....	248
ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ.....	250
6.1 Апробация результатов диссертации.....	251

6.1.1 МРИУС автоматизации экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей.....	251
6.1.2 МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований.....	276
6.2 Экспериментальные исследования технических характеристик МРУИС.....	287
6.2.1 Экспериментальные исследования параметров модели поведения пользователей в МРИУС.....	291
6.2.2 Экспериментальные исследования параметров распределения времени выполнения заданий в МРИУС.....	298
6.2.3 Экспериментальные исследования оперативности функционирования МРИУС.....	301
6.3 Экспериментальные исследования методов повышения оперативности функционирования МРИУС.....	304
6.3.1 Экспериментальные исследования метода временного разделения многократных измерений.....	305
6.3.2 Экспериментальные исследования метода оптимизации операций управления.....	306
6.4 Внедрение результатов диссертации.....	308
6.5 Выводы по главе 6.....	312
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	315
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ТЕРМИНОВ.....	319
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	324
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПИСАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ.....	365
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	388
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ДИПЛОМЫ, ПАТЕНТЫ.....	408

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Как известно достижение одной из ключевых целей социального развития страны – *интенсификации сфер производства*, реализуется посредством постоянного эволюционного внедрения и эксплуатации в производственных процессах новейших достижений научно-технического прогресса. Его развитие в конце XX и начале XXI века обусловило рост интеллектуализации, миниатюризации и функциональной плотности изделий отрасли электронного и радиоэлектронного приборостроения. Основной тенденцией развития данной отрасли промышленности является внедрение средств вычислительной техники и реализация соответствующих изделий в виде специализированных аппаратно-программных комплексов и систем (программно-определяемая радиосистема, система на кристалле, виртуальный прибор, программно-определяемая сеть и др.). Синергетический эффект, возникший в результате комбинирования и интеграции радиоэлектронных устройств, комплексов и систем различного функционального назначения, реализованных на основе данных подходов, является катализатором развития цифровых технологий (например, таких как Интернет вещей, интеллектуальные датчики, облачные сервисы и пр.), лежащих в основе цифровой трансформации различных сфер человеческой деятельности.

Автоматизация и последующая цифровизация в различных отраслях промышленности стимулируют появление новых производственных технологий, профессий и бизнес-моделей предоставления услуг. Рассмотренные тенденции развития отрасли приборостроения, с одной стороны, существенно увеличивают функциональную плотность изделий широкого и специального назначения, но при этом, с другой стороны, приводят к усложнению и увеличению трудоемкости процесса их разработки, отработки и испытаний, а также повышают требования к квалификации кадров, осуществляющих их разработку и эксплуатацию. В свою очередь, возрастающие сложность и стоимость устройств, комплексов и систем также затрудняют в отраслевой системе подготовки оснащение научно-исследовательских и специализированных лабораторий их современными образцами для обеспечения процесса переподготовки и подготовки востребованных инженерных кадров, что оказывает негативное влияние на дальнейшее эволюционное развитие научно-технического прогресса.

Таким образом, для обозначенных технологических процессов прикладных экспериментальных исследований возникает проблема их ресурсного обеспечения в рамках процессов интенсификации производств (в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров).

В качестве одной из технологий, которые основаны на синергетическом эффекте при интеграции ряда современных достижений научно-технического прогресса и направлены на решение обозначенной проблемы, является технология эксплуатации ресурсов автоматизированных систем (программных средств, средств вычислительной и измерительной техники, исполнительных устройств и механизмов и пр.) на основе концепции *мультиарендности (multitenancy)* (ГОСТ ISO/IEC 17788-2016). Данная технология в области *автоматизации прикладных экспериментальных исследований* (промышленный, научный и учебный эксперименты) реализуется посредством создания *многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем* (далее – МРИУС), которые обеспечивают одновременное обслуживание нескольких *абонентов* (групп пользователей (в том числе и удаленных) или процессов обработки данных) в интерактивном диалоговом режиме посредством использования одного аппаратно-программного ресурса в режиме временного разделения.

В производственной деятельности прикладное применение МРИУС осуществляет трансформацию бизнес-процессов разработки, изготовления и эксплуатации приборов, комплексов и систем как средств и объектов испытаний посредством снижения материально-технических и временных затрат. В отраслевой системе подготовки кадров автоматизация экспериментальных исследований посредством создания МРИУС: обеспечивает доступ к высокотехнологичным средствам измерения, уникальным и специализированным лабораторным макетам/стендам/установкам в режиме «24/7»; сокращает в несколько раз затраты на необходимое материально-техническое оснащение и обслуживание специализированной лабораторно-исследовательской базы; расширяет возможности современной образовательной среды, делая ее высокотехнологичной и др.

В РФ актуальность формирования новых технологических основ для производственной и научно-технической сфер человеческой деятельности за счет внедрения современных цифровых технологий в промышленности, науке и образовании также отмечена рядом принятых стратегий развития, государственных и федеральных

целевых программ («Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», «Цифровая экономика Российской Федерации», «Современная цифровая образовательная среда в Российской Федерации» и др.).

Таким образом, создание на научной основе, внедрение и эксплуатация МРИУС в качестве ресурсного обеспечения прикладных экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров имеет важное народнохозяйственное значение, что обуславливает *актуальность* темы диссертационного исследования.

Разработанность темы исследования. Ключевая особенность МРИУС как объекта исследования характеризуется двойственной спецификой процесса ее функционирования. Она функционирует как автоматизированная система экспериментальных исследований (АСЭИ) в ходе непосредственного выполнения поступающих от пользователей заданий (дистанционное целенаправленное воздействие на объект экспериментального исследования и сбор данных о его состоянии), и как система массового обслуживания (СМО) в процессе одновременной работы с разделяемыми ресурсами нескольких пользователей (или процессов). Дифференцированные исследования проблем предметной области каждого выделенного аспекта функционирования МРИУС выполнены во многих работах российских и иностранных ученых.

Фундаментальным и прикладным исследованиям вопросов анализа, организации функционирования и моделирования вычислительных систем с *внешним* и *внутренним* разделением времени на основе теории систем и сетей массового обслуживания посвящены работы Д. А. Поспелова, Я. А. Когана, С. Ф. Яшкова, С. А. Майорова, Г. П. Башарина, П. П. Бочарова, А. L. Scherr, L. Kleinrock, А. О. Allen, L. Lipsky, J. Sztrik, E. D. Lazowksa и др. Теоретические основы и принципы построения автоматизированных измерительных и управляющих систем, лежащих в основе АСЭИ, а также подходы к решению частных задач разработки каналов измерения и управления, обеспечению требуемых их технических характеристик (точности, быстродействия, помехоустойчивости, надежности и пр.) рассмотрены М. П. Цапенко, П. П. Орнатским, Т. М. Алиевым, Э. И. Цветковым и другими известными специалистами в области измерительной техники. В свою очередь, научные основы и принципы комплексной разработки аппаратно-программного обеспечения (АПО) МРИУС в целом, а также их

дальнейшей эксплуатации при изменяющихся условиях с точки зрения обеспечения требуемых технических характеристик исследованы недостаточно полно.

Возрастающая функциональная плотность создаваемых образцов МРИУС обуславливает необходимость дополнения учитываемых аспектов моделирования и расширения исследовательских возможностей применяемых ранее математических моделей в целях создания высокоинформативного инструментария предиктивной аналитики для этапов разработки проектных решений и эксплуатации данных систем.

Решение задачи повышения пропускной способности систем, в целом описываемых также характерным для МРИУС классом замкнутых СМО, реализуется, в том числе, путем применения различных приоритетных дисциплин обслуживания с учетом особенностей их функционирования в соответствующих прикладных областях. Однако направление повышения пропускной способности МРИУС посредством управления последовательностью выполнения заданий с учетом аспекта ее функционирования как АСЭИ в отечественной и зарубежной практике исследовано недостаточно.

В области прикладных научно-технических разработок и создания образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований наиболее известны работы коллективов следующих российских и иностранных исследовательских и образовательных учреждений: НИУ МЭИ, КНИТУ-КАИ, РТУ МИРЭА, НИЯУ МИФИ, НГТУ (Россия); Massachusetts Institute of Technology, Iowa State University, Stevens Institute of Technology (США); McGill University (Канада); Hosei University (Япония); Blekinge Institute of Technology (Швеция); Dayalbagh Educational Institute (Индия); Zhejiang Wanli University (Китай) и др. Однако приводимые в открытых источниках сведения о технических характеристиках созданных образцов МРИУС и характере их изменения при возможном варьировании условий эксплуатации являются неполными, что снижает эффективность их применения, а также затрудняет их создание и эксплуатацию в отраслевой системе подготовки кадров в промышленных масштабах.

В представляемой диссертационной работе, в отличие от известных результатов исследований, поставлена и решена **важная научно-техническая проблема** рационального использования технических ресурсов в процессе интенсификации производства в ракетно-космической промышленности и отраслевой системе

подготовки кадров за счет усовершенствования научных основ создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований с учетом их двойственной специфики функционирования, а также за счет разработки, внедрения и эксплуатации образцов данных систем.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы автоматизации экспериментальных исследований, а предметом исследования – процессы их разработки и эксплуатации.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в усовершенствовании научных основ создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований. Для достижения сформулированной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование и систематизация современных тенденций совместного использования аппаратных и программных ресурсов на основе метода разделения времени в ряде прикладных областей.

2. Исследование путей совершенствования МРИУС.

3. Разработка базовых аналитических и дополненной имитационной моделей динамики функционирования МРИУС как СМО и реализация соответствующего программного обеспечения.

4. Разработка методов организации работы диспетчера разделяемого ресурса, направленных на повышение оперативности функционирования МРИУС.

5. Разработка комплекса решений проектных задач для информационной поддержки процесса разработки МРИУС.

6. Разработка методики проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками на основе известных и предложенных моделей, методов, комплексов методик и решений частных проектных задач.

7. Разработка методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации и создание положенной в ее основу подпрограммы регистрации и накопления статистических данных о параметрах процесса функционирования данных систем как СМО.

8. Экспериментальная проверка, апробация и внедрение результатов диссертационного исследования в области автоматизации экспериментальных

исследований в ракетно-космической промышленности и отраслевой системе подготовки кадров, а также в учебный процесс.

Научная новизна работы состоит в создании новой предметно-ориентированной методологии, интегрирующей в своем составе методы, модели, методики и комплекс решений, реализующих в целом научные основы построения МРИУС с улучшенными показателями технического уровня, а также в создании новой методики их адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. При этом в диссертации:

1. *Впервые* предложен обобщенный критерий оценки технического уровня, характеризующий эффективность организации режима коллективного пользования единичными экземплярами оборудования автоматизированных систем экспериментальных исследований, на основе которого выделены и исследованы направления совершенствования МРИУС.

2. Разработана и реализована в виде программного модуля базовая имитационная модель динамики функционирования МРИУС как систем массового обслуживания при выполнении функциональных задач в интерактивном диалоговом режиме, *дополнительно* учитывающая структуру аппаратного построения, длительности функциональных операций управления и измерения, их зависимость от параметрического и функционального содержания выполняемых заданий, задержку прохождения заданий по сети, вариативность реализуемых алгоритмов диспетчеризации, а также гетерогенность размышления и обслуживания пользователей.

3. *Впервые* разработаны методы повышения оперативности функционирования МРИУС (метод оптимизации операций управления, метод временного разделения многократных измерений, метод распараллеливания функциональных операций), которые основаны на организации процесса диспетчеризации заданий в соответствии с исследованными особенностями работы разделяемых ресурсов как автоматизированных систем экспериментальных исследований.

4. Разработан комплекс решений ряда проектных задач, включающий набор базовых структур аппаратного построения, алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса на основе предложенных методов, комплекс базового измерительного обеспечения, базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя, *отличающийся тем*, что учитывает характерные особенности процесса

функционирования МРИУС как автоматизированных систем экспериментальных исследований, так и систем массового обслуживания.

5. Разработана новая методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками, *отличающаяся тем*, что объединяет в своем составе подходы разработки их аппаратных и программных компонентов с точки зрения функционирования как автоматизированных систем экспериментальных исследований, так и систем массового обслуживания, реализует аккумуляцию и возможность применения положительного опыта предыдущих разработок на основе итерационно формируемой и актуализируемой базы данных инженерных решений.

6. *Впервые* разработана и апробирована новая методика адаптации МРИУС, заключающаяся в целевой модификации их отдельных компонентов аппаратно-программного обеспечения, методического и организационного обеспечения их эксплуатации на основе созданной подпрограммы регистрации и накопления статистических данных о функционировании МРИУС как систем массового обслуживания.

7. На основе отдельных компонентов методологии и методологии в целом создан и внедрен ряд *новых* опытных и промышленных образцов МРИУС в области автоматизации промышленного, научного и учебного эксперимента, в том числе защищенных патентами РФ на изобретение, с улучшенными показателями технического уровня относительно ранее известных их аналогов и/или прототипов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертации состоит в проработке и систематизации результатов предыдущих исследований, их дополнении и комплексировании с вновь разработанными методами, моделями, алгоритмами и методиками в составе единой методологии проектирования МРИУС автоматизации экспериментальных исследований с улучшенными показателями технического уровня.

Практическая значимость диссертационной работы заключается:

- в создании научных основ построения и совершенствования МРИУС, а также комплекса решений и специализированного программного обеспечения для информационной поддержки процесса их разработки;

- в создании программного и алгоритмического обеспечения процессов испытаний и эксплуатации МРИУС в различных прикладных областях (промышленный, научный и учебный эксперименты);
- в сокращении материальных затрат и повышении информативности процессов автоматизированных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) («Блок управления», «Блок интерфейсный») систем управления космических аппаратов (КА) различного функционального назначения (связи и телевидения, ретрансляции, навигации и др.) на основе созданного и внедренного в производственную деятельность промышленного образца МРИУС (расширение в 2–3 раза перечня обрабатываемых режимов работы);
- в создании на основе ее результатов ряда новых опытных и промышленных образцов МРИУС автоматизации научного и учебного эксперимента, внедрение которых обеспечило сокращение до 10 и более раз затрат на необходимое материально-техническое оснащение лабораторно-исследовательской базы учреждений отраслевой системы подготовки кадров, снижение их накладных расходов в части эксплуатации отводимых под специализированные лаборатории площадей.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы теории массового обслуживания, теории вероятностей и математической статистики, математического моделирования, экспериментальных исследований, а также теория параметрической чувствительности, общая теория систем, теория множеств, теория графов, компьютерные измерительные технологии.

Основные положения работы, выносимые на защиту

1. Предметно-ориентированная методология проектирования МРИУС, интегрирующая в своем составе как известные подходы, так и вновь разработанные в рамках диссертационного исследования методы, модели, методики и комплекс решений, и тем самым позволяющая создавать образцы МРИУС с улучшенными показателями технического уровня (*п. 3, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

2. Базовая имитационная модель динамики функционирования МРИУС как СМО в процессе выполнения конфигурационных и измерительных заданий пользователей, характеризующаяся дополнительными исследовательскими возможностями, а также реализующие разработанную и применяемые модели адаптируемые программные модули, обеспечивающие сокращение до 30% и более сроков решения частных

проектных задач и объема натурных испытаний (*п. 3, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

3. Методы повышения оперативности функционирования МРИУС, которые обеспечивают повышение числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей на величину до 30 % и более, а также в 3–6 раз расширяют множество альтернативных вариантов проектных решений МРИУС, синтезируемых в процессе их разработки в соответствии с заданными требованиями технического задания (*п. 9, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

4. Комплекс решений, реализующий информационную поддержку процесса разработки МРИУС и обеспечивший для ряда созданных образцов систем сокращение до 30% и более временных затрат на разработку аппаратных и программных компонентов, а также сокращение более чем 2 раза длительностей функциональных операций измерения, выполняемых по заданиям пользователей (*п. 3, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

5. Методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками, обеспечивающая сокращение в среднем на 20–25 % сроков разработки образцов данных систем и возможность повышения их технического уровня, основанная как на известных, так и на разработанных в диссертации математических моделях, методах повышения оперативности функционирования, комплексе решений, и предложенных частных методиках (методика проектирования аппаратно-программного обеспечения; методика оценки параметров сценария диалога; методика формирования граничных значений параметров сценария диалога; методика оценки технических характеристик, методика расчета функций параметрической чувствительности) (*п. 3, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

6. Методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям их эксплуатации на основе созданной специализированной подпрограммы, реализующая сопровождение и анализ процесса функционирования, а также последующую адаптацию на этапах опытной и промышленной эксплуатации в соответствии с заданными и фактическими значениями их технических характеристик функционирования как СМО, что в конечном счете повышает результативность применения существующих и создаваемых систем (*п. 3, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

7. Созданный на основе отдельных компонентов методологии и методологии в целом ряд новых опытных и промышленных образцов МРИУС в области автоматизации промышленного, научного и учебного эксперимента, в том числе защищенных патентами РФ на изобретение, с улучшенными показателями технического уровня в среднем на 20–30 % и более относительно ранее известных их аналогов и/или прототипов (*п. 2, п. 20 паспорта специальности 05.13.06*).

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, аналитическим и имитационным моделированием, сопоставлением частных результатов математического моделирования с имеющимися результатами в данной области, совпадением результатов математического моделирования и натуральных экспериментов, результатами внедрения и многолетней эксплуатации разработанных образцов МРИУС автоматизации экспериментальных исследований в промышленности и учреждениях отраслевой системы подготовки кадров, а также обсуждением результатов диссертации на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и выставках.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях, выставках и научных семинарах: Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, 2005–2009, 2011 гг.); Всероссийском форуме «Образовательная среда – 2007» (г. Москва, 2007 г.); Международном конгрессе-выставке «Global Education – образование без границ» (г. Москва, 2007–2009 гг.); Международной выставке образовательных материалов, профессиональной подготовки и электронного обучения WorldDidac 2008 (г. Базель, Швейцария, 2008 г.); заседании Совета Учебно-методического объединения по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации, посвященному 20^{ти} -летию УМО (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); VII и VIII Научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (г. Москва, 2008 и 2009 гг.); XVI и XVII Международной образовательной выставке «УЧСИБ» (г. Новосибирск, 2008 и 2009 г.); IX и X Международной научно-практической конференции «Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments» (г. Москва, 2010 и 2011 гг.); XI Международной

научно-практической конференции «Интеллект и наука» (г. Железногорск, 2011 г.); VI и XIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники» (г. Омск, 2011 и 2020 г.); Международном научном семинаре «Биотехнология новых материалов и окружающая среда» (г. Красноярск, 2011 г.); XV Международной конференции «NI-Days – 2016» (г. Москва, 2016 г.); XX Юбилейной Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2016 г.); XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» и 351 Томском IEEE-семинаре «Интеллектуальные системы моделирования, проектирования и управления» (г. Томск, 2020 г.). Концепция типовых решений при построении автоматизированных лабораторных практикумов с удаленным доступом обсуждена и одобрена на заседании УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в г. Санкт-Петербурге на базе СПбГТУ «ЛЭТИ» в 2005 г.

За разработку образцов специализированных МРИУС в области автоматизации экспериментальных исследований и технических решений по улучшению их характеристик автор был награжден дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года» в 2015 г., проводимого Российским Союзом научных и инженерных общественных объединений.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты диссертационной работы использовались: при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в период с 2008 по 2018 гг. на кафедрах «Приборостроение и наноэлектроника», «Радиоэлектронная техника информационных систем», «Радиоэлектронные системы» Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ); при выполнении Государственного контракта № П273 «Развитие системы центров коллективного пользования с удаленным доступом» в рамках Федеральной целевой программы развития образования на 2006–2010 гг.; при выполнении программы развития СФУ на 2007–2010 гг. в рамках приоритетного направления «Информационно-коммуникационные технологии»; при создании и развертывании сетевого учебно-исследовательского центра коллективного пользования уникальным лабораторным оборудованием на базе *web*-портала СФУ в 2009 г.; при выполнении гранта

№ 2.2.2.2/5309 (РНП-14) Министерства образования и науки РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» 2009–2010 гг.; при выполнении гранта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы» (контракт № 02.740.11.0766); в рамках хоздоговорной тематики при создании и развертывании сетевой лаборатории «Полупроводниковые приборы» на базе ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» в 2009 г., нацеленной на многоуровневую систему образования.

Отдельные результаты диссертационной работы использовались при выполнении прикладных научных и научно-исследовательских работ Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (г. Железногорск, в 2013 и 2015 гг.), в том числе в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», а также при выполнении научно-исследовательских работ АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск, 2013 г.).

Результаты диссертационной работы внедрены: в практику промышленного проектирования МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований в Региональном инновационном центре «Центр технологий *National Instruments*» при СФУ; в производственный процесс испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления КА Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева»; в учебный процесс СФУ как компонент инновационных учебно-методических комплексов; в учебный процесс ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Московского института электроники и математики имени А. Н. Тихонова ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономика» и ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», что подтверждается соответствующими актами.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 75 опубликованных работах, в том числе в 25 работах, опубликованных в журналах из Перечня ВАК РФ; в монографии; 7 патентах на изобретение РФ; 15 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, условных обозначений, терминов, списка литературы и

приложений. Основной текст диссертации (без приложений) изложен на 364 страницах и содержит 100 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 451 наименования.

Личный вклад. Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно, предложенные методы, модели, методики, алгоритмы и программное обеспечение разработаны лично автором или при его преобладающем участии. Представленные в работе опытные и промышленные образцы МРИУС автоматизации экспериментальных исследований разработаны как лично автором, так и при его непосредственном участии, а также на основе полученных лично автором результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Разработка базового измерительного обеспечения МРИУС проводилась совместно с профессором, заслуженным изобретателем РФ А. С. Глинченко, что отражено в совместных публикациях, авторский вклад в которых состоит в программной реализации алгоритмов, непосредственном участии в проектировании соответствующих составных программных компонентов, их создании, тестировании, экспериментальных исследованиях и апробации.

Направления исследований и методологические аспекты диссертационной работы, формулировки проблем и постановка задач обсуждались с научным консультантом профессором, лауреатом премии Правительства РФ в области науки и техники А. В. Сарафановым.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»: п. 2, 3, 9, 20.

ГЛАВА 1. МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Анализ основных тенденций применения метода разделения времени в различных сферах деятельности

Наличие ограничений на доступные ресурсы (аппаратные, программные, частотные, энергетические и т.д.) обуславливает необходимость обеспечения их рационального использования [1–6]. Данная проблема может быть решена посредством организации управления поочередным использованием имеющегося ресурса для «обслуживания» потребностей потребителей, то есть посредством реализации *метода разделения времени* [1, 5–9]. При этом для многих сфер человеческой деятельности актуальными являются задачи повышения технических и эксплуатационных характеристик, эффективности разрабатываемых и эксплуатируемых функциональных узлов, приборов, устройств и систем в целом, которые могут быть решены также посредством применения *метода разделения времени* [1, 10–20].

Впервые концепция обеспечения процесса коллективного пользования аппаратными и программными ресурсами, основанная на реализации *метода разделения времени*, была предложена применительно к вычислительным системам в 1950–1960 гг. [21–24].

1.1.1 Развитие концептуального базиса коллективного пользования вычислительными ресурсами

В соответствии с концепцией коллективного пользования в вычислительных системах каждому пользователю предоставлялся терминал для индивидуальной диалоговой работы с ЭВМ (мэйнфреймом), являющейся *разделяемым ресурсом*, при этом у пользователей возникала ощущение монопольной и независимой друг от друга работы с процессором, оперативной памятью, дисковым пространством и пр. [7]. Управление очередностью выполнения задач, доступом и распределением ресурсов ЭВМ в данных системах осуществляется специализированным модулем программного

обеспечения – *диспетчером разделяемого ресурса* (или *супервизором*), реализующим predetermined *алгоритм диспетчеризации* (*scheduling algorithm*) [5, 7, 13, 22, 24, 25].

В качестве основных факторов, обусловивших развитие вычислительных систем с разделением времени в 1960–1980 гг., принято выделять высокую стоимость мощных ЭВМ, обусловленную их уникальностью, а также сильный дисбаланс между скоростью работы пользователя с устройствами ввода/вывода данных и скоростью центрального процессора, или, иными словами, между интенсивностью поступления запросов и интенсивностью их обслуживания [7, 24–30 и др.]. На рисунке 1.1.1 представлен график обобщенной зависимости «доли» разделяемого ресурса (ЭВМ) f , которую пользователь ощущает как свою собственную в зависимости от числа терминалов пользователей N [27]. Точка $N=N^*$ характеризует «насыщение» системы [27].

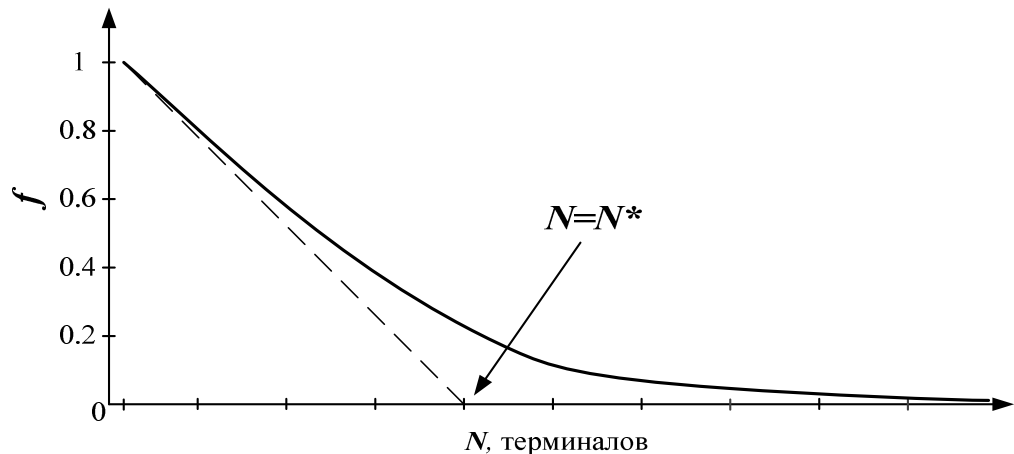


Рисунок 1.1.1 – «Доступность» разделяемого ресурса от числа терминалов пользователей

Как известно, применение *метода разделения времени* в вычислительной технике значительно снизило цену предоставления вычислительных мощностей, позволив образовательным, научно-исследовательским учреждениям, промышленным организациям и частным лицам использовать вычислительные мощности компьютера посредством удаленных терминалов на основе «аренды услуг» у поставщика, тем самым исключив необходимость приобретения ЭВМ [5, 7, 31]. Данная модель предоставления услуг, под которыми понимается доступ к вычислительным мощностям, получила название *utility computing* – вычисления как коммунальная услуга [31–34]. В 1970 г. доход индустрии *utility computing* для услуг, предоставляемых в интерактивном режиме, по некоторым данным [31, 35] составлял свыше 1,7 млрд долларов и охватывал

социальную, научную, производственную и другие сферы человеческой деятельности [5, 31, 36].

Анализ научных изданий показывает, что первые образцы вычислительных систем коллективного пользования характеризовались следующими основными недостатками [5, 7, 22, 31, 37]:

- уникальность терминалов пользователей и отсутствие возможности их работы с другими системами подобного класса;
- ограниченные возможности или полное отсутствие кроссплатформенности программного обеспечения;
- технические ограничения на объем предоставляемых услуг (оперативную память, дисковое пространство и пр.).

Развитие к концу XX столетия вычислительной техники, технологий программирования, автоматизированных систем, компьютерных сетей, Интернета и их внедрение во все сферы деятельности обусловило развитие информационного общества, основанного на производстве, хранении, переработке, реализации информации и его дальнейшей цифровой трансформации [31, 38–43]. На рисунке 1.1.2 приведены сводные хронологические зависимости числа пользователей сети Интернет, числа подключенных к сети Интернет некоторых групп вычислительных устройств и объема циркулирующего трафика, построенные на основе экспертных оценок, аналитических обзоров и отчетов [44–47]. Представленные зависимости демонстрируют существенное продвижение по пути развития информационного общества, что проявляется более чем в трехкратном росте численности пользователей Интернета в мире в период с 2005 по 2017 г., в увеличении в период с 2007 по 2017 г. приблизительно в 16 раз числа подключенных к Интернету устройств и росте более чем в 20 раз объема глобального интернет-трафика.

Развитие отрасли информационных технологий, с одной стороны, обусловило появление различных методологий и концепций, таких, например, как *ARIS*, *ERP*, *CAE*, *CALS* и пр., а также возникновение ряда технологий для решения прикладных задач в специализированных областях, таких, например, как *e-Commerce*, *e-Learning*, *e-Science*, беспроводные технологии, технологии виртуальных измерительных приборов, Интернет вещей и т.д. [48–52 и др.].

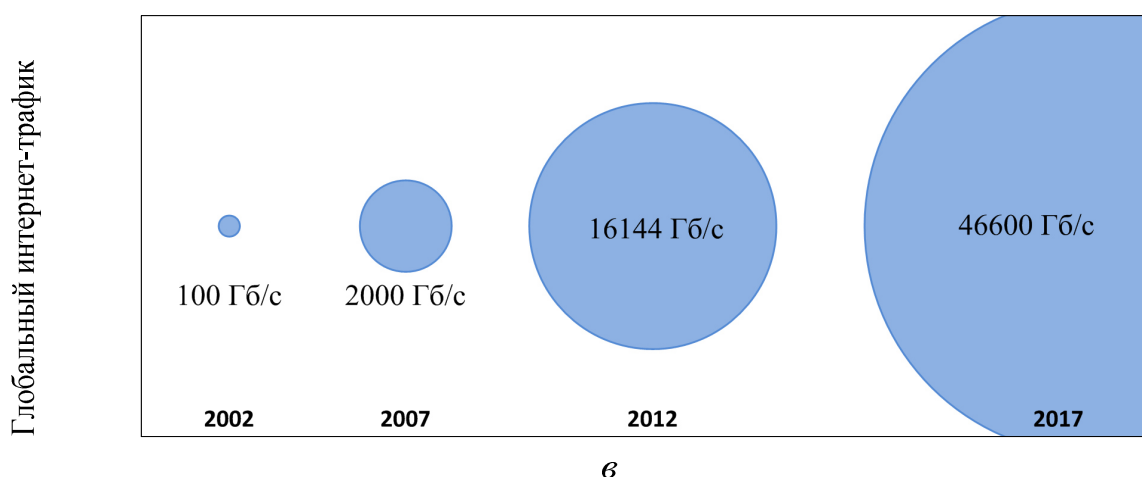
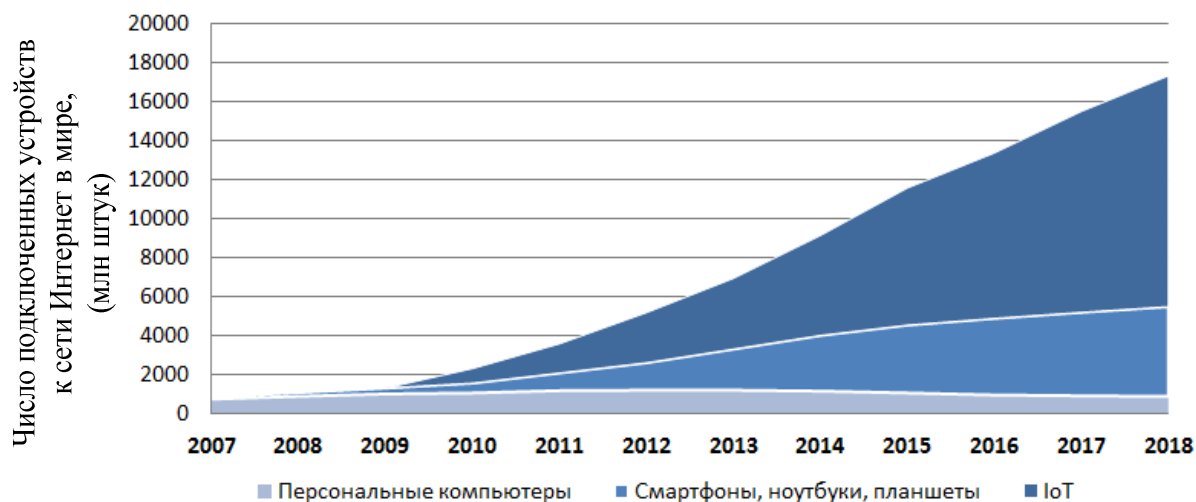
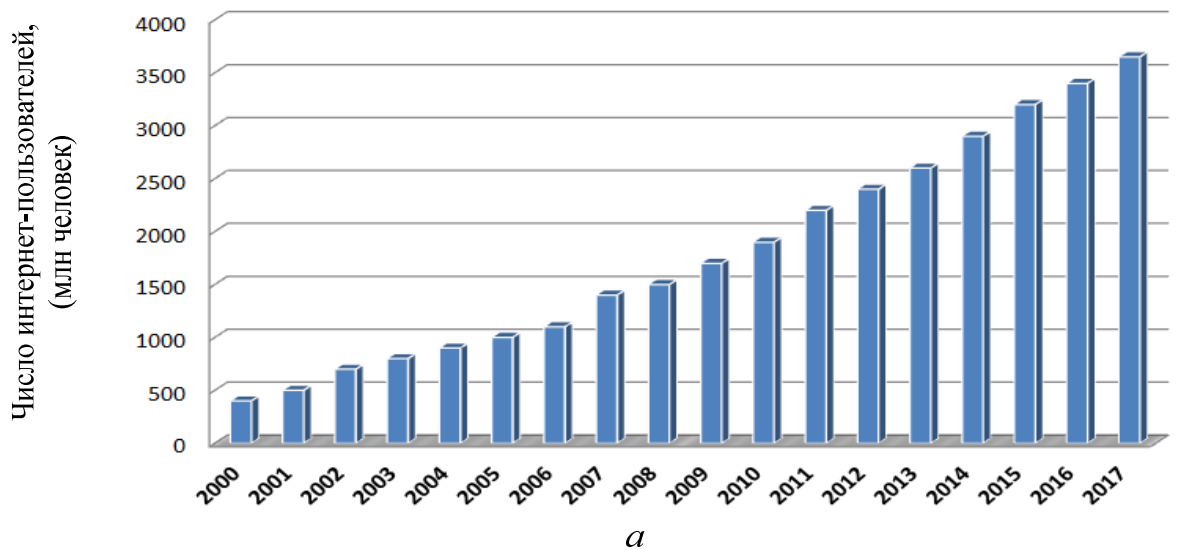


Рисунок 1.1.2 – Показатели развития информационного общества: *a* – численность пользователей сети Интернет в мире в период с 2000 по 2017 г.; *b* – численность подключенных к сети Интернет устройств в период с 2007 по 2018 г.; *в* – глобальный интернет-трафик

Однако, с другой стороны, это привело к существенному увеличению статьи расходов на техническое обслуживание ИТ-инфраструктуры и соответствующее программное обеспечение для крупных организаций. Данный факт способствовал, в свою очередь, появлению и развитию информационно-технологической концепции *cloud computing*, которая является эволюционным развитием вычислительных систем с разделением времени в рамках бизнес-модели *utility computing* [37, 53–56].

Концепция *cloud computing* обеспечила качественный технологический рывок вперед по сравнению с вычислительными системами коллективного пользования, существенно расширив перечень и объем предоставляемых услуг. Основные признаки и характеристики *cloud computing* определены Национальным институтом стандартов и технологий Министерства торговли Соединённых Штатов Америки (*NIST U.S. Department of Commerce*) [57–60]. В основе предоставления услуг *cloud computing* лежат ключевые технологии виртуализации (*virtualization*) и мультиарендности (*multitenancy*), которые, в свою очередь, реализованы в том числе на основе *метода разделения времени* [37, 54, 59–61].

В целом подход коллективного использования уникального ресурса, каким в 1960–1980 гг. являлась ЭВМ, на основе *метода разделения времени* также получил отдельное самостоятельное развитие в различных областях науки и техники, производственной, научно-исследовательской и учебной сферах деятельности. Однако практическая реализация данного метода в зависимости от разделяемого ресурса и сфер его прикладного применения характеризуется рядом отличительных особенностей, таких, например, как уровень структурной иерархии и реализуемый режим разделения. Результаты исследования данных особенностей рассмотрены в следующем пункте.

1.1.2 Анализ ключевых направлений прикладного применения метода разделения времени

Широко известны следующие прикладные сферы применения метода разделения времени: вычислительные системы, радиолокация, системы обработки информации, приборостроение, системы передачи информации, измерительные системы, автоматизированные системы управления технологическими процессами, автоматизированные системы экспериментальных исследований и др. [9, 12, 16, 18, 20, 62–84 и др.].

Рассмотрим характерные особенности реализации метода разделения времени в ряде соответствующих прикладных областей.

1.1.2.1 Радиолокация

Повышение пропускной способности радиолокационных станций в условиях усложнения решаемых ими задач обеспечивается на основе применения многоканальных радиолокационных станций (МРЛС). В соответствии с терминологией, принятой в [63], под многоканальной РЛС в рамках данного обзора понимается РЛС, которая обеспечивает выполнение своего функционального назначения при одновременном обнаружении и сопровождении («обслуживании») нескольких целей.

Появление данного качественно нового этапа развития радиолокационной техники – создания МРЛС с *временным разделением каналов* – обусловлено повышением функциональных возможностей, снижением стоимости вычислительной техники и фазированных антенных решеток [12, 63, 64]. Известны примеры применения метода разделения времени в стационарных РЛС, в том числе РЛС слежения за космическими объектами, подвижных наземных, авиационных бортовых и других РЛС [15, 63–66 и др.].

Как правило, метод временного разделения в радиолокации реализуется посредством периодического и кратковременного задействования одной радиолинии «передатчик – луч антенны – приемник» в целях получения информации от нескольких целей – *заявок* [63]. Этим самым обеспечивается независимое *квазиодновременное* прохождение информации от множества пространственно-разнесенных источников (целей) к потребителю (потребителям). Задачу распределения информации по каналам решают один или несколько сканирующих лучей антенны совместно с ЭВМ управления и обработки данных [63]. На рисунке 1.1.3 представлена упрощенная структурная схема МРЛС с временным разделением каналов на примере однолучевой МРЛС с фазированной антенной решеткой и электрическим управлением лучом по двум координатам [63].

Специфика применения метода разделения времени в радиолокации связана с наличием нескольких фаз обработок заявок [12, 63], для рассмотренного примера это поиск и обнаружение сигналов, обнаружение траекторий, сопровождение целей. Данный факт обуславливает соответствующие особенности алгоритма

функционирования ЭВМ управления и обработки данных – *алгоритма диспетчеризации* – в части управления соответствующим *разделяемым ресурсом* [63].

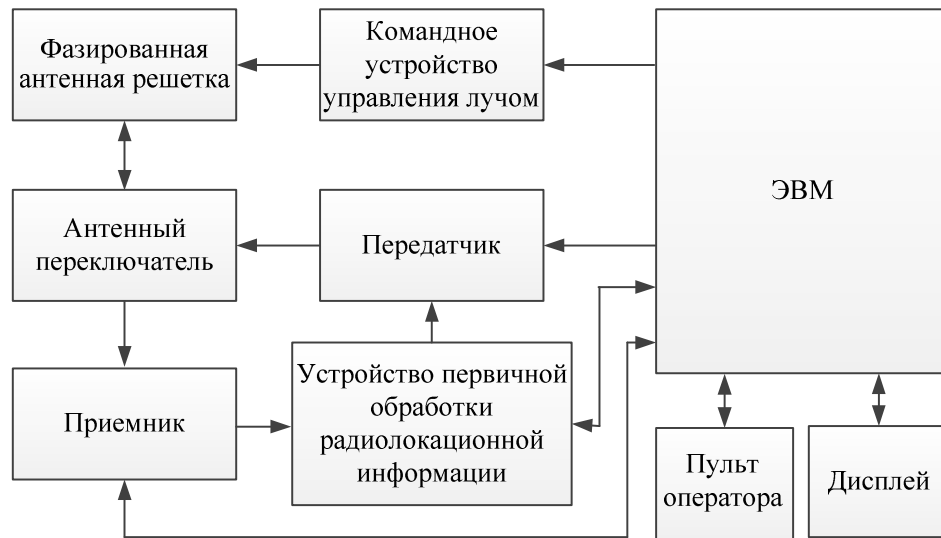


Рисунок 1.1.3 – Упрощенная структурная схема МРЛС ФАР

Более подробно вопросы управления МРЛС с временным разделением каналов, а также примеры анализа их функционирования как систем массового обслуживания подробно рассмотрены, например, в работах [12, 63, 67]. Применение метода разделения времени в радиолокационной технике позволяет повысить в несколько десятков раз пропускную способность РЛС, под которой принято понимать интенсивность потока обслуженных целей с показателями качества не ниже требуемых [63].

1.1.2.2 Системы передачи информации

Ограничения на частотный, временной, энергетический и пространственный ресурсы линий передачи информации (линий связи) обуславливают необходимость решения актуальной задачи организации оперативного обмена данными в системах различного назначения (в том числе и в автоматизированных системах) посредством эффективного использования доступного ресурса [1, 3, 9, 14, 16, 68].

Для решения обозначенной задачи в теории электрической связи широко применяют методы мультиплексирования или разделения каналов, в том числе основанные на методе разделения времени [3, 9, 68]. Временное разделение каналов, или *Time Division Multiplexing (TDM)*, заключается в осуществлении поочередной

передачи по общей линии связи элементов, отсчетов, пакетов i -го канала в неперекрывающиеся интервалы времени, свободные от сигналов других каналов [68, 69]. Для описания данного подхода также используется термин «временное уплотнение каналов» [68].

В соответствии с принципами организации доступа к линии связи принято различать синхронный и асинхронный режимы временного разделения [3, 9, 14, 68, 69]:

- в асинхронном режиме каждый пользователь занимает линию при возникновении потребности в передаче информации – *системы с предоставлением доступа по требованию*;
- в синхронном режиме каждый информационных поток, формируемый пользователем, получает доступ к линии связи периодически на фиксированный промежуток времени независимо от потребностей – *системы с фиксированным разделением*.

Развитием принципа *TDM* в радиосвязи и системах передачи цифровой информации стали технология множественного доступа с разделением по времени – *Time Division Multiple Access (TDMA)* [3, 9, 70], а также комбинированная гибридная технология доступа – *Frequency Time Division Multiple Access (FTDMA)*, получившая широкое распространение в мобильной связи [9, 68, 71]. Подробная классификация методов множественного доступа в системах передачи информации рассмотрена, например, в работах [1, 16, 68, 69].

Как отмечено в [9, 14], фиксированное закрепление ресурса не обеспечивает полное удовлетворение потребностей пользователей (абонентов) в условиях их динамического изменения. Указанного недостатка позволяет избежать метод предоставления ресурсов (каналов) по требованию. В свою очередь, предоставление ресурсов по требованию предполагает решение ряда технических задач и разработку алгоритмов распределения и управления доступом к разделяемому ресурсу – *алгоритмов диспетчеризации* [14, 92]. Примерами управления доступом и разрешения коллизий при случайном доступе в каналах связи являются методы *ALOHA*, *S-ALOHA*, *R-ALOHA* [14].

На рисунке 1.1.4 приведена обобщенная структурная схема космической системы связи, построенной на основе подхода совместного использования технологии *TDMA* и спутниковой коммутации [14]. В данной системе на основе алгоритма маршрутизации,

закладываемого земной станцией управления, осуществляется циклическое изменение состояний коммутационной матрицы полезной нагрузки КА, тем самым в каждый момент коммутации обеспечивается связь отдельных лучей для передачи информации между станциями, терминалами и пр. [14].

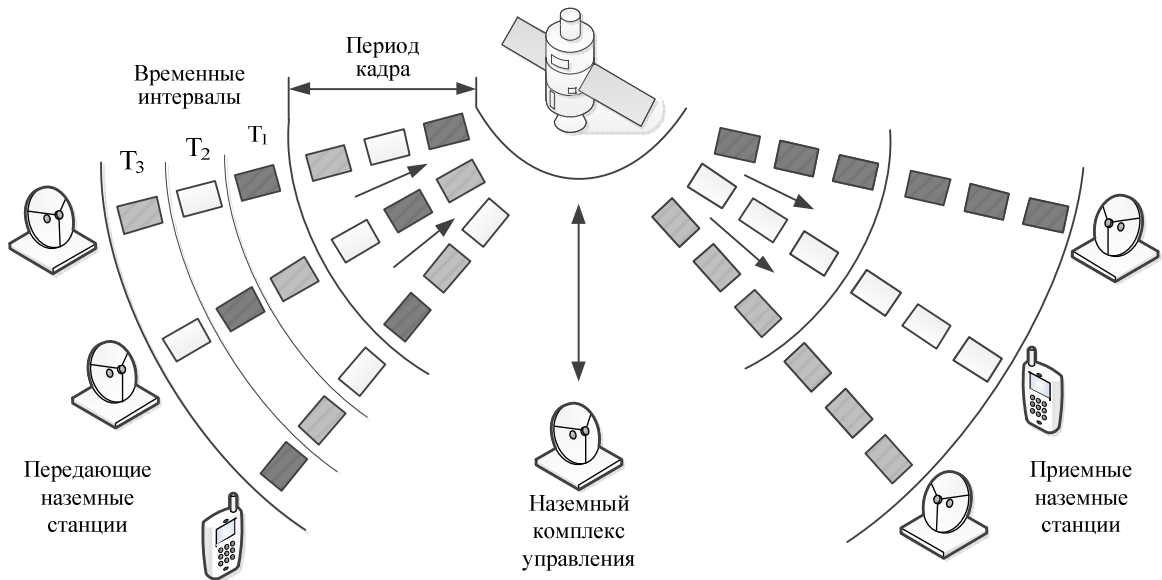


Рисунок 1.1.4 – Обобщенная структурная схема космической системы связи на основе TDMA со спутниковой коммутацией на примере коммутации трех лучей

Рассмотренная система реализует возможность установления абонентской связи между несколькими отдельными лучами, обеспечивающими покрытие разных территориально распределенных регионов [14].

Вопросам построения моделей, исследования средствами математического моделирования вероятностно-временных характеристик, оценки производительности и качества обслуживания в системах передачи цифровой информации с использованием временного разделения каналов в настоящее время посвящено достаточно много работ, например [14, 72–75 и др.].

Как показывает анализ, применение метода разделения времени в системах передачи информации обеспечивает повышение эффективности использования ресурсов линий и каналов связи, что обуславливает его широкое прикладное применение в радиорелейной, мобильной, спутниковой связи, вычислительных сетях, многоканальной телефонии, беспроводной связи и т.д. [1, 3, 9, 14, 16, 68, 76, 84 и др.]. В качестве примеров практической реализации в рассмотренной области можно отметить: стандарты беспроводной связи *IEEE 802.11 (Wi-Fi)*, *802.16 (Wi-Max)*, *GSM*, *TDMA (ANSI-*

136), космические системы персональной связи *Iridium*, *IntelSAT*, *Orbcomm*, *ICO*, «Гонец» [3, 9, 14, 77]. При этом телефонные, кабельные и вычислительные сети, приемно-передающие тракты полезной нагрузки космических аппаратов связи и прочие элементы информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, выступающие в качестве разделяемого ресурса, представляется возможным рассматривать как ресурсы, предоставляемые на основе концепции *мультиарендности*.

1.1.2.3 Приборостроение

В данном подпункте выполнен анализ радиоэлектронных средств, которые, по мнению соискателя, целесообразно рассмотреть в качестве укрупненной группы «Приборостроение».

В сканирующем приемнике, представленном в [78], обеспечивается сканирование predeterminedного множества частот в режиме разделения времени, тем самым реализуется возможность непрерывного слежения оператором за сигналами эфира. При этом для одного значения заданной частоты осуществляется воспроизведение сигнала, а для других частот – индикация факта их наличия в эфире. Обобщенная структурная схема устройства представлена на рисунке 1.1.5.

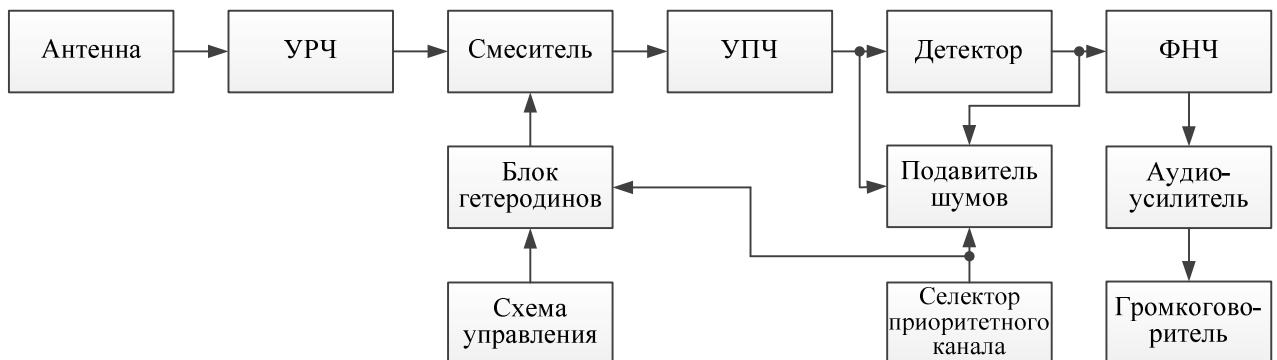


Рисунок 1.1.5 – Обобщенная структурная схема сканирующего приемника

В данном устройстве по отношению к радиочастотному усилителю, смесителю, усилителю промежуточной частоты и детектору реализуется синхронный режим разделения времени, что обеспечивает дополнительные функциональные возможности устройства по обнаружению сигналов.

Одним из примеров устройств, применяющих метод разделения времени, в области медицинского приборостроения является многополюсный аппарат реографии

сердца, реализующий возможность динамической адаптации конфигурации электродов для различных физиологических измерений. Обобщенная структурная схема устройства представлена на рисунке 1.1.6 [79].

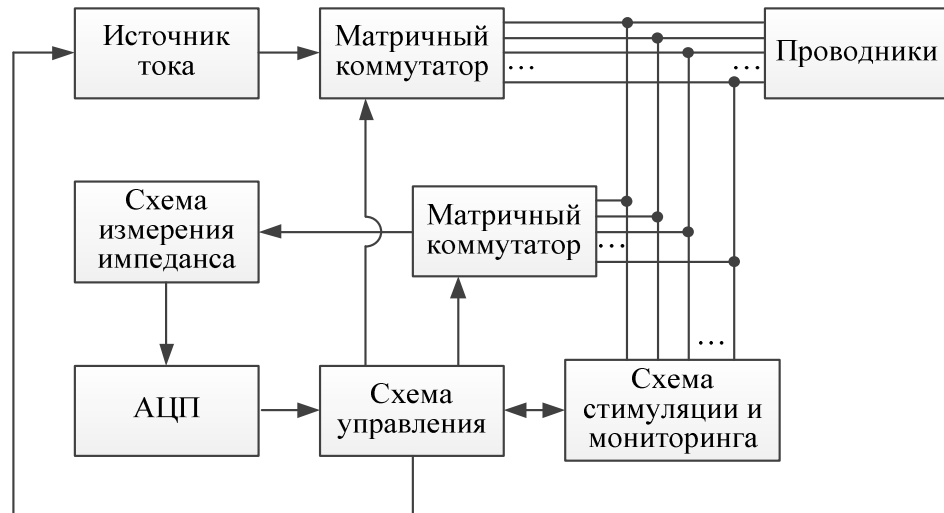


Рисунок 1.1.6 – Многополюсный аппарат реографии сердца

В данном устройстве применение метода разделения времени позволяет расширить функциональные возможности прибора в части обеспечения возможности использования подключенных электродов в качестве датчиков для измерений или в целях выдачи импульсов тока [79].

Известны примеры использования метода разделения времени в основе функционирования аппаратуры физико-химических методов анализа [80–72]. В работе [83], например, описана оптическая инструментальная система с разделением времени для применения в устройствах флуориметрии, рефлектометрии и многоканальной спектрофотометрии.

Общей характерной особенностью рассмотренных в данном подпункте устройств является применение синхронного режима разделения времени, обусловленное заданной временной определенностью выполнения функциональных операций: перестройки тракта и обнаружения сигналов; измерения сопротивления и выдачи импульсов; измерения интенсивности светового потока и пр. Синхронный режим разделения времени реализуется соответствующими функциональными узлами или схемами управления [70–75], данные узлы или схемы функционируют на основе заданного алгоритма распределения и планирования – *алгоритма диспетчеризации*.

1.1.3 Автоматизированные системы экспериментальных исследований с временным разделением

Внедрение в измерительные системы (ИС) средств вычислительной техники обусловило поэтапное развитие направления компьютеризации измерений [85] и способствовало созданию соответствующих автоматизированных измерительных и управляющих систем, лежащих в основе автоматизированных систем экспериментальных исследований (АСЭИ). Стремительное развитие компьютерных измерительных технологий, использующих ЭВМ как элемент измерительно-управляющей системы в процессе управления объектами, а также на всех этапах сбора, обработки, отображения информации способствовало тесной интеграции рассматриваемых систем с телекоммуникационными в рамках процессов автоматизации экспериментальных исследований в различных прикладных областях [86–88].

В 1980-е гг. широкое распространение получил подход применения одной ЭВМ для одновременного «обслуживания» нескольких экспериментальных установок, приборов, станков и т. д. В данных АСЭИ, которые также в ряде источников называют «системами коллективного пользования» или «многомашинными», *разделяемым ресурсом* является ЭВМ, выполняющая задачи управления и обработки данных [89, 90]. Для этих систем актуальными являются проблемы, связанные с организацией диалогового режима работы с оператором, организацией очередей, установлением приоритетов и пр. [90, 91]. Обобщенную структурную схему АСЭИ с разделением ЭВМ можно представить в соответствии с рисунком 1.1.7 [89, 92].

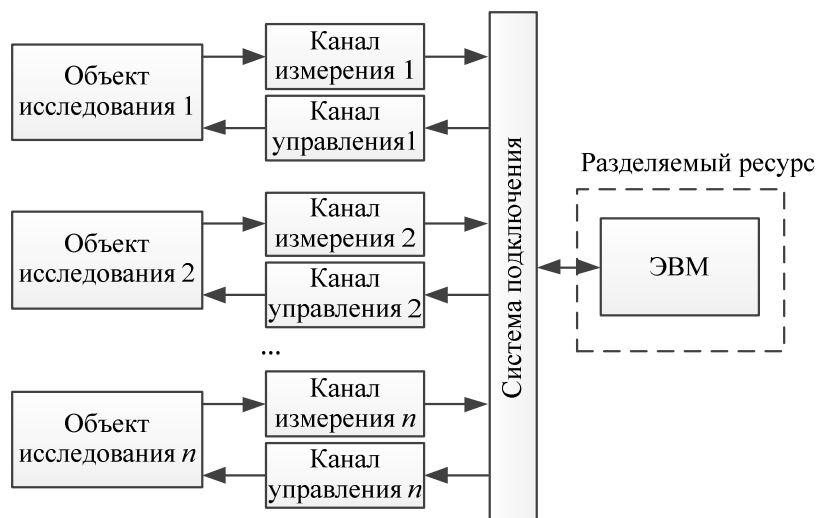


Рисунок 1.1.7 – Обобщенная структурная схема автоматизированной системы экспериментальных исследований с разделением ЭВМ

Одним из характерных примеров реализации этого подхода является многопользовательская система анализа фотографии треков с пузырьковых камер, рассмотренная в [93]. В данной системе операторами с просмотровых столов осуществляется выдача в центральную ЭВМ управляющей информации и запросов на обслуживание (обработку). Также к автоматизированным системам с разделением ЭВМ можно отнести системы, описанные в [18, 90, 94–97].

Вопросы синтеза измерительно-вычислительных систем, теория и применение измерительных информационных систем на основе ЭВМ рассмотрены, например в [98]. Анализ функционирования автоматизированных систем с разделением ЭВМ как систем массового обслуживания, оценка их пропускной способности и задержки обработки запросов представлены, например, в [90, 99, 100].

К общим предпосылкам широкого использования АСЭИ с разделением ЭВМ относят внедрение новых методик измерений, сокращение времени проведения экспериментов, необходимость повышения аппаратной загрузки и использования вычислительных и программных средств. В дальнейшем данный подход позволил осуществить переход к распределённой обработке, автономному сбору и полной централизации накопления измерительной информации, при которых функции первичной обработки и управления выполнялись на малых ЭВМ, а функции сложной обработки и решения сложных математических задач реализовывала централизованная ЭВМ в режиме разделения времени [2]. В качестве примера реализации данного подхода можно отметить системы, рассмотренные в [101, 102].

Характерным подходом реализации разделения времени в ИС как элементах АСЭИ является использование одного измерительного канала (тракта) посредством его коммутации для ввода сигналов в ЭВМ или отображения на устройствах индикации. В литературе данные системы называют многоточечными ИС, или ИС последовательно-параллельного действия [20, 62, 85, 91, 103]. На рисунке 1.1.8 приведен пример построения ИС последовательно-параллельного действия [62, 104].

Управление коммутацией входных сигналов от источников к нормирующему усилителю осуществляется на основе схемы управления (см. рисунок 1.1.8) или непосредственно от ЭВМ в соответствии с реализуемым алгоритмом диспетчеризации. Как правило, для ИС последовательно-параллельного действия характерен синхронный режим временного разделения, необходимость применения которого может быть

обусловлена, например, требованиями к дискретному представлению входных сигналов в соответствии с теоремой Котельникова или заданным темпом обновления измерительной информации [20, 62, 105].

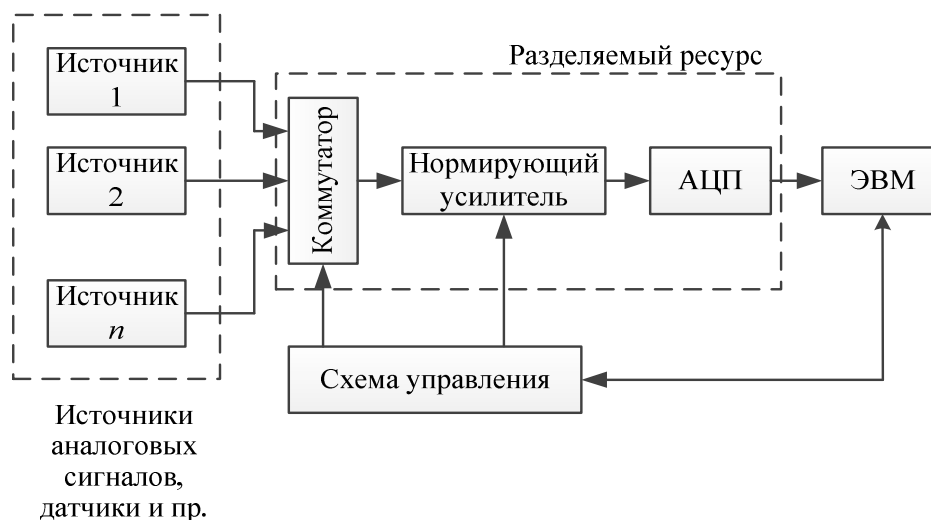


Рисунок 1.1.8 – Типовая структура автоматизированной измерительной системы с общим измерительным каналом

Результаты исследования приоритетных алгоритмов временного разделения измерительного канала для различных по частотным свойствам сигналов приведены в [62]. На рисунке 1.1.9 представлен пример графика нормированной зависимости эффективности приоритетного алгоритма временного разделения каналов в ИС по сравнению с безприоритетным, которая оценена на основе коэффициента пропорциональности K [62]:

$$K = N_a \cdot f_{\max} \left[N_a \cdot f_{\max} - \sum_{i=1}^{N_a} (f_{\max} - f_i) \right]^{-1}, \quad (1.1.1)$$

где N_a – число активных каналов; f_i – требуемые частоты опроса каналов; $f_{\max} = \max\{f_i\}$.

С разделением общего измерительного канала построены, например, многофункциональные устройства сбора данных M -серии компании *National Instruments* [106], а также системы, рассмотренные в [62, 107, 108].

К одному из первых образцов АСЭИ с *временным разделением ресурсов системы в целом* между несколькими пользователями или операторами можно отнести

многopользовательскую систему электронного сканирующего микроскопа, разработанную в университете штата Айова [109].

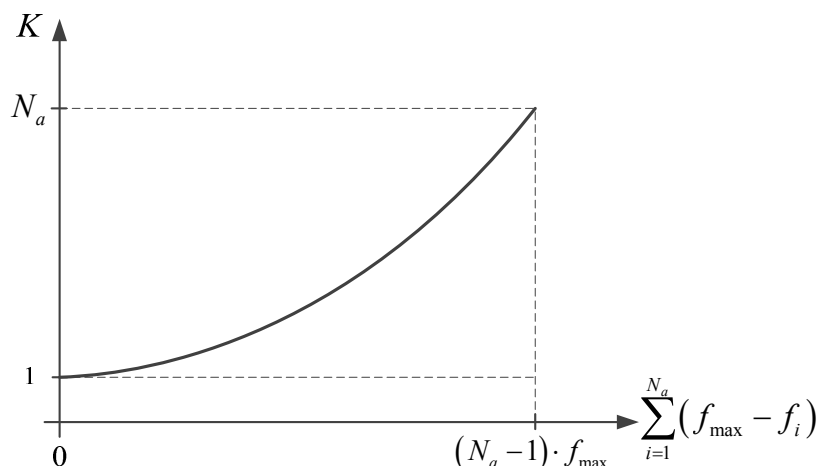


Рисунок 1.1.9 – Зависимость отношения пропускных способностей ИС с приоритетным и безприоритетным алгоритмами временного разделения от разности частот входных аналоговых сигналов

Обобщенная структурная схема данной системы приведена на рисунке 1.1.10. В ней *асинхронный режим временного разделения* реализуется посредством обеспечения интерактивного доступа к микроскопу по локальной сети с четырех рабочих станций [109].

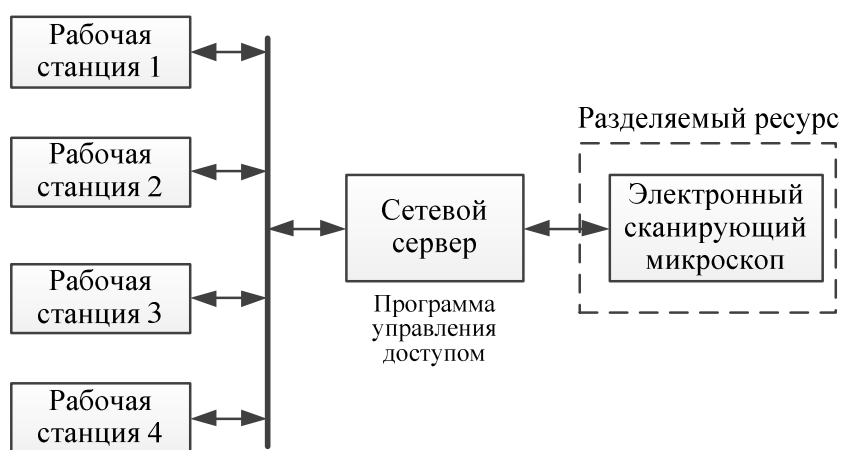


Рисунок 1.1.10 – Обобщенная структурная схема многопользовательской системы электронного сканирующего микроскопа

Также в рамках данного подхода Физическим институтом имени П. Н. Лебедева РАН создан рабочий макет многопользовательского базового автоматизированного радиотелескопа на основе 16 лучевой большой синфазной антенны [110]. В работе [111]

предложена архитектура многопользовательского многолучевого радиотелескопа с возможностью одновременного предоставления пользователям 256 сигнальных выходов антенны.

Системы с временным разделением ресурсов АСЭИ между несколькими пользователями (операторами) принято называть *многопользовательскими* [109–114]. Примерами *многопользовательских* АСЭИ являются и системы, рассмотренные в [10, 88, 115–120].

Исследования показывают, что в автоматизированных системах экспериментальных исследований также широкое распространение получило совместное (комбинированное) применение рассмотренных подходов временного разделения. Например, *внутреннее асинхронное* разделение ЭВМ на уровне общего управления и обработки данных совместно с *внутренним синхронным* разделением измерительного тракта при сборе информации с датчиков [2, 62, 85] или *внешнее асинхронное* разделение ресурсов АСЭИ между несколькими пользователями совместно с *внутренним асинхронным* разделением ЭВМ, *синхронным* разделением измерительных и управляющих каналов [121–126]. Результаты анализа особенностей реализации метода разделения времени на примерах рассмотренных прикладных областей сведены в таблицу 1.1.1

Таблица 1.1.1 Анализ особенностей реализации метода разделения времени

Режим временного разделения	Уровень структурной иерархии	
	<i>Внутреннее разделение</i>	<i>Внешнее и комбинированное разделение</i>
<i>Синхронный</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Радиолокация • Системы передачи информации • Приборостроение • Измерительные системы 	<ul style="list-style-type: none"> • Автоматизированные системы экспериментальных исследований
<i>Асинхронный</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Системы передачи информации • Измерительные системы 	<ul style="list-style-type: none"> • Автоматизированные системы экспериментальных исследований

Разносторонность подходов к применению метода разделения времени в АСЭИ, многообразие применяемой в научных изданиях терминологии обуславливает необходимость проведения систематизации типов АСЭИ, функционирующих на основе метода разделения времени, а также конкретизации определения применяемого к ним термина «*многопользовательская*».

Анализ основных подходов применения метода разделения времени в АСЭИ, выявил наличие нескольких уровней структурной иерархии его реализации, а также использование нескольких основных режимов распределения и управления доступом к разделяемому ресурсу. Результаты проведенного анализа позволили для АСЭИ с временным разделением определить следующие основные признаки их классификации:

- уровень структурной иерархии реализации временного разделения;
- реализуемый режим временного разделения.

По признаку «уровень структурной иерархии» предлагается выделять следующие виды АСЭИ с временным разделением [20, 25, 85]:

- с внутренним разделением;
- с внешним разделением;
- с разделением комбинированного типа.

К АСЭИ с *внутренним временным разделением* будем относить системы, в которых реализуется разделение отдельных функциональных узлов и устройств. Например, системы с разделением ЭВМ между множеством каналов измерения и управления (см. рисунок 1.1.7); системы с разделением общих измерительных каналов или каналов управления (см. рисунок 1.1.8).

К АСЭИ с *внешним временным разделением* относятся системы, в которых разделение ресурсов системы реализуется по отношению к множеству рабочих мест и/или терминалов пользователей. То есть с каждого терминала посредством специализированных программных и аппаратных средств обеспечивается *квазиодновременная* интерактивная работа с системой в части выполнения индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий операторов, пользователей по их запросу [109, 115, 117, 123 и пр.].

К АСЭИ с *временным разделением комбинированного типа* отнесены системы, в которых при *внешнем разделении* ресурсов системы по отношению к множеству

рабочих мест, терминалов пользователей также реализуется *внутреннее разделение* ее функциональных узлов и/или устройств [121, 122].

При этом, как показали проведенные исследования, по аналогии с системами передачи информации и вычислительными системами коллективного пользования [3, 5, 9, 127] применительно к АСЭИ целесообразно выделять следующие *режимы* распределения и управления доступом к их разделяемым ресурсам:

- *фиксированного доступа (или синхронный режим);*
- *случайного доступа (или асинхронный режим).*

Вариант структуры классификации автоматизированных систем экспериментальных исследований с временным разделением приведен на рисунке 1.1.11.

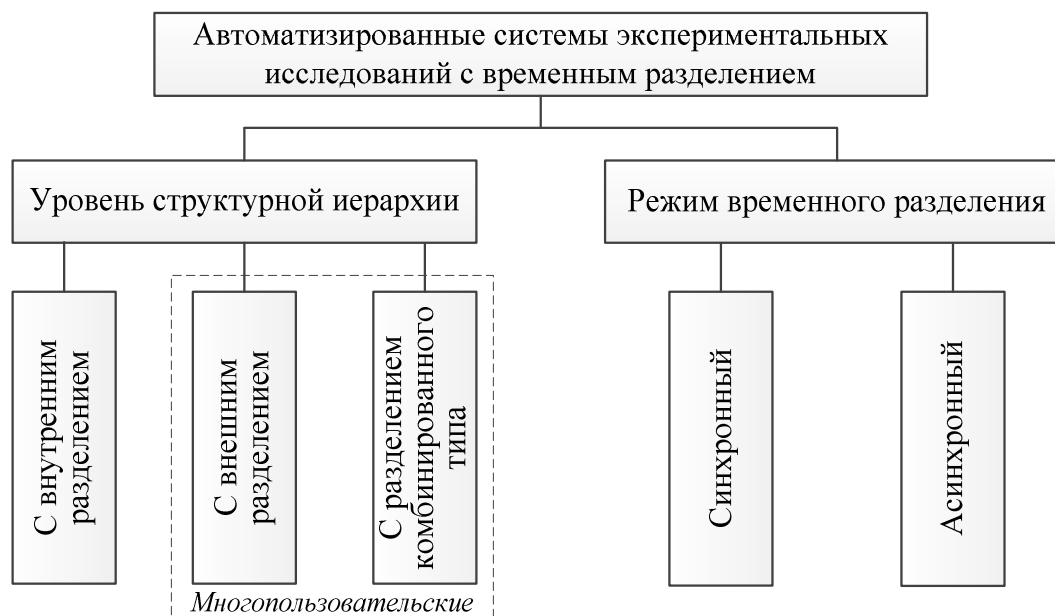


Рисунок 1.1.11 – Базовая классификация АСЭИ с временным разделением аппаратно-программных ресурсов

Как известно, в процессе решения производственных, научно-исследовательских и учебных задач широкое применение получили автоматизированные системы и АСЭИ в частности, обеспечивающие дистанционный контроль и управление, *распределенные измерительно-управляющие системы (РИУС)* [1, 21, 22, 26, 125, 128, 129], в том числе функционирующие с временным разделением [20, 62, 89, 95, 99] и, в частности, *многопользовательские РИУС* [88, 93, 109–123, 128, 130–132 и др.]. Автоматизированные системы экспериментальных исследований с *внешним временным разделением* и с

временным разделением комбинированного типа, далее в рамках диссертационного исследования описываются обобщенным термином «*многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы*» (МРИУС).

Таким образом, по аналогии с вычислительными системами коллективного пользования в рамках диссертационной работы, под МРИУС понимается автоматизированная система экспериментальных исследований, функционирующая с внешним асинхронным временным разделением ресурсов между несколькими пользователями и обеспечивающая выполнение их индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий в удаленном интерактивном диалоговом режиме [5, 36, 61, 111, 117, 120, 125, 126, 128 и др.]. При этом в соответствии с ГОСТ 15971–90 «Системы обработки информации. Термины и определения» под интерактивным диалоговым режимом функционирования понимается способность системы обрабатывать задания в приемлемом для пользователя оперативном темпе [5, 132].

Проведенный анализ характерных отличительных особенностей МРИУС обуславливает необходимость детального ее рассмотрения как с позиции автоматизированной системы экспериментальных исследований, реализующей заданные функциональные операции (измерительно-управляющей системы), так и с позиции системы массового обслуживания, реализующей выполнение конфигурационных и измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме на основе ее разделяемых ресурсов.

1.2 Многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы как объект диссертационного исследования

Рассмотрим обобщенный состав аппаратно-программных компонентов МРИУС, их функциональное назначение и общий алгоритм взаимодействия при выполнении конфигурационных и измерительных заданий пользователей.

1.2.1 Обобщенная структурная схема построения МРИУС

Как было показано в пункте 1.1.3, в МРИУС по отношению к пользователю (оператору) реализуется интерактивный диалоговый режим работы с разделяемым ресурсом, в качестве которого выступают ЭВМ, каналы измерения, каналы управления,

объекты экспериментального исследования (объекты измерения, управления и контроля, испытаний) и пр. Возможные коллизии при одновременном обращении или обращении в момент занятости разделяемого ресурса решаются на основе predetermined алгоритма диспетчеризации. В общем случае в МРИУС формирование и вывод управляющих воздействий может осуществляться как непосредственно на объект управления и контроля, так и на каналы измерения и управления в целях изменения их конфигурации [2, 91, 115, 116, 122, 123]. Таким образом, обобщенную структурную схему МРИУС можно представить в соответствии с рисунком 1.2.1 [20, 91, 126, 133].

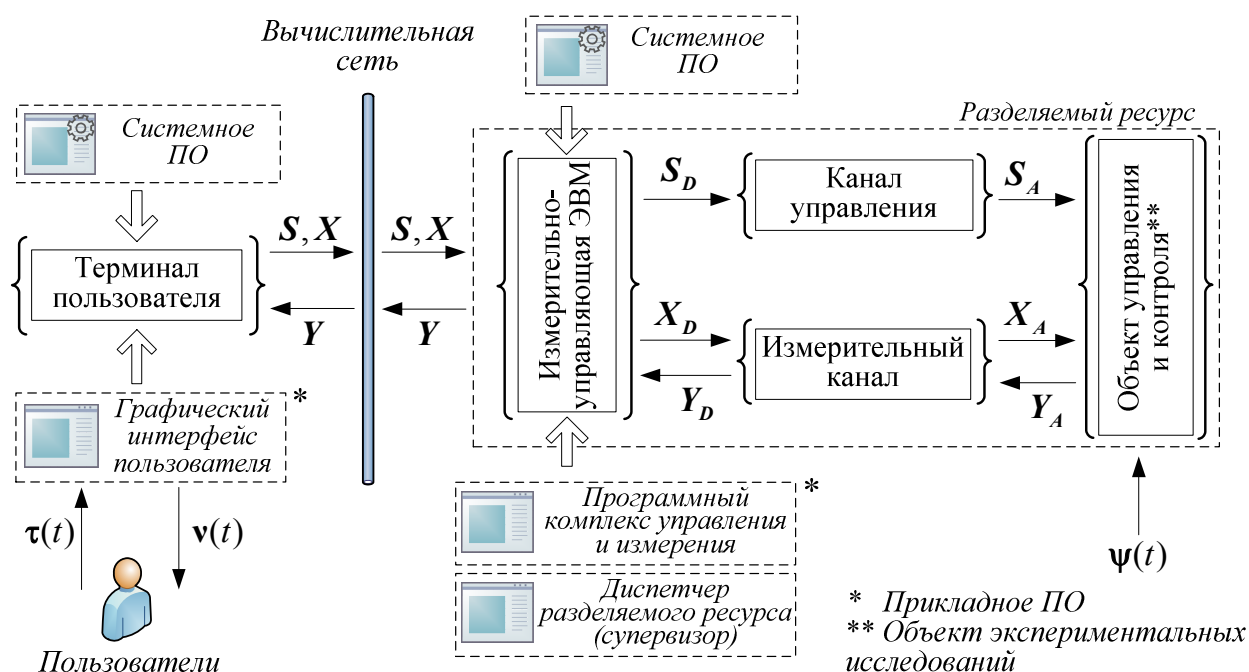


Рисунок 1.2.1 – Обобщенная структурная схема построения многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы: S – множество формируемых параметров управляющих воздействий на объект управления и контроля; S_D – множество параметров сигналов управления, представленных в цифровом виде; S_A – множество физических воздействий на объект управления и контроля, изменяющих его техническое состояние; X – множество измеряемых параметров и характеристик объект управления и контроля; X_D – множество параметров тестирующих сигналов, представленных в цифровом виде; X_A – измерительные и тестовые сигналы; Y_A – измеряемые физические величины, сигналы, характеризующие состояние и свойства объекта управления и контроля; Y_D – измеряемые физические величины, сигналы, представленные в цифровом виде; Y – множество измеряемых физических величин, сигналов, характеристик и зависимостей; $\tau(t)$ – вектор воздействий пользователей; $v(t)$ – вектор информации об объекте управления и контроля; $\psi(t)$ – вектор внешних физических воздействий

Рассмотрим функции и назначения основных компонентов МРИУС в соответствии с представленной на рисунке 1.2.1 обобщенной структурной схемой.

Программное обеспечение (ПО) МРИУС в целях систематизации разделяется на следующие функциональные группы [134] (рисунок 1.2.2):

- системное ПО;
- прикладное ПО;
- диспетчер разделяемого ресурса.



Рисунок 1.2.2 – Структурная схема базовой классификации программного обеспечения МРИУС

Системное программное обеспечение (СПО) МРИУС включает в свой состав следующие компоненты:

- СПО терминала пользователя;
- СПО измерительно-управляющей ЭВМ.

Системное программное обеспечение соответствующего аппаратного компонента формирует программную среду для функционирования относящегося к нему прикладного ПО и, как правило, представлено различными операционными системами [135, 136]. Как показали исследования, основным вариантом организации взаимодействия пользователя с разделяемым ресурсом МРИУС является графический интерфейс пользователя на основе устройств вычислительной техники [120–122, 137–143 и др.].

В соответствии с этим прикладное программное обеспечение МРИУС включает в свой состав следующие компоненты:

- прикладное ПО терминала пользователя – *графический интерфейс пользователя* (ГИП);
- прикладное ПО измерительно-управляющей ЭВМ – *программный комплекс управления и измерения* [88, 115, 117, 119, 128].

Диспетчер разделяемого ресурса выделен в качестве отдельного составного компонента программного обеспечения МРИУС [134].

В дальнейшем в рамках диссертационного исследования под терминалом пользователя (оператора) понимается ПЭВМ или любое устройство вычислительной техники (ноутбук, планшет, смартфон и т.д.), оснащенное ГИП, посредством формирования заданий на основе которого осуществляется работа с разделяемым ресурсом МРИУС.

Функциональные возможности ГИП в МРИУС обеспечивают:

- формирование состава и установку параметров управляющих воздействий, тестовых сигналов, измеряемых параметров и характеристик (множества S и X – см. рисунок 1.2.1);
- прием и обработку результатов измерений, представленных множеством Y , их цифровое и графическое отображение, а также при необходимости сохранение результатов измерений, формирование отчетов и другие вспомогательные функции (например, курсорные измерения, графическая обработка результатов измерения и пр.).

Как правило, ГИП реализуют с использованием специализированных сред, позволяющих синтезировать на экране дисплея панели, оперируя графическими представлениями органов управления и отображения процессов (рисунок 1.2.3) [88, 142, 144].

Графическим представлениям, в свою очередь, соответствуют алгоритмы управления измерительными каналами и каналами управления МРИУС, реализуемые *программным комплексом управления и измерения*, который функционирует на *измерительно-управляющей ЭВМ* (ИУ ЭВМ). Измерительно-управляющая ЭВМ является вычислительным компонентом МРИУС [126].

Подготовленное задание с терминала пользователя передается на *измерительно-управляющую ЭВМ* по каналу связи, в качестве которого выступает, например, вычислительная сеть.

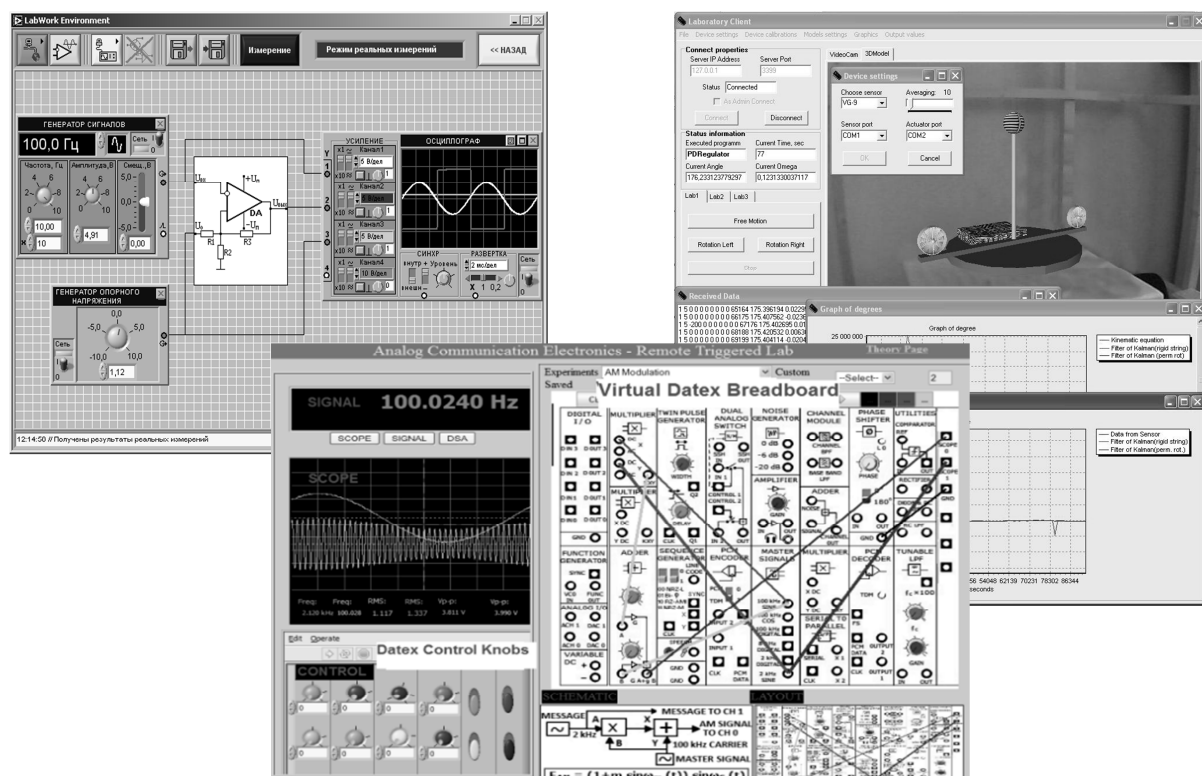


Рисунок 1.2.3 – Примеры практической реализации графического интерфейса пользователя

Разрешение конфликтов в работе аппаратных компонентов МРИУС при совместном доступе операторов с разных терминалов пользователей выполняется диспетчером разделяемого ресурса – специализированным программным модулем, функционирующим на измерительно-управляющей ЭВМ и обеспечивающим буферизацию и организацию очередности обработки поступающих заданий. В качестве базового алгоритма диспетчеризации в МРИУС, который получил на текущий момент наиболее широкое практическое применение, является алгоритм буферизации и обработки заданий в порядке их поступления – *FIFO* [128, 145, 139–142, 145, 147].

Измерительно-управляющая ЭВМ (см. рисунок 1.2.1) согласно поступившему заданию на основе программного комплекса управления и измерения осуществляет формирование параметров сигналов управления (множество S_D) и при необходимости тестовых сигналов (множество X_D), считывание значений измеряемых физических величин, сигналов (множество Y_D), передачу массива результатов измерения обратно на соответствующий терминал пользователя. В некоторых случаях на программный комплекс управления и измерения возлагают функции первичной обработки результатов измерения, представленных множеством Y_D (фильтрация, прореживание, усреднение и т. д.).

Измеряемые параметры *объекта управления и контроля* (ОУиК) (напряжения, токи, температуры, частота вращения, уровень вибрации и т. д.) поступают в *измерительный канал* (КИ) (рисунок 1.2.1), который в своем составе в общем случае содержит:

- первичные измерительные преобразователи – датчики, которые преобразуют физические величины (множество Y_A) в напряжение, ток или напрямую в цифровой код (множество Y_D) [6];
- устройства сопряжения (вторичные измерительные преобразователи), обеспечивающие приведение сигналов с датчиков к входному динамическому диапазону устройств оцифровки [6];
- устройства оцифровки, осуществляющие преобразование аналоговых сигналов в цифровой код (множество Y_D);
- технические средства, обеспечивающие вывод тестовых сигналов (множество X_A), по откликам на которые определяются параметры и/или характеристики *объекта управления и контроля*.

Канал управления (КУ) (рисунок 1.2.1), как правило, в своем составе содержит:

- исполнительные устройства, обеспечивающие преобразование параметров сигналов управления (множество S_D), поступающих с *измерительно-управляющей ЭВМ*, в управляющие воздействия (множество S_A), выводимые на объект управления и контроля, и обеспечивающие изменение его состояния и/или конфигурации;
- интерфейсные модули для формирования и вывода команд управления на объект управления и контроля при использовании стандартных цифровых интерфейсов [98, 115–119 и др.].

Укрупненная структурная схема представления функционирования МРИУС на основе модели «*черного ящика*» приведена на рисунке 1.2.4 [148, 149].

Процесс $\tau(t)$ соответствует *входящему потоку заданий*, поступающих от пользователей, процесс $\nu(t)$ является *выходящим потоком заданий* [150, 170]. Процесс $\Psi(t)$ характеризует влияние внешней среды на разделяемый ресурс в целом и является одним из источников погрешности измерений, выполняемых при сборе данных с ОУиК.

При этом в ряде случаев внешний процесс $\Psi(t)$ может являться предметом проводимых исследований и испытаний, то есть по характеру его влияния на разделяемый ресурс осуществляется оценка характеристик данного процесса [152, 153].

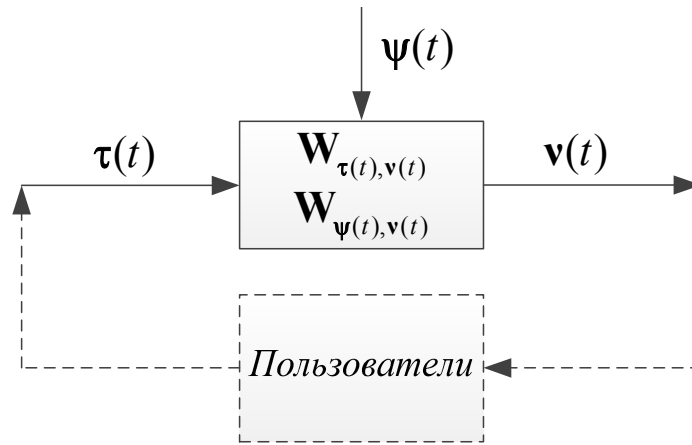


Рисунок 1.2.4 – Укрупненная структурная схема МРИУС

Процесс выполнения заданий в МРИУС описывается функциями $W_{\tau(t),v(t)}$ и $W_{\psi(t),v(t)}$, которые обобщенно характеризуют соответствующие функциональные преобразования, выполняемые в соответствии с обрабатываемым заданием на основе внутренней структуры МРИУС как АСЭИ (измерительно-управляющей системы) (см. рисунок 1.2.1).

В процессе взаимодействия с разделяемым ресурсом МРИУС пользователями формируется входящий поток конфигурационных и измерительных заданий, осуществляется обработка и интерпретация выходящего потока результатов в соответствии с совокупностью решаемых функциональных (или измерительных) задач (см. рисунок 1.2.1). Под измерительной задачей понимается задача, заключающаяся в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений [125]. Таким образом, МРИУС как объект диссертационного исследования характеризуется двойственной спецификой ее процесса функционирования:

- по отношению к совокупности терминалов пользователей МРИУС функционирует как система массового обслуживания (СМО);
- в процессе выполнения заданий – как автоматизированная система экспериментальных исследований.

В общем случае входящий поток заданий $\tau(t)$ носит случайный характер [150, 151, 154]. При превышении интенсивности поступления потока заданий от пользователей интенсивности их обслуживания разделяемым ресурсом, в МРИУС как в *системе массового обслуживания с ожиданием* появляется опасность возникновения

эффекта «зависания» системы по отношению к пользователю [151, 154–156], а также проблема интерпретации полученных результатов измерений на непрерывно выданные задания в части их сопоставления. Для устранения данной проблемы используют различные методы и подходы, например, рассмотренные в [2, 157].

В МРИУС, по аналогии с многотерминальными вычислительными системами коллективного пользования с разделением времени наиболее широкое практическое применение получил программный запрет в *терминалах пользователей* возможности формирования повторного задания до получения результатов выполнения предыдущего [2, 7, 115, 116, 139–142, 146, 147]. Реализация данного подхода в МРИУС обеспечивает:

- возможность уточнения введенных параметров измерения по результатам выполнения предыдущего задания;
- возможность последовательного изменения режима функционирования объекта управления и контроля;
- осмысленную и взвешенную выработку решений на основе только что полученной в результате измерения информации и т. д.

На основании проведенного анализа обобщенный алгоритм функционирования МРИУС можно представить в виде последовательности действий в соответствии с блок-схемой, приведенной на рисунке 1.2.5 [17, 88, 113, 115, 116, 120, 131, 158, 159, 160].

Действия, определяемые блоками 1, 2, 10 алгоритма, выполняются на основе *графического интерфейса пользователя* (рисунок 1.2.1). Действия, представленные блоками 3–6 выполняются *диспетчером разделяемого ресурса*, функционирующим на основе измерительно-управляющей ЭВМ. Действия, описываемые блоками 7–9 приведенного алгоритма, выполняются *программным комплексом управления и измерения* на основе измерительно-управляющей ЭВМ, канала управления, объекта управления и контроля, измерительного канала в соответствии с содержанием обрабатываемого задания. Решение о завершении экспериментальных исследований (блок 11) принимается пользователем на основе анализа полноты и достаточности полученных ранее результатов.

Как было отмечено, в целях исключения отказов в обслуживании МРИУС реализуется как СМО с ожиданием. Реализация программного запрета отправки повторного задания до получения ответа на предыдущее обеспечивает нахождение в очереди МРИУС числа заданий, не превышающих общее число одновременно

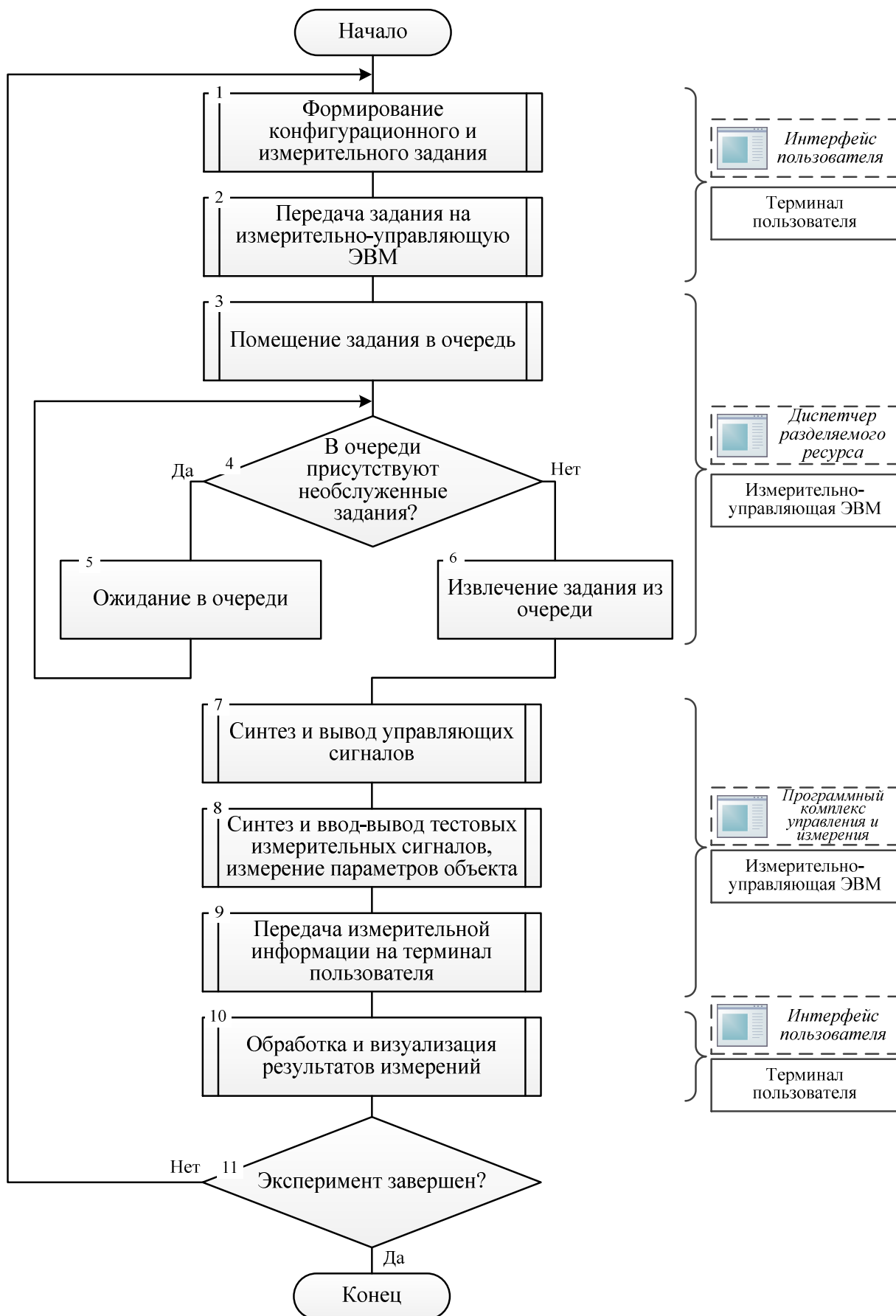


Рисунок 1.2.5 – Блок-схема обобщенного алгоритма функционирования МРИУС

работающих терминалов пользователей [127, 151, 154, 161 и др.]. Таким образом, анализируя обобщенный алгоритм, приведенный на рисунке 1.2.5, мы приходим к рассмотрению процесса функционирования МРИУС в виде системы массового обслуживания $G/G/k//N$, а также рассмотрению новой прикладной области применения классической задачи о простое станков (*machine interference problem, machine repair problem*) [30, 150, 154, 156, 162]. На рисунке 1.2.6 изображена обобщенная структурная схема представления МРИУС в виде замкнутой системы массового обслуживания.

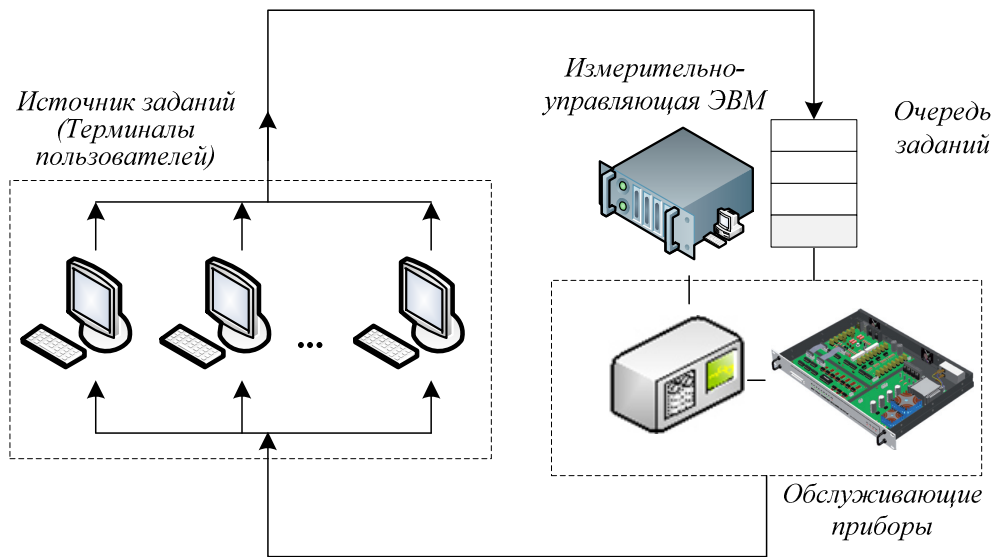


Рисунок 1.2.6 – Обобщенная структурная схема МРИУС как замкнутой системы массового обслуживания

В системе на рисунке 1.2.6 задания формируются в случайные моменты времени в источнике (терминалах пользователей), и в некоторый момент времени каждый терминал пользователя находится в одном из двух состояний [28, 29, 150, 161, 162 и др.]:

- состоянии «размышления» перед отправкой задания;
- состоянии «ожидания» результатов выполнения задания.

В системе циркулирует постоянное число заданий, равное числу терминалов пользователей. Класс замкнутых СМО, также называемых СМО с конечным источником заявок (*finite source queueing system*), получил широкое прикладное применение для моделирования реальных процессов, устройств и систем с учетом различных особенностей решаемых на их основе прикладных задач. Детальный обзор основных результатов прикладных исследований СМО $G/G/k//N$ и ее частных вариантов

представлен в работах [163–165]. Применяемые для описания динамики функционирования МРИУС математические модели будут рассмотрены в главе 3.

Вероятности состояний системы и соответственно характеристики производительности МРИУС как СМО в общем случае зависят от параметров и вида распределений интервалов времени размышления пользователя и времени выполнения заданий, а также числа обслуживающих приборов, которые в целом характеризуют реализуемый сценарий диалога пользователя в системе и внутреннюю структуру МРИУС как АСЭИ. Исследуем возможные функциональные ограничения при построении МРИУС с точки зрения обеспечения интерактивного диалогового режима функционирования для заданной совокупности терминалов пользователей.

1.2.2 Исследование функциональных ограничений построения МРИУС

Для описания функционирования систем с разделением времени широко применяется теория массового обслуживания, в частности ее раздел, посвященный системам с ожиданием [7, 27, 127, 151, 154, 162]. Как было рассмотрено ранее, в процессе функционирования МРИУС работа с разделяемым ресурсом разбивается на совокупность операций, выполнение которых может быть разнесено во времени. Это позволяет посредством специализированных программных и аппаратных средств предоставить возможность использования разделяемого ресурса одним пользователям в интервалы времени «размышления» других.

Рассмотрим МРИУС, включающую в свой состав N_T одновременно работающих терминалов пользователей и k одинаковых обслуживающих приборов, в виде замкнутой многоканальной системы массового обслуживания с дисциплиной обслуживания, не прерывающей выполнение заданий и исключающей простой обслуживающих приборов (см. рисунок 1.2.6). Для данной СМО теорема Литтла, связывающая среднее время ответа системы и среднее число заданий в канале обслуживания (в очереди и на обслуживании) в установившемся режиме, формулируется следующим образом [28–30, 162, 166, 167]:

$$N_T - \gamma \cdot \bar{t}_{\text{разм}} = \gamma \cdot \bar{t}_{\text{ож}}, \quad (1.2.1)$$

где γ – пропускная способность системы (число заданий, завершающих обслуживание в канале в единицу времени); $\bar{t}_{\text{разм}}$ – среднее время размышления пользователя с момента

получения результата выполнения его предыдущего задания до отправки следующего;
 $\bar{t}_{\text{ож}}$ – среднее время ответа системы (время ожидания результатов выполнения заданий).

Среднее времени выполнения заданий из (1.2.1) находится как

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \frac{N_T}{\gamma} - \bar{t}_{\text{разм}}. \quad (1.2.2)$$

Выражение (1.2.2) также называется формулой времени интерактивного ответа (*Interactive response time law*) [168]. Максимальное число терминалов пользователей N_T^* , характеризующее «насыщение» МРИУС как СМО (см. рисунок 1.2.6), определяется следующим выражением [7, 162, 167, 168]:

$$N_T^* = k \cdot \left(1 + \frac{\bar{t}_{\text{разм}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}} \right), \quad (1.2.3)$$

где k – число идентичных обслуживающих приборов; $\bar{t}_{\text{обсл}}$ – среднее время выполнения заданий обслуживающим прибором.

Для системы одним обслуживающим прибором (при $k = 1$), соответственно, можно записать [127, 162]

$$N_T^* = 1 + \frac{\bar{t}_{\text{разм}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}}. \quad (1.2.4)$$

Значение N_T^* (выражения (1.2.3), (1.2.4)) соответствует максимальному числу терминалов пользователей, задания от которых могли бы быть обработаны в МРИУС без взаимных помех друг другу, если бы все задания выполнялись в течение времени, точно равного $\bar{t}_{\text{обсл}}$, а размышление пользователей составляло время, точно равное $\bar{t}_{\text{разм}}$ (детерминированная система) [27, 127, 162]. При $N_T > N_T^*$ в МРИУС как в СМО обязательно образуется очередь заданий [29, 127, 162, 168].

Средняя длительность интервала работы МРИУС, в течение которого обеспечивается возможность выполнения с каждого терминала пользователя серии из \bar{X} заданий, определяется следующим выражением:

$$\bar{\Delta T} = N_T \cdot \frac{\bar{X}}{\gamma}. \quad (1.2.5)$$

При $\bar{t}_{\text{разм}} \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow k \cdot \frac{1}{\bar{t}_{\text{обсл}}}$. Таким образом, в соответствии с выражением (1.2.5) предельное число терминалов пользователей $N_{\text{T}}^{\text{пр}}$, которое МРИУС способна физически обслужить за рассматриваемый временной интервал функционирования средней длительности $\overline{\Delta T}$ (сеанс работы) при формировании каждым из терминалов в среднем \bar{X} заданий и среднем времени их выполнения $\bar{t}_{\text{обсл}}$ в том случае, если бы каждый терминал после получения ответа сразу же повторно направлял задание, находится следующим образом:

$$N_{\text{T}}^{\text{пр}} \approx k \cdot \frac{\overline{\Delta T}}{\bar{X} \cdot \bar{t}_{\text{обсл}}}. \quad (1.2.6)$$

Условие достижения минимальной результативности по числу одновременно работающих терминалов пользователей, характеризующее целесообразность организации режима внешнего асинхронного разделения времени к разделяемому ресурсу посредством построения МРИУС, в целом можно сформулировать как

$$N_{\text{T}}^{\text{пр}} \geq 2. \quad (1.2.7)$$

То есть для МРИУС, характеризуемых в общем виде рассмотренным классом СМО, условие обеспечения минимального необходимого числа обслуживаемых терминалов пользователей на рассматриваемом интервале времени функционирования формулируется следующим образом:

$$k \cdot \frac{\overline{\Delta T}}{\bar{X} \cdot \bar{t}_{\text{обсл}}} \geq 2. \quad (1.2.8)$$

Таким образом, в соответствии с вышеизложенным, если в процессе функционирования АСЭИ, функционального узла, устройства, макета, стенда или установки и т.д. можно выделить явные интервалы их «*простоя*» и «*занятости*», то для данного оборудования возможно его использование на основе концепции *мультиарендности* посредством организации режима внешнего асинхронного временного разделения на основе МРИУС (см. выражения (1.2.3), (1.2.4)). При этом предельное число терминалов пользователей МРИУС $N_{\text{T}}^{\text{пр}}$, потребности в обслуживании которых она физически может удовлетворить на рассматриваемом временном интервале

функционирования (ΔT), определяется соотношением числа формируемых заданий (\bar{X}), длительностей непосредственного «захвата» обслуживающего прибора на выполнение задания ($\bar{t}_{\text{обсл}}$) и числом обслуживающих приборов (k) (выражение (1.2.6)) [7, 28–30, 150, 154, 155, 162].

Одной из важных характеристик МРИУС как интерактивной диалоговой системы, функционирующей с внешним временным разделением, является оперативность ее функционирования, характеризующая качество обслуживания терминалов пользователей [30, 36, 162, 166 и др.]. Рассмотренные ранее выражения (1.2.1)–(1.2.8) позволяют предварительно оценить возможность организации режима многопользовательского доступа к *разделяемому ресурсу* на основе МРИУС без учета требований к оперативности ее функционирования. В соответствии с этим определим основные параметры оперативности функционирования МРИУС, характеризующие выполнение конфигурационных и измерительных заданий в ней как в СМО, и требования к ним.

1.2.3 Выработка требований к параметрам оперативности функционирования МРИУС

Как было отмечено ранее, одной из основных характеристик МРИУС как интерактивной диалоговой системы является оперативность ее функционирования, как правило, описываемая *временем ответа* системы на запросы пользователей (или *временем ожидания* выполнения заданий) [5, 7, 22, 25, 26, 132, 162].

Возникновение задержек в исполнении заданий в МРИУС при совместном доступе пользователей и, как следствие, увеличение времени ответа на задания, обусловлено неупорядоченным обращением пользователей и разрешением конфликтов в работе соответствующего разделяемого ресурса посредством буферизации и организации очередности обработки заданий. Таким образом, время ответа МРИУС является переменной величиной, носящей случайный характер и зависящей, в том числе от текущей загрузки системы [27]. В рамках данного пункта рассматривается функционирование МРИУС с точки зрения эргатической системы, в частности, с позиции диалога «человек–ЭВМ» в человеко-машинной системе [36].

Развитие и прикладное применение вычислительных систем с разделением времени актуализировало необходимость изучения временного аспекта взаимодействия пользователей с ЭВМ в данных системах, что стало предметом ряда прикладных

исследований, которые принято относить к области *инженерной психологии* [169]. К одному из основных направлений исследований в данной области относят выделение нормативных оценок взаимодействия человека с ЭВМ в процессе решения вычислительных, экспериментальных и прочих задач в режиме диалога «человек–ЭВМ» [169, 170]. При этом следует отметить, что вопросы исследования и формирования нормативных требований к задержкам обслуживания заданий применительно к МРИУС рассмотрены в научных изданиях в ограниченном объеме.

Результаты экспериментальных исследований временного аспекта оперативного режима взаимодействия пользователя с ЭВМ применительно к многотерминальным вычислительным системам с разделением времени обобщены в работе О. К. Тихомирова, А. Е. Войскунского [169]. С точки зрения прикладного применения МРИУС научный интерес представляют следующие основные подходы к нормированию времени ответа системы с разделением времени на формируемые пользователем задания (запросы), которые детально рассмотрены в этой работе.

В рамках предположения, что длительное время ответа способно нарушить ход умственной работы пользователя и вызвать в нем нежелание взаимодействовать, ученым *R. Miller* исследована связь нормативного времени реакции с типами и уровнями выполняемой пользователем деятельности [171, 172]. На рисунке 1.2.7 представлена сводная диаграмма нормированных значений времени реакции системы с разделением времени для нескольких типов взаимодействий пользователя с ЭВМ, построенная на основе анализа результатов исследований *R. Miller* [171].

Анализ диаграммы показывает достаточно широкие границы нормативных оценок, а также их существенный разброс для исследованных типов взаимодействия. При этом следует отметить, что для более сложных задач, связанных, например, с моделированием, управлением, проектированием, работой в сфере производства или бизнеса, нормативные оценки для времени реакции ЭВМ автор не предлагает, основываясь на фактах, что в некоторых случаях длительность ответа, обусловленная, прежде всего, длительностью обработки запроса, может составлять несколько минут [169, 171].

Данные факты подтверждают отсутствие единого общего подхода к нормированию времени ответа для многотерминальных вычислительных систем с разделением времени, функционирующих в интерактивном диалоговом режиме.

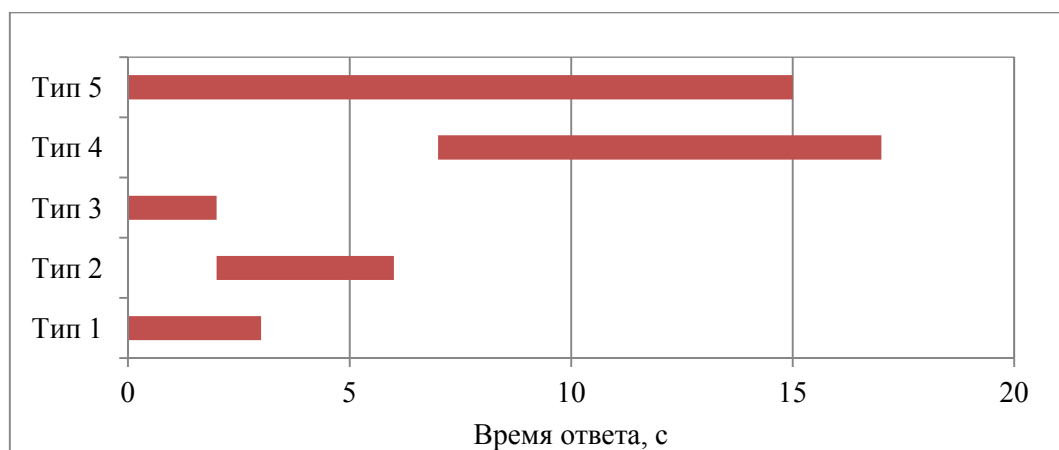


Рисунок 1.2.7 – Диаграмма нормативных оценок времени ответа многотерминальной вычислительной системы, предложенная *R. Miller* для нескольких типов взаимодействий пользователя с ней: Тип 1 – формирование уведомления о возможности воспринять (обслужить) запрос пользователя; Тип 2 – формирование уведомления об отсутствии ошибок в запросе и его принятие к выполнению; Тип 3 – ответ на запрос, касающийся ранее запасенных (введенных) сведений; Тип 4 – поиск и сопоставление сведений, хранящихся в разных информационных массивах; Тип 5 – обработка программы

Анализ результатов исследований, проведенных *H. Sackman* на основе обобщения опыта эксплуатации первых вычислительных систем с разделением времени, показывает о непревышении значения среднего времени их реакции в 10 секунд [173]. В работе [174] приводятся экспериментальные доказательства факта, что быстрая реакция системы на запрос пользователя является одним из условий высокопродуктивной работы человеко-машинной системы. В ряде работ [173–176] также акцентируется внимание на том, что для пользователей одним из важных факторов является определенность и предсказуемость времени ожидания ответа ЭВМ. Данные факты, в свою очередь, обуславливают необходимость ограничения доступа пользователей к системе в целях сохранения заданного времени ответа [169]. Результаты экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института, выявили факт более корректного и ответственного отношения пользователей к формированию запросов при искусственном увеличении времени ответа системы. Это выразилось в сокращении доли случайных запросов, которые могли бы быть отправлены в случае короткого времени реакции системы. Таким образом, был выявлен факт некоторой «адаптации» пользователей к изменению условий работы [169, 177, 178].

Однако отдельно также следует отметить результаты исследований, в которых рассматривается и обосновывается противоположный подход, заключающийся в тенденции ввода в организацию диалога человека с ЭВМ искусственных задержек. Одним из аргументов данного подхода является то, что чрезмерно быстрый ответ системы в ряде случаев может привести к недоверию данным, полученным в результате выполнения отправленного запроса [169]. В эксперименте, описанном в работе [179], ограничивалась возможность немедленной отправки запроса после получения ответа на предыдущий, тем самым преследовалась цель акцентирования внимания пользователя к осмыслению полученных данных и их интерпретации применительно к решаемой задаче.

Анализ результатов научных исследований применительно к эргатическим диалоговым системам с разделением времени «человек – ЭВМ», к которым относится МРИУС, выявил некоторую противоречивость и достаточно общие границы нормативных оценок допустимого времени реакции, а также явную тенденцию их соотнесения с типом и сложностью осуществляемой деятельности по решению основной задачи, со значимостью и ценностью выполняемой на основе системы работы [169–179]. При этом, например, также в работе [180] приводится утверждение, что если время ответа на запросы (задания) пользователей в диалоговом режиме превышает 20 секунд, то система перестает быть интерактивной.

Таким образом, учитывая тот факт, что время обслуживания заданий на основе соответствующих разделяемых ресурсов может лежать в достаточно широком диапазоне, обусловленном, прежде всего, особенностью и характером выполняемых операций управления и измерения, особенностями объектов управления и контроля, над которыми они выполняются, предлагается в рамках выполняемых исследований не нормировать значения границ допустимого времени ответа в МРИУС, а рассматривать требования к их оперативности в виде критериев, которые могут быть сформулированы пользователями и/или заказчиками системы, например, в рамках технического задания.

В соответствии с вышеизложенным применительно к МРИУС при формировании требований к допустимой оперативности целесообразно учитывать область ее применения, особенности решаемых на её основе задач, специфику разделяемого ресурса, характер и степень критичности выполняемой работы. В рамках диссертационной работы соискателем предлагается использовать следующие основные параметры, характеризующие в общем виде оперативность функционирования МРИУС:

- $\bar{t}_{\text{ож_пор}}$ – требуемое среднее время ожидания результатов выполнения заданий пользователями (время ответа). Достаточно общий параметр, подходящий для описания большинства систем;

- ε – отношение среднего времени ожидания выполнения заданий в МРИУС к среднему времени ожидания, если бы в МРИУС работал только один пользователь. Данный параметр может быть применен, например, для систем, которые первоначально функционировали в монопольном диалоговом режиме. Также данный параметр в литературе получил название *коэффициент замедления* [25, 127];

- $P_{t_{\text{ож_пор}}} = P(\tilde{t}_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}})$ – вероятность непревышения временем ожидания результатов измерения $\tilde{t}_{\text{ож}}$ заданного порогового значения $t_{\text{ож_пор}}$. Данный параметр может быть задан для систем, в которых критична детерминированность реакции системы на задания оператора, например, испытательные системы (комплексы).

Введем следующее обозначение: $\mathbf{P}^{\text{оп}}$ – множество параметров, характеризующих свойства оперативности функционирования МРИУС. В общем виде

$$\mathbf{P}^{\text{оп}} = \{p_q^{\text{оп}} | q = 1, Q^{\text{п}}\}, \quad (1.2.9)$$

где Q – мощность множества.

Для предложенного выше набора параметров

$$\mathbf{P}^{\text{оп}} = \{\bar{t}_{\text{ож_пор}}, \varepsilon, P_{t_{\text{ож_пор}}}\}, Q^{\text{п}} = 3. \quad (1.2.10)$$

Значения параметров $p_q^{\text{оп}}$, характеризующие оперативность функционирования МРИУС, по аналогии с многотерминальными вычислительными системами с разделением времени представляется возможным оценить на этапе разработки средствами математического моделирования на основе представления ее функционирования в виде системы массового обслуживания [28, 145, 158, 160, 161]. Анализ соответствующей СМО может быть выполнен с использованием систем компьютерной математики и/или систем имитационного моделирования [181–187].

В общем случае каждому сформулированному параметру оперативности МРИУС $p_q^{\text{оп}} \in \mathbf{P}^{\text{оп}}$ соответствует предельное число терминалов $N_T^{p_q^{\text{оп}}} \in \mathbf{N}_T^{\text{оп}}$, обслуживание которых обеспечивается с заданным качеством (1.2.10). Таким образом, число

терминалов пользователей, соответствующее выполнению требования $p_q^{\text{оп}}$ к оперативности функционирования МРИУС, можно представить следующим образом:

$$N_T^{p_q^{\text{оп}}} \rightarrow f_q^{\text{оп}}(mrius)|_{p_q^{\text{оп}}}, \quad (1.2.11)$$

где $f_q^{\text{оп}}$ – функциональная зависимость q -го критерия оперативности от проектного решения МРИУС; $mrius$ – переменная, описывающая проектное решение МРИУС; \rightarrow – знак соответствия.

Или в общем виде

$$N_T^{P^{\text{оп}}} \rightarrow F^{\text{оп}}(mrius)|_{P^{\text{оп}}}, \quad (1.2.12)$$

где $F^{\text{оп}} = \{f_q | q = 1, Q^{\text{п}}\}$ – множество соответствующих функциональных зависимостей; $Q^{\text{п}}$ – мощность множества.

Проектное решение $mrius$ характеризуется структурой построения системы, алгоритмом диспетчеризации разделяемого ресурса, параметрами каналов управления и измерения, характеристиками разделяемого ресурса, параметрами реализуемого диалога и т. д. [188, 189].

1.3 Анализ проблематики и постановка задач диссертационного исследования

Проведенный в работе обзор и исследования показали широкое многообразие функциональных узлов, устройств, систем, комплексов и пр., используемых в качестве разделяемого ресурса, а также позволили в целом выделить несколько уровней структурной иерархии реализации метода разделения времени. При этом следует отметить, что в связи резким снижением стоимости ряда устройств, используемых в качестве разделяемого ресурса, для некоторых направлений необходимость реализации метода разделения времени утратила свою актуальность.

Например, развитие электронной компонентной базы, появление микроконтроллеров исключили необходимость применения общей ЭВМ для управления несколькими станками, технологическими установками [18]. При этом в облачных вычислениях, системах передачи информации, системах управления, измерительных

системах и автоматизированных системах экспериментальных исследований применение метода разделения времени продолжает и в настоящее время быть актуальным. Применение метода разделения времени в условиях наличия ограничений на доступные ресурсы в целом обеспечивает:

- повышение технических и эксплуатационных характеристик устройств, систем, комплексов и т. д.;
- решение проблем низкой временной эффективности использования и повышение пропускной способности каналов связи, функциональных, узлов, приборов, систем, комплексов и пр.;
- расширение функциональных возможностей устройств;
- сокращение массогабаритных и энергетических характеристик;
- возможность доступа к ряду услуг и коллективного использования уникальных программных и аппаратных ресурсов [3, 9–12, 14, 16, 53–68, 109–123, 128–131, 190 и др.].

Результаты проведенных в п. 1.1, 1.2 исследований и анализ ряда работ позволяют выделить в целом общую проблематику разработки систем с временным разделением [5, 7, 14, 25, 36, 61, 62 и др.] – *необходимость учета специфики их прикладного применения и особенностей решаемых задач в целях обеспечения высокого уровня технических характеристик создаваемых и эксплуатируемых систем*, – в рамках которой применительно к МРИУС можно выделить следующие основные существующие проблемы:

- выбор и обоснование алгоритма распределения и управления доступом к разделяемому ресурсу (*алгоритма диспетчеризации*);
- обеспечение требуемой оперативности функционирования системы при выполнении заданий пользователей;
- выбор архитектуры построения системы и оптимизации ее состава в соответствии с заданными критериями оперативности функционирования;
- рациональное распределение функций между аппаратными и программными компонентами системы;
- выбор рациональных параметров диалога в соответствии с решаемой задачей и требуемой оперативностью;
- обеспечение высоких технических и эксплуатационных характеристик;

- обеспечение и сопровождение процесса разработки, сокращение материально-технических, временных затрат на создание и т. д.

В качестве основы теории вычислительных систем с разделением времени принято рассматривать теорию процессов переработки информации в вычислительных системах, большой вклад в развитие которой был внесен академиками С. А. Лебедевым, В. М. Глушковым [36]. Потребности комплексного решения проблем, возникающих в инженерной практике при создании систем с разделением времени различной функциональной направленности, обусловили развитие направления их системных представлений, формируемых как в терминах теории массового обслуживания, так и с использованием статистического моделирования на ЭВМ [36].

Общие вопросы, относящиеся к достаточно широкому классу систем с разделением времени, могут быть решены с применением аналитических моделей, основанных на теории массового обслуживания. В данной области широко известны, например, работы Д. А. Поспелова, С. Ф. Яшкова, С. А. Майорова, Г. П. Башарина, Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко, Я. А. Когана, А. Я. Хинчина, A. L. Scherr, L. Kleinrock, A. O. Allen, N. R. Nielsen, H. Takagi, L. Lipsky, J. Sztrik, E. D. Lazowska, P. J. Denning, J. P. Buzen и др. [7, 28, 30, 127, 150, 154–156, 161, 162, 167, 168, 191–193 и др.]. При этом принято считать, что более обширные возможности анализа подобных систем предоставляют модели, построенные на основе метода имитационного моделирования [36, 181, 185–187, 194].

Широкий перечень областей прикладного применения метода разделения времени, многообразие функциональных узлов, устройств, систем, комплексов и пр., используемых в качестве разделяемого ресурса, обусловили необходимость конкретизации и адаптации общих моделей с учетом реализуемых алгоритмов диспетчеризации, специфики и функционального состава разделяемого ресурса. Данный факт, в свою очередь, обусловил развитие прикладных направлений исследований и анализа систем с разделением времени [14, 63, 73–75, 191, 195–199]. Например, применительно к вычислительным системам известны работы [7, 127, 199–202 и др.], в области радиолокации – [63, 67], в области автоматизированных информационных систем – [36, 188, 203], анализ функционирования систем управления с разделением времени как систем со случайной структурой с распределенными переходами рассмотрен в работах [6, 8, 204].

В современных АСЭИ и ИС с внутренним разделением ЭВМ задачи диспетчеризации обработки информационных потоков решаются средствами операционных систем, обеспечивающих заданную детерминированность длительностей выполнения операций [135]. Вопросы организации управления разделяемым ресурсом в автоматизированных измерительных системах с общим измерительным каналом всесторонне исследованы в работе [62]. Проблемы диспетчеризации в АСЭИ с синхронным разделением времени, как правило, решаются на основе известных методов планирования [62, 205]. Вопросы построения и результаты исследования особенностей организации распределенных измерительных систем и систем дистанционного управления, в том числе на основе вычислительных сетей, рассмотрены неоднократно, например, в работах [86, 87, 206, 207]. Применительно к МРИУС результаты экспериментальных исследований задержек передачи данных в вычислительных сетях приведены, например, в работах [145, 208–210 и др.]. При этом постановка задач совершенствования математического, информационного, алгоритмического и программного обеспечения создания МРИУС затрагиваются в научных изданиях в ограниченном объеме [138, 158, 207, 211].

К основному недостатку первых образцов МРИУС можно отнести высокую себестоимость их разработки и недостаточное число одновременно работающих пользователей (например, см. рисунок 1.1.10), обусловленных, как правило, текущим на момент создания уровнем техники и технологий, а также недостаточным применением научно-обоснованных подходов [62, 93, 109]. Современный уровень развития техники и технологий обеспечил решение следующего ряда проблем, актуальных в целом для многопользовательских систем с внешним асинхронным разделением времени, рассмотренных в пункте 1.1.3 а именно:

- развитие электронной компонентной базы, вычислительной техники и технологий программирования создало условия для широкого распространения ЭВМ и портативных цифровых устройств вычислительной техники, что позволило в должной мере решить проблему *доступности* и *унификации* терминалов пользователей (см. рисунки 1.1.2, а, 1.1.2, б);

- развитие информационно-коммуникационных технологий (Интернет, мобильная и спутниковая радиосвязь и пр.) обеспечило решение проблемы территориального рассредоточения компонентов систем посредством организации

высокоскоростных каналов связи между разделяемыми ресурсами и терминалами пользователей (см. рисунок 1.1.2, б, 1.1.2, в).

Развитие компьютерных измерительных технологий способствовало тесной интеграции АСЭИ с телекоммуникационными системами, что, в свою очередь, предоставило широкие возможности по передаче информации (в том числе измерительной, графической, аудио- и видеоинформации и др.) на большие расстояния на основе вычислительных сетей [86, 88, 110, 137 и др.].

Современные достижения информационно-коммуникационных и компьютерных измерительных технологий позволяют реализовывать МРИУС на новом качественном уровне, сократить сроки разработки за счет применения серийно выпускаемых инструментальных модулей сопряжения, цифро-аналогового, аналого-цифрового преобразования и пр. Применение в качестве канала связи вычислительных сетей общего назначения обеспечивает работу с *разделяемым ресурсом* в МРУИС на основе практически любого персонального компьютера или мобильного устройства, оснащенного *графическим интерфейсом пользователя* и имеющего доступ в Интернет.

Развитие пакетов прикладных программ и средств разработки программного обеспечения позволяет реализовать расширенные функции постобработки результатов измерения и исследований в рамках единого информационного рабочего пространства пользователя. При этом обеспечивается доступность возможности использования распределенной сетевой архитектуры сервисов обработки экспериментальных данных в рамках реализаций технологий *e-Science, e-Learning* [137, 212, 213].

Общие принципы построения автоматизированных измерительных и управляющих систем, лежащих в основе АСЭИ в целом и МРИУС в частности, задачи разработки измерительных каналов и каналов управления, обеспечения требуемых их технических характеристик: точности, быстродействия, помехоустойчивости, надежности и пр., всесторонне рассмотрены, например, в работах [20, 85, 100, 103, 105, 214]. Математические задачи синтеза измерительных информационных, информационно-управляющих и измерительно-управляющих систем, в общем виде сформулированы, например, в [20, 105, 129, 133, 188, 189, 215]. При этом особенности процесса функционирования МРИУС как автоматизированной системы экспериментальных исследований и системы массового обслуживания характеризуются прежде всего:

- аппаратно-программным составом разделяемого ресурса;
- ограниченными сведениями о зависимостях характеристик МРИУС от архитектур их построения и параметров функциональных узлов;
- вариативностью функционального и параметрического содержания обрабатываемых заданий;
- отсутствием в общем случае априорной информации о длительностях выполнения заданий;
- наличием ограничений на возможность деления и прерывающегося поэтапного выполнения заданий;
- принадлежностью заданий к определенному объекту управления и контроля.

Данные особенности накладывают некоторые ограничения на возможность использования подходов, характерных для соответствующих вычислительных систем. В свою очередь, непринятие во внимание специфики разделяемого ресурса в МРИУС ограничивает перечень применяемых алгоритмов диспетчеризации и, как следствие ограничивает число степеней свободы в процессе разработки проектных решений МРИУС, что обуславливает недостаточный уровень технических характеристик создаваемых их образцов.

Отсутствие научных основ разработки и эксплуатации МРИУС, учитывающих обозначенные отличительные особенности, также объясняет несоответствие технических характеристик создаваемых образцов МРИУС предъявляемым к ним со стороны пользователей и/или эксплуатирующих организаций требованиям. Данный факт, в свою очередь, приводит к низкой эффективности применения разработанных образцов МРИУС.

Вектор информационного развития общества, укрупнение виртуальной интеграции сервисов, сред коммуникаций обуславливают как минимум необходимость принятия во внимание и как максимум необходимость рассмотрения технической возможности организации специализированных интернет-сервисов предоставления услуг выполнения дистанционных экспериментальных исследований заданной функциональной направленности по аналогии с широко распространенной концепцией *utility computing*. При этом также следует отметить, что одним из основных передовых направлений, реализуемых в рамках научной и образовательной деятельности учебных заведений высшего и среднего профессионального образования, неоднократно отмечаемых

Правительством РФ, является реализация образовательных программ с применением методов электронного обучения и дистанционных образовательных технологий [216].

В целях обеспечения освоения образовательных программ на основе данных методов и технологий актуальной является задача предоставления возможности проведения научных и учебных экспериментальных исследований для территориально удаленного и распределенного контингента обучаемых [40, 190, 217], а также для реализации образовательных программ в области дистанционного образования. Реализация с 2016 г. приоритетного проекта «Современная цифровая образовательная среда в Российской Федерации» направлена на создание возможностей получения непрерывного качественного образования для всех категорий граждан с использованием современных цифровых технологий. Данный приоритетный проект призван устранить ряд факторов, сдерживающих цифровую трансформацию, таких как региональная неравномерность качества предоставления образовательных услуг, дефицит и/или недостаточный уровень подготовки инженерных кадров, востребованных в рамках цифровой экономики [42, 43].

Как известно, процесс переподготовки и подготовки высококвалифицированных инженерных кадров в области техники и технологий базируется на лабораторных исследованиях, организуемых в системах *e-Learning* посредством реализации удаленного доступа по вычислительным сетям к специализированному оборудованию для проведения эксперимента (экспериментальному оборудованию). Как было отмечено в параграфе 1.1, рост уровня техники и технологий обуславливает усложнение применяемых в производстве устройств, комплексов, систем, что свою очередь, предполагает соответствующую модернизацию лабораторного оборудования для обеспечения процессов научных и учебных экспериментальных исследований. Данная задача существенно увеличивает финансовую нагрузку на научные и образовательные учреждения. При этом следует отметить, что стоимость макетов, стендов, установок, измерительных средств растет по мере их совершенствования, что делает оснащение научно-исследовательских, образовательных учреждений передовыми техническими средствами все более весомой статьей расходов (закупка, пуско-наладочные работы, обслуживание, ремонт и пр.).

В качестве одного из возможных выходов в данной ситуации научной общественностью обозначен частичный переход к новой форме эксплуатации уникального научного и учебного экспериментального оборудования на основе

известных и рассмотренных ранее моделей, методов и концепций *utility computing*, *cloud computing*, *multitenancy* и *e-tools* [37, 88, 115–118, 137, 190, 211, 218–220], включающей в себя следующие основные направления:

- предоставление услуг по требованию;
- сетевой доступ и использование программного обеспечения и оборудования на основе «аренды у поставщика»;
- использование одного экземпляра оборудования для обслуживания запросов (потребностей) нескольких пользователей.

Данный факт также нашел отражение в соответствующем отраслевом стандарте, устанавливающем общие положения в области создания, использования и развития систем автоматизации экспериментальных исследований [221].

Учитывая также актуальность развития направлений *e-Learning*, *e-Science*, важным является создание специализированных сетевых комплексов и систем с уникальным экспериментальным оборудованием, функционирующим на основе концепции *мультиарендности*. По аналогии с концепцией сетевого доступа к вычислительным ресурсам по требованию (*cloud computing*), реализация интерактивных диалоговых систем применительно к автоматизированным системам экспериментальных исследований обеспечивает широкую географическую доступность услуг и предоставляет конечным пользователям в свое распоряжение измерительные средства, автоматизированные лабораторные макеты, стенды и установки для решения производственных, научно-исследовательских и образовательных экспериментальных задач в режиме *удаленного коллективного доступа* 24 часа в сутки, 7 дней в неделю, тем самым исключая необходимость развертывания соответствующей инфраструктуры, найма специалистов для обслуживания, ремонта, эксплуатации и т. п. [88, 115, 123, 138, 190, 220].

Центральным звеном, реализующим обозначенный подход, являются исследуемые в рамках диссертационной работы *многопользовательские распределенные измерительно-управляющие системы*, обеспечивающие дистанционный доступ и возможность коллективной интерактивной работы на основе одного комплекта экспериментального оборудования [93, 109, 113–123, 138–143, 146, 147]. Целесообразность разработки и модернизации существующих систем автоматизации экспериментальных исследований для осуществления возможности их многопользовательского использования на основе

временного разделения ресурсов отмечается и обосновывается также в ряде отечественных и зарубежных работ [109–111, 114–119, 128, 130, 131, 137–139, 142, 146, 226 и др.].

В производственной деятельности прикладное применение МРИУС позволяет улучшить качественные показатели выполняемых на их основе работ (повысить производительность, сократить материально-технические и временные затраты), расширить функциональные возможности, снизить массогабаритные и энергетические характеристики устройств, комплексов и систем [62, 130, 152, 153, 228]. Направление прикладного применения МРИУС в качестве средств автоматизации экспериментальных исследований научной (*e-Science*) и учебной деятельности (*e-Learning*) является актуальным и получило широкое развитие в мировой практике [10, 11, 88, 109–119, 138–143, 146, 147, 190, 207, 222–225, 227 и др.].

Необходимость модернизации материально-технической базы научно-технической сферы отмечена Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического развития комплекса России на 2014–2020 годы» [231]. Задача обновления технологической и материальной базы отраслей гражданской промышленности отмечена Государственной программой РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», реализуемой в период с 2014 по 2020 г. [232].

Необходимость создания общедоступных информационных ресурсов в сети Интернет, способствующих самостоятельному прохождению желающим программ дополнительного образования, определена документом «Стратегия инновационного развития РФ на период до 2020 года» [229]. Необходимость ускоренного внедрения новаций в процесс подготовки и переподготовки кадров, способствующих повышению качества образования, развития дистанционного образования, развития российских платформ онлайн-образования определена документом «Стратегия развития отрасли Информационных технологий на 2014–2020» [230].

Таким образом, создание на научной основе, внедрение и эксплуатация МРИУС в качестве ресурсного обеспечения прикладных экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров имеет важное народнохозяйственное значение, что обуславливает **актуальность** темы диссертационного исследования.

Сформулируем в общем виде математическую модель задачи поиска проектного решения МРИУС в процессе разработки [189]. С точки зрения теоретико-множественного подхода представим проектное решение МРИУС в виде совокупности описательных признаков – \mathbf{K} [148, 215, 233, 234]:

$$\mathbf{K} = \{K_l | l = 1, L\}, L - \text{мощность множества.} \quad (1.3.1)$$

Положим, что каждый из признаков K_l проектного решения МРИУС описывается множеством возможных принимаемых значений. То есть

$$K_l = \{k_m | m = 1, M_l\}, \quad (1.3.2)$$

где $M_l \in \mathbf{M}$, $\mathbf{M} = \{M_l | l = 1, L\}$.

Сочетания значений признаков K_l образуют варианты возможных проектных решений МРИУС, которые описываются переменной $mrius_g$:

$$mrius_g = \{k_{l,m} | l = 1, L; m = 1, M_l\}, \quad (1.3.3)$$

$$\mathbf{MRIUS} = \{mrius_g | g = 1, G\}. \quad (1.3.4)$$

Каждый вариант проектного решения $mrius_g$ характеризуется соответствующим множеством значений технических характеристик, включающих в свой состав в том числе характеристики измерительных каналов и каналов управления, характеристики оперативности и т.д.:

$$\mathbf{P}_g^T = \{p_{g,j}^T | g = 1, G; j = 1, J\}. \quad (1.3.5)$$

При этом для каждого показателя $p_{g,j}^T$ проектного решения $mrius_g$ в общем виде можно записать

$$p_{g,j}^T = f_{g,j}^T(mrius_g), \quad (1.3.6)$$

где $f_{g,j}^T$ – вид функциональной зависимости.

Общие ограничения на технические характеристики МРИУС, устанавливаемые в процессе разработки проектных решений, задаются множеством допустимых значений:

$$\mathbf{P}^{\text{ОГР}} = \{p_j^{\text{ОГР}} \mid j = 1, J\}. \quad (1.3.7)$$

В зависимости от содержания постановки задачи разработки МРИУС, отображающей степень важности той или иной характеристики для создаваемой системы, в качестве целевого критерия поиска варианта проектного решения системы, как правило, используется одна из характеристик качества, а на другие накладываются ограничения [20, 188, 189]. С учетом принятых обозначений математическая задача поиска проектного решения МРИУС может быть сформулирована следующим образом [189, 233]:

$$mrius_{g^*} \Leftrightarrow \{k_{l,m}\}, mrius_{g^*} \in \mathbf{MRIUS}, \quad (1.3.8)$$

$$p_{g^*,j}^T \in \mathbf{P}^{\text{ОГР}}, j = 1, J \quad (1.3.9)$$

$$p_{g^*,j^*}^T = \min(\max)\{p_{g,j^*}^T, g = 1, G\}, \quad (1.3.10)$$

где $mrius_{g^*}$ – искомое проектное решение; p_{g^*,j^*}^T – целевой критерий выбора проектного решения.

В соответствии с этим, искомое в процессе разработки проектное решение МРИУС, описываемое выражением (1.3.8), должно характеризоваться определенными техническими показателями, соответствующими множеству заданных допустимых значений (выражение (1.3.9)), и обладать наилучшим (минимальным или максимальным) значением показателя технического уровня, выбранным в качестве обобщенного критерия оценки (выражение (1.3.10)).

Целью *диссертационного исследования* является усовершенствование научных основ создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований. Для достижения сформулированной цели в диссертации были поставлены и решены следующие задачи (рисунок 1.3.1). В последующих главах диссертации рассмотрены результаты решения поставленных задач.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Исследование и систематизация современных тенденций совместного использования аппаратных и программных ресурсов на основе метода разделения времени в ряде прикладных областей.

2. Исследование путей совершенствования МРИУС.

3. Разработка базовых аналитических и дополненной имитационной моделей динамики функционирования МРИУС как СМО и реализация соответствующего программного обеспечения.

4. Разработка методов организации работы диспетчера разделяемого ресурса, направленных на повышение оперативности функционирования МРИУС.

5. Разработка комплекса решений проектных задач для информационной поддержки процесса разработки МРИУС.

6. Разработка методики проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками на основе известных и предложенных моделей, методов, комплексов методик и решений частных проектных задач.

7. Разработка методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации и создание положенной в ее основу подпрограммы регистрации и накопления статистических данных о параметрах процесса функционирования данных систем как СМО.

8. Экспериментальная проверка, апробация и внедрение результатов диссертационного исследования в области автоматизации экспериментальных исследований в ракетно-космической промышленности и отраслевой системе подготовки кадров, а также в учебный процесс.

Рисунок 1.3.1 – Структура основных задач, решаемых в диссертационной работе

1.4 Выводы по главе 1

1. Сформулированы основные предпосылки, обусловившие широкое прикладное применение метода разделения времени в различных сферах человеческой деятельности.

2. Обозначены основные этапы развития отрасли информационных технологий в рамках концепции коллективного пользования уникальными аппаратными и программными ресурсами. Выделен ряд ключевых факторов, обусловивших появление и развитие информационно-технологической концепции *cloud computing*, в основе которой лежат технологии, в том числе реализованные на основе метода разделения времени.

3. Исследованы основные направления применения метода разделения времени в ряде прикладных областей. Для рассмотренных областей систематизированы основные отличительные особенности его практической реализации на основе признаков «уровень структурной иерархии» и «реализуемый режим временного разделения». Исследованы основные подходы прикладного применения временного разделения в автоматизированных системах экспериментальных исследований.

4. Сформулировано и введено определение многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы, которое конкретизирует обозначенную двойственную специфику процесса ее функционирования как автоматизированной системы экспериментальных исследований и системы массового обслуживания при выполнении индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий нескольких пользователей на основе одного разделяемого аппаратно-программного ресурса.

5. В соответствии с выделенной двойственной спецификой процесса функционирования МРИУС в виде АСЭИ и СМО определены и рассмотрены ее обобщенный аппаратно-программный состав, назначение и функции ее основных компонентов.

6. Формализован и представлен базовый алгоритм функционирования МРИУС, отображающий ряд принципиальных особенностей ее функционирования как СМО. В соответствии с базовым алгоритмом функционирования выделен класс СМО, который применяется для описания процесса функционирования МРИУС при одновременной работе нескольких терминалов пользователей с одним разделяемым ресурсом.

7. Проведены исследования функциональных ограничений построения МРИУС на основе теоремы Литтла для соответствующего класса СМО. Определены общие аналитические выражения для допустимого числа одновременно работающих терминалов пользователей, задания от которых могут быть выполнены на рассматриваемом временном интервале функционирования с точки зрения обеспечения минимальной результативности по их числу.

8. Проведен анализ основных известных подходов к нормированию времени ответа на запросы пользователей в многопользовательских вычислительных системах с разделением времени, как в эргатических системах. Он показал отсутствие единых общих нормативных требований к их оперативности функционирования, но при этом выявил общую тенденцию попыток связи нормативных оценок с характером выполняемых работ или решаемых задач на их основе. В результате проведенного анализа подходов к нормированию и основных областей применения МРИУС предложены и даны определения основных показателей оперативности их функционирования, которые применяются в рамках исследования.

9. Рассмотрены аспекты, обуславливающие и стимулирующие развитие направления эксплуатации специализированного экспериментального оборудования на основе концепции *мультиарендности* в рамках развития цифровой трансформации производственной, научной и образовательной деятельности.

10. Проведен анализ проблематики разработки многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем. Сформулированы основные проектные задачи, возникающие в процессе разработки, отсутствие комплексного решения которых обуславливает недостаточные технические характеристики МРИУС.

11. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Разработка МРИУС связана с решением на этапе эскизного и/или технического проекта совокупности частных проектных задач, к которым можно отнести следующие:

- выбор структуры аппаратного построения;
- разработка и выбор применяемых функциональных узлов;
- разработка алгоритмов управления;
- разработка алгоритмов сбора и обработки измерительной информации;
- разработка и выбор алгоритма диспетчеризации разделяемого ресурса;
- разработка составных компонентов программного обеспечения МРИУС;
- распределение функций преобразования измерительной информации между

составными программными компонентами системы и т. д. [20, 22, 138, 188, 189, 215, 235].

В работе в процессе разработки методологии проектирования реализован подход целенаправленного поиска облика проектного решения МРИУС на сформированном множестве альтернативных вариантов в соответствии с заданной целевой функцией – показателем технического уровня [233, 236, 237]. При формализации описания проектного решения МРИУС использован теоретико-множественный подход [188, 189, 238, 215, 239]. В последующих параграфах рассмотрены основные принципы и определения, положенные в основу разработки и интеграции методов, моделей, методик, алгоритмов и технических решений в предметно-ориентированную методологию проектирования, направленную на разработку проектного решения МРИУС с улучшенными показателями технического уровня.

2.1 Разработка информационной модели проектного решения МРИУС

Как было показано в главе 1, общая структура g -го проектного решения МРИУС может быть представлена как совокупность значений *описательных* признаков K (см. выражение (1.3.3)):

$$mrius_g \Leftrightarrow \{k_{l,m}\}, mrius_g \in \mathbf{MRIUS}. \quad 2.1.1$$

Выделим ряд основных описательных признаков K_l , основываясь на исследованной в главе 1 специфике МРИУС.

Подходы к решению задач разработки функциональных узлов, устройств первичного преобразования и обработки измерительной информации, устройств формирования управляющих воздействий, исполнительных устройств, устройств аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования сигналов всесторонне рассмотрены, например, в работах [20, 89, 91, 95, 105]. Задачи разработки и обеспечения требуемых метрологических характеристик каналов измерения и управления достаточно полно раскрыты, например, в [20, 105, 235, 240]. Теоретические основы применения математических методов при решении задач сбора и обработки данных описаны, например, в [241]. Решения задач разработки программных модулей управления, преобразования измерительной информации и обработки экспериментальных данных приведены, например, в работах [183, 242]. На основании вышеизложенного разработка МРИУС в рамках исследований реализуется на основе *метода агрегатирования* и рассматривается на уровне *функциональных узлов* и *функциональных программных компонентов*.

В соответствии с этим информационная модель проектного решения МРИУС базируется на методологии проектирования модульных универсальных автоматизированных измерительных информационных систем [20, 189] и методологии проектирования модульных информационно-управляющих систем [188], переработанных, комплексированных и адаптированных к специфике МРИУС.

Техническое задание (ТЗ), методика проведения экспериментальных исследований, программа и методика испытаний определяют объект управления и контроля, а также перечень функциональных (или измерительных) задач **MT**, решаемых пользователями в режиме диалога на основе МРИУС и характеризуемых множеством измеряемых физических величин, требований к точности и условиям их измерения.

Заданному перечню решаемых измерительных задач соответствуют множество необходимых операций **O**, выполняемых МРИУС по заданиям пользователей в режиме диалога, и требования к качеству их выполнения, описываемых множеством **Q** [20, 125, 243]. Таким образом, заданы множества **O** и **Q**:

$$MT \rightarrow \langle O, Q \rangle; \quad (2.1.2)$$

$$O = \{o_i | i = 1, I\}, \quad I - \text{мощность множества}; \quad (2.1.3)$$

$$Q = \{q_i | i = 1, I\}; \quad (2.1.4)$$

$$o_i \rightarrow q_i, \quad (2.1.5)$$

где \rightarrow – знак соответствия [238, 253, 259].

Под выражением $o_i \in O$ в работе понимается любая операция, предписанная измерительной задачей по исследованию объекта, его управлению и контролю и пр., например, установка условий и параметров измерения, измерение частоты, разности фаз, силы тока, температуры, структурное или параметрическое изменение конфигурации объекта управления и контроля, изменение номинала электрорадиоизделий, изменение конфигурации канала измерения, автоматизированное управление и т.д. [189].

В свою очередь, под выражением $q_i \in Q$ понимаются требуемые значения метрологических характеристик выполнения операции o_i [20, 133, 189, 235]. Например, требования: к диапазону и погрешности измеряемых физических величин; длительности фиксируемых переходных процессов; пределам изменения управляемых параметров; погрешности установки значений управляющих воздействий (амплитуды сигнала, температуры, уровня вибраций, силы тока и т.д.).

Каждой определенной операции $o_i \in O$ и качеству ее выполнения $q_i \in Q$ соответствуют функциональные узлы, устройства и т.д., совокупность которых образует компоненты аппаратного обеспечения МРИУС [126], а также типовые алгоритмические решения, реализованные в виде программ, подпрограмм, программных модулей, являющихся составными частями компонентов программного обеспечения МРИУС [134].

Обозначим исходную совокупность типовых аппаратных решений функциональных узлов и устройств автоматизированных измерительных систем и систем управления, и МРИУС в частности, множеством \mathbb{H} :

$$\mathbb{H} = \{H_j | j = 1, J^{\Phi Y}\}. \quad (2.1.6)$$

Множество \mathbb{H} включает в себя следующие основные типы функциональных узлов и устройств: измерительные средства, средства вычислительной техники, устройства сопряжения, устройства оцифровки, устройства аналогового ввода/вывода, устройства

цифрового ввода/вывода, многофункциональные устройства сбора данных, модульные приборы, исполнительные устройства, датчики, коммутационные устройства, контроллеры интерфейсов и пр. [189, 240].

Типы функциональных узлов и устройств, формирующих \mathbb{H} , в общем виде описываются множеством \mathbf{TP} :

$$\mathbf{TP} = \{TP_k | k = 1, K^{\text{тип}}\}. \quad (2.1.7)$$

Подмножество функциональных узлов и устройств, соответствующих k -му типу, определяется выражением

$$\mathbf{H}^{TP_k} = \bigcup_{j=1}^{J^{TP_k}} H_j, H_j \subset \mathbb{H}, \quad (2.1.8)$$

где J^{TP_k} – число узлов и/или устройств k -го типа.

Таким образом, в соответствии с (2.1.8), выражение (2.1.6) также можно записать следующим образом:

$$\mathbb{H} = \bigcup_{k=1}^{K^{\text{тип}}} \mathbf{H}^{TP_k} = \bigcup_{k=1}^{K^{\text{тип}}} \bigcup_{j=1}^{J^{TP_k}} H_j. \quad (2.1.9)$$

Обозначим множеством \mathbb{S} исходную совокупность типовых решений программного обеспечения автоматизированных измерительных систем, автоматизированных систем управления, автоматизированных систем экспериментальных исследований и МРИУС в частности, в виде программ, подпрограмм, программных модулей:

$$\mathbb{S} = \{S_k | k = 1, K^{\text{ПО}}\}. \quad (2.1.10)$$

Множество \mathbb{S} содержит системное программное обеспечение \mathbb{S}^C и прикладное программное обеспечение $\mathbb{S}^{\text{ПП}}$ [134, 188], т. е.

$$\mathbb{S} = \mathbb{S}^C \cup \mathbb{S}^{\text{ПП}}. \quad (2.1.11)$$

Прикладное программное обеспечение $\mathbb{S}^{\text{ПП}}$ объединяет подмножество инструментальных (технических) программных модулей $\mathbf{S}^{\text{ИН}}$ и подмножество программных модулей стандартного математического обеспечения $\mathbf{S}^{\text{ММ}}$ [241, 215]:

$$\mathbb{S}^{\text{ПП}} = \mathbf{S}^{\text{ИН}} \cup \mathbf{S}^{\text{ММ}}. \quad (2.1.12)$$

Множество $\mathcal{S}^{\text{ИН}}$, в свою очередь, включает в свой состав прикладные инструментальные (технические) программы управления функциональными узлами и устройствами, драйвера и пр. [183, 242]. Множество $\mathcal{S}^{\text{ММ}}$ представлено совокупностью прикладных программ, реализующих стандартные методы и функции обработки измерительной информации и экспериментальных данных, к которым можно отнести методы цифровой обработки сигналов, математической статистики, вычислительной математики, численные методы и пр. [183, 241, 244, 245].

В рамках исследования полагается, что в состав каждого из множеств \mathbb{H} и \mathbb{S} входят элементы, пара сочетаний подмножеств которых обеспечивает выполнение заданной операции $o_i \in \mathcal{O}$ с требуемым качеством $q_i \in \mathcal{Q}$, т. е.

$$(\exists \mathbb{H} \text{ и } \exists \mathbb{S}): \left\langle \bigcup_{j=1}^{J_i^{\Phi Y}} H_j, \bigcup_{k=1}^{K_i^{\text{ПО}}} S_k \right\rangle \rightarrow \langle o_i, q_i \rangle, \quad (2.1.13)$$

где $J_i^{\Phi Y}$, $K_i^{\text{ПО}}$ – числа элементов множеств \mathbb{H} и \mathbb{S} , обеспечивающих выполнение операции o_i .

В общем случае для выполнения операций \mathcal{O} с требуемым качеством, характеризуемым множеством \mathcal{Q} , могут быть использованы функциональные узлы, устройства или группы функциональных узлов, группы устройств и алгоритмические решения в виде программ, подпрограмм, программных модулей в различном их сочетании. Таким образом, могут быть сформированы множества возможных вариантов аппаратного \mathbf{H} и программного \mathbf{S} обеспечений МРИУС, соответствующих паре $\langle \mathcal{O}, \mathcal{Q} \rangle$ и множеству решаемых измерительных задач \mathbf{MT} . В соответствии с этим аппаратное обеспечение g -го проектного решения МРИУС можно представить следующим образом:

$$\mathbf{H}_g = \bigcup_{k=1}^{K^{\text{ТИП}}} \bigcup_{j=1}^{I_g^{\text{TP}k}} H_j, \quad (2.1.14)$$

где $I_g^{\text{TP}k}$ – число функциональных узлов и устройств k -го типа, входящих в состав аппаратного обеспечения g -го проектного решения МРИУС.

Каждый из компонентов аппаратного обеспечения g -го проектного решения МРИУС также в общем виде описывается в базисе функциональных узлов и устройств, определяемых множеством \mathbb{H} , следующим выражением:

$$HC_g^l \rightarrow \bigcup_{k=1}^{K_l^{\text{тип}}} \bigcup_{j=1}^{I_{l,g}^{TPk}} H_j, \quad (2.1.15)$$

где HC_g^l – l -й компонент аппаратного обеспечения g -го проектного решения МРИУС, $K_l^{\text{тип}}$ – количество типов функциональных узлов и устройств, используемых при реализации соответствующего l -го компонента аппаратного обеспечения МРИУС, $I_{l,g}^{TPk}$ – количество функциональных узлов и устройств k -го типа, вошедших в состав l -го компонента аппаратного обеспечения МРИУС.

Каждый компонент программного обеспечения (ПО) g -го проектного решения МРИУС в соответствии с выражением (2.1.10) может быть представлен в общем виде следующим образом:

$$SC_g^m \rightarrow \bigcup_{j=1}^{K_{m,g}^{\text{ПО}}} S_j, \quad (2.1.16)$$

где SC_g^m – m -й компонент программного обеспечения g -го проектного решения МРИУС, $K_{m,g}^{\text{ПО}}$ – количество программ, подпрограмм, программных модулей, вошедших в состав m -го компонента программного обеспечения МРИУС.

Программное обеспечение g -го проектного решения МРИУС в соответствии с выражениями (2.1.11), (2.1.12) также можно представить как

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_g &= \mathbf{S}_g^C \cup \mathbf{S}_g^{\text{ПП}} = \mathbf{S}_g^C \cup \mathbf{S}_g^{\text{ИН}} \cup \mathbf{S}_g^{\text{ММ}}, \\ \mathbf{S}_g^C &\subset \mathbf{S}^C, \mathbf{S}_g^{\text{ИН}} \subset \mathbf{S}^{\text{ИН}}, \mathbf{S}_g^{\text{ММ}} \subset \mathbf{S}^{\text{ММ}}. \end{aligned} \quad (2.1.17)$$

С точки зрения состава программного обеспечения МРИУС, исследованного в пункте 1.2.1, подмножество \mathbf{S}_g^C включает в себя системное ПО, функционирующее на терминалах пользователя $SS_g^{\text{ТП}}$, и системное ПО, функционирующее на вычислительном компоненте МРИУС $SS_g^{\text{ЭВМ}}$ [134, 246, 247]:

$$\mathbf{S}_g^C = SS_g^{\text{ТП}} \cup SS_g^{\text{ЭВМ}}, \quad (2.1.18)$$

$$SS_g^{\text{ТП}} \subset \mathbf{S}^C, SS_g^{\text{ЭВМ}} \subset \mathbf{S}^C. \quad (2.1.19)$$

Подмножества $\mathbf{S}_g^{\text{ИН}}$, $\mathbf{S}_g^{\text{ММ}}$ включают в свой состав соответствующие программы, подпрограммы и программные модули, необходимые для выполнения множества

операций O с требуемым качеством Q на основе соответствующего аппаратного обеспечения g -го проектного решения МРИУС H_g :

$$S_g^{\text{ИН}} = \bigcup_{i=1}^{I_g^{\text{ИН}}} S_i^{\text{ИН}}, S_i^{\text{ИН}} \subset S^{\text{ИН}}, \quad (2.1.20)$$

$$S_g^{\text{ММ}} = \bigcup_{i=1}^{I_g^{\text{ММ}}} S_i^{\text{ММ}}, S_i^{\text{ММ}} \subset S^{\text{ММ}}, \quad (2.1.21)$$

где $I_g^{\text{ИН}}$, $I_g^{\text{ММ}}$ – числа инструментальных программ и программ стандартного математического обеспечения соответственно, входящих в состав прикладного программного обеспечения g -го проектного решения $S_g^{\text{ПП}}$.

Диспетчер разделяемого ресурса $SV^{\text{ЭВМ}}$, рассматриваемый как отдельный компонент программного обеспечения МРИУС, разрабатывается в соответствии с реализуемым алгоритмом диспетчеризации. Обозначим переменной A_g реализуемый в g -м проектном решении МРИУС алгоритм диспетчеризации разделяемого ресурса. Переменная A_g является элементом множества возможных альтернативных вариантов алгоритмов диспетчеризации МРИУС – A :

$$A_g \in A, A = \{A_r | r = 1, R^A\}. \quad (2.1.22)$$

Таким образом, для g -го проектного решения

$$SV_g^{\text{ЭВМ}} \rightarrow A_g. \quad (2.1.23)$$

Задачи выбора и/или разработки системного ПО, функционирующего на терминалах пользователя и вычислительном компоненте МРИУС, реализованном, например, в виде измерительно-управляющей ЭВМ, могут быть решены на основе известных подходов [86, 246]. При этом при проектировании программного обеспечения МРИУС (см. п. 1.2.1) компоненты $SS^{\text{ТП}}$ и $SS^{\text{ЭВМ}}$ определяют интерфейс прикладного программирования для разработки соответствующих компонентов прикладного ПО МРИУС – $SA^{\text{ТП}}$ и $SA^{\text{ЭВМ}}$, а также диспетчера разделяемого ресурса $SV^{\text{ЭВМ}}$ [246–248].

Как было отмечено ранее, прикладное ПО МРИУС, представленное основными компонентами, рассмотренными в параграфе 1.2.1 (рисунок 1.2.2), может иметь несколько вариантов реализации, обусловленных вариативностью исполнения

аппаратного обеспечения МРИУС и распределения функций обработки измерительной информации между терминалом пользователя и измерительно-управляющей ЭВМ [207, 249]. Согласно этому компоненты прикладного ПО МРИУС $SA^{ТП}$ и $SA^{ЭВМ}$, реализуемые, как правило, в виде *графического интерфейса пользователя и программного комплекса управления и измерения* соответственно, для g -го проектного решения могут быть представлены в виде пар

$$SA_g^{ТП} = \langle S_{ТП}^{ИН}, S_{ТП}^{ММ} \rangle_g, \quad S_{ТП}^{ИН} \subset S_g^{ИН}, \quad S_{ТП}^{ММ} \subset S_g^{ММ}; \quad (2.1.24)$$

$$SA_g^{ЭВМ} = \langle S_{ЭВМ}^{ИН}, S_{ЭВМ}^{ММ} \rangle_g, \quad S_{ЭВМ}^{ИН} \subset S_g^{ИН}, \quad S_{ЭВМ}^{ММ} \subset S_g^{ММ}; \quad (2.1.25)$$

В соответствии с вышеизложенным программное обеспечение g -го проектного решения МРИУС в целом можно представить в следующем виде:

$$S_g = \{SS_g^{ТП}, SS_g^{ЭВМ}, SA_g^{ТП}, SA_g^{ЭВМ}, SV_g^{ЭВМ}\}. \quad (2.1.26)$$

Аппаратное и программное обеспечение g -го проектного решения МРИУС с учетом выражений (2.1.14), (2.1.26) может быть также описано парой $HS_g = \langle H_g, S_g \rangle$, соответствующей заданным перечню и качеству выполнения необходимых операций:

$$\langle O, Q \rangle \rightarrow HS_g. \quad (2.1.27)$$

Соединение функциональных узлов и устройств, входящих в состав аппаратного обеспечения g -го проектного решения МРИУС, описывается графом

$$\Gamma_g := (H_g, E_g), \quad (2.1.28)$$

где H_g – аппаратное обеспечение МРИУС, определяемое на основе выражения (2.1.14); E_g – множество пар вершин, характеризующее функциональные связи между элементами множества H_g [243, 250, 251–253].

Таким образом, в соответствии с обозначенной спецификой выполнения конфигурационных и измерительных заданий пользователей в интерактивном диалоговом режиме в диссертационной работе применяется следующая информационная модель проектного решения МРИУС [234, 254]:

$$mrius_g = \{H_g, S_g, \Gamma_g, A_g\}. \quad (2.1.29)$$

Используемая в работе информационная модель проектного решения включает в свой состав признаки, достаточные для определения на основе методов математического

моделирования вида функциональных зависимостей показателей оперативности функционирования МРИУС ($f_q^{оп}$), рассмотренных ранее в пункте 1.2.3, на основе представления МРИУС как системы массового обслуживания [181, 243, 252]. Структурная схема взаимосвязи компонентов предложенной модели проектного решения МРИУС и параметров математической модели динамики функционирования в виде СМО приведена на рисунке 2.1.1 [127, 151, 255].



Рисунок 2.1.1 – Обобщенная структурная схема взаимосвязи компонентов предложенной информационной модели проектного решения МРИУС и ее математической модели как СМО

Вариативность подходов к решению измерительных задач (выражения (2.1.2), (2.1.27)), число сочетаний вариантов возможных функциональных реализаций компонентов аппаратного и программного обеспечения МРИУС (выражения (2.1.14)–(2.1.26)), возможные варианты структур аппаратного построения МРИУС и реализуемых алгоритмов диспетчеризации обуславливают отсутствие возможности практической реализации метода полного перебора при поиске проектного решения МРИУС с наилучшим показателем технического уровня на множестве его возможных альтернативных вариантов (выражение (2.1.29)) [188, 189, 233].

В целях решения обозначенной задачи структурно-параметрического синтеза МРИУС в основу методологии положен ряд принципов, обеспечивающих локализацию множества допустимых вариантов проектных решений МРИУС [233]. Рассмотрение принципов представлено в следующем параграфе.

2.2 Принципы сокращения области поиска допустимых вариантов проектных решений МРИУС

При структурно-параметрическом синтезе систем широкое применение получили эвристические методы, позволяющие ограничить перебор допустимых вариантов проектных решений [236]. В соответствии с данным подходом в основу методологии положены:

- *принцип иерархичности* (в целях обеспечения конечности вариантов аппаратного построения МРИУС при решении задачи структурного синтеза);
- *принцип ограничения количества допустимых альтернатив* (в целях исключения необходимости полного перебора всех возможных альтернативных вариантов реализации проектных решений МРИУС);
- *принцип унификации* (в целях формирования единства подходов к решению ряда частных проектных задач и сокращения временных затрат на разработку компонентов программного и аппаратного обеспечения МРИУС).

Рассмотрим перечисленные принципы подробнее.

2.2.1 Принцип иерархичности

Суть принципа заключается в декомпозиции и представлении структуры МРИУС в рамках методологии как совокупности взаимодействующих компонентов аппаратного обеспечения – *аппаратных компонентов*, формализации требований к ним и дальнейшей их разработке в базисе функциональных узлов и устройств, определяемых выражением (2.1.14), на основе общеизвестных подходов, методов и методик.

Развитие автоматизированных измерительных систем по основным отраслям науки и техники, к которым относят измерения тепловых, электрических, магнитных, механических и прочих величин в комплексе с многообразием возможных объектов управления и контроля, приводит к множеству возможных вариантов аппаратно-

программного обеспечения и структурного построения МРИУС, полный перебор вариантов которых за приемлемое время не представляется возможным [20, 133, 236, 240, 256]. При этом, как было отмечено ранее, подходы структурного и параметрического синтеза каналов измерения и управления применительно к особенностям конкретных видов объектов управления и контроля рассмотрены неоднократно [20, 133, 235, 240, 257 и др.]. Постановка и формализация задачи определения номенклатуры функциональных узлов и устройств автоматизированных систем с учетом накладываемых ограничений на вариант исполнения, условия эксплуатации, напряжение питания, производительность, достоверность контроля и прочее всеобъемлемо рассмотрены, например, в работе [189]. Постановка задач синтеза модулей программного обеспечения систем обработки данных, обеспечивающих минимум времени решения функциональных задач, осуществлена в частности, в [188].

В рамках предложенной методологии *принцип иерархичности* реализован на основе *решения*, представляющего собой набор базовых структур аппаратного построения МРИУС в разрезе рассмотренных ранее в параграфах 1.2 и 2.1 *аппаратных компонентов*. Набор базовых структур аппаратного построения МРИУС в общем описывается множеством

$$\mathbf{BS} = \{BS_r | r = 1, R^{\text{BC}}\}. \quad (2.2.1)$$

Каждой базовой структуре МРИУС соответствует граф

$$\Gamma_r^{\text{BC}} = (\mathbf{H}_r^{\text{BC}}, \mathbf{E}_r^{\text{BC}}), \quad (2.2.2)$$

где \mathbf{H}_r^{BC} – множество аппаратных компонентов МРИУС, входящих в состав r -й базовой структуры; \mathbf{E}_r^{BC} – множество пар, характеризующих соединение элементов множества \mathbf{H}_r^{BC} .

Множество аппаратных компонентов МРИУС r -й базовой структуры определяется выражением

$$\mathbf{H}_r^{\text{BC}} = \bigcup_{l=1}^{L_r^{\text{BC}}} \mathbf{HC}^l, \quad (2.2.3)$$

где \mathbf{HC}^l – l -й аппаратный компонент МРИУС, входящий в состав r -й базовой структуры; L_r^{BC} – количество типов аппаратных компонентов r -й базовой структуры МРИУС.

Согласно выражению (2.1.15) каждый l -й аппаратный компонент r -й базовой структуры, может быть представлен на основе элементов H_j , т. е. каждому аппаратному компоненту МРИУС HC^l соответствует подмножество элементов H_j :

$$HC^l \Leftrightarrow HC^{*l} = \bigcup_{k=1}^{K_l^{\text{ТИП}}} \bigcup_{j=1}^{I_l^{\text{ТП}k}} H_j. \quad (2.2.4)$$

Таким образом, в соответствии с *принципом иерархичности* осуществляется переход от множества компонентов аппаратного обеспечения МРИУС $H_r^{\text{БС}}$ к их реализации на основе функциональных узлов и устройств H_j . С учетом вышеизложенного аппаратное обеспечение МРИУС на основе r -й базовой структуры аппаратного построения в базисе, определяемым множеством \mathbb{H} , описывается следующим выражением:

$$H \rightarrow H_r^{\text{БС}^{\mathbb{H}}} = \bigcup_{l=1}^{L_r^{\text{БС}}} \bigcup_{k=1}^{K_l^{\text{ТИП}}} \bigcup_{j=1}^{I_l^{\text{ТП}k}} H_j. \quad (2.2.5)$$

Каждому аппаратному компоненту HC^l , определяемому в общем виде (2.1.15), соответствует граф, описывающий его состав и внутреннюю структуру:

$$\Gamma^{HC^l} := (HC^{*l}, E^{HC^l}), \quad l = 1, L_r^{\text{БС}}, \quad (2.2.6)$$

где E^{HC^l} – множество пар, характеризующих соединение функциональных узлов и устройств H_j в составе l -го аппаратного компонента для r -й базовой структуры МРИУС.

Таким образом, соединение функциональных узлов и устройств H_j в составе r -й базовой структуры МРИУС описывается выражением

$$E \rightarrow E_r^{\text{БС}^{\mathbb{H}}} = \bigcup_{l=1}^{L_r^{\text{БС}}} E^{HC^l}. \quad (2.2.7)$$

Следовательно, граф аппаратного построения МРИУС (выражение (2.1.28)) в соответствии с r -й базовой структурой МРИУС в базисе, определяемом множеством \mathbb{H} , характеризуется следующим выражением:

$$\Gamma \rightarrow \Gamma_r^{\text{BC}\mathbb{H}} = \bigcup_{l=1}^{L_r^{\text{BC}}} \Gamma^{\text{HC}^l} := (\mathbf{H}_r^{\text{BC}\mathbb{H}}, \mathbf{E}_r^{\text{BC}\mathbb{H}}). \quad (2.2.8)$$

Формулы (2.2.4)–(2.2.8) характеризуют иерархичность разработки аппаратного обеспечения МРУИС. Декомпозиция аппаратного обеспечения МРИУС на множество аппаратных компонентов в рамках r -й базовой структуры и их дальнейшая реализация на основе заданного множеством \mathbb{H} базиса функциональных узлов и устройств реализует подход нисходящего проектирования [258].

В общем случае для каждого l -го типа аппаратного компонента возможно несколько вариантов его реализации. В свою очередь, вариация реализации аппаратных компонентов обуславливает многовариантность исполнения r -й базовой структуры МРИУС. Обобщенная иллюстрация принципа иерархичности на основе материалов работы [20] приведена на рисунке 2.2.1.

В соответствии с обобщенным составом аппаратного обеспечения МРИУС, исследованным в параграфе 1.2.1, множество \mathbf{H}_r^{BC} в общем виде представлено следующими *аппаратными компонентами*:

$$\mathbf{H}_r^{\text{BC}} = \{\mathbf{HC}^{\text{ТП}}, \mathbf{HC}^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{HC}^{\text{КУ}}, \mathbf{HC}^{\text{КИ}}, \mathbf{HC}^{\text{ОУиК}}\}, \quad (2.2.9)$$

где $\mathbf{HC}^{\text{ТП}}$ – терминалы пользователей; $\mathbf{HC}^{\text{ЭВМ}}$ – вычислительный компонент; $\mathbf{HC}^{\text{КУ}}$ – каналы управления; $\mathbf{HC}^{\text{КИ}}$ – каналы измерения; $\mathbf{HC}^{\text{ОУиК}}$ – объекты управления и контроля [125, 126].

Учитывая (2.1.26) и (2.2.9), выражение (2.1.29) представим в следующем виде:

$$mrius_g = \left\{ \mathbf{HC}_g^{\text{ТП}}, \mathbf{HC}_g^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{HC}_g^{\text{КУ}}, \mathbf{HC}_g^{\text{КИ}}, \mathbf{HC}_g^{\text{ОУиК}}, \mathbf{SA}_g^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{SA}_g^{\text{ТП}}, \mathbf{SS}_g^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{SS}_g^{\text{ТП}}, \mathbf{SV}_g^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{E}_g^{\text{BC}}, \mathbf{A}_g \right\}. \quad (2.2.10)$$

Установленные базовыми структурами состав и способ структурной организации МРИУС, взаимосвязи аппаратных компонентов МРИУС позволяют перейти к решению задачи синтеза составных компонентов ее базовой структуры на основе известных методов и методик [20, 133, 189 и др.].

Подробно базовые структуры аппаратного построения МРИУС, используемые в качестве прототипов в процессе разработки в рамках предложенной методологии, рассмотрены в главе 3.

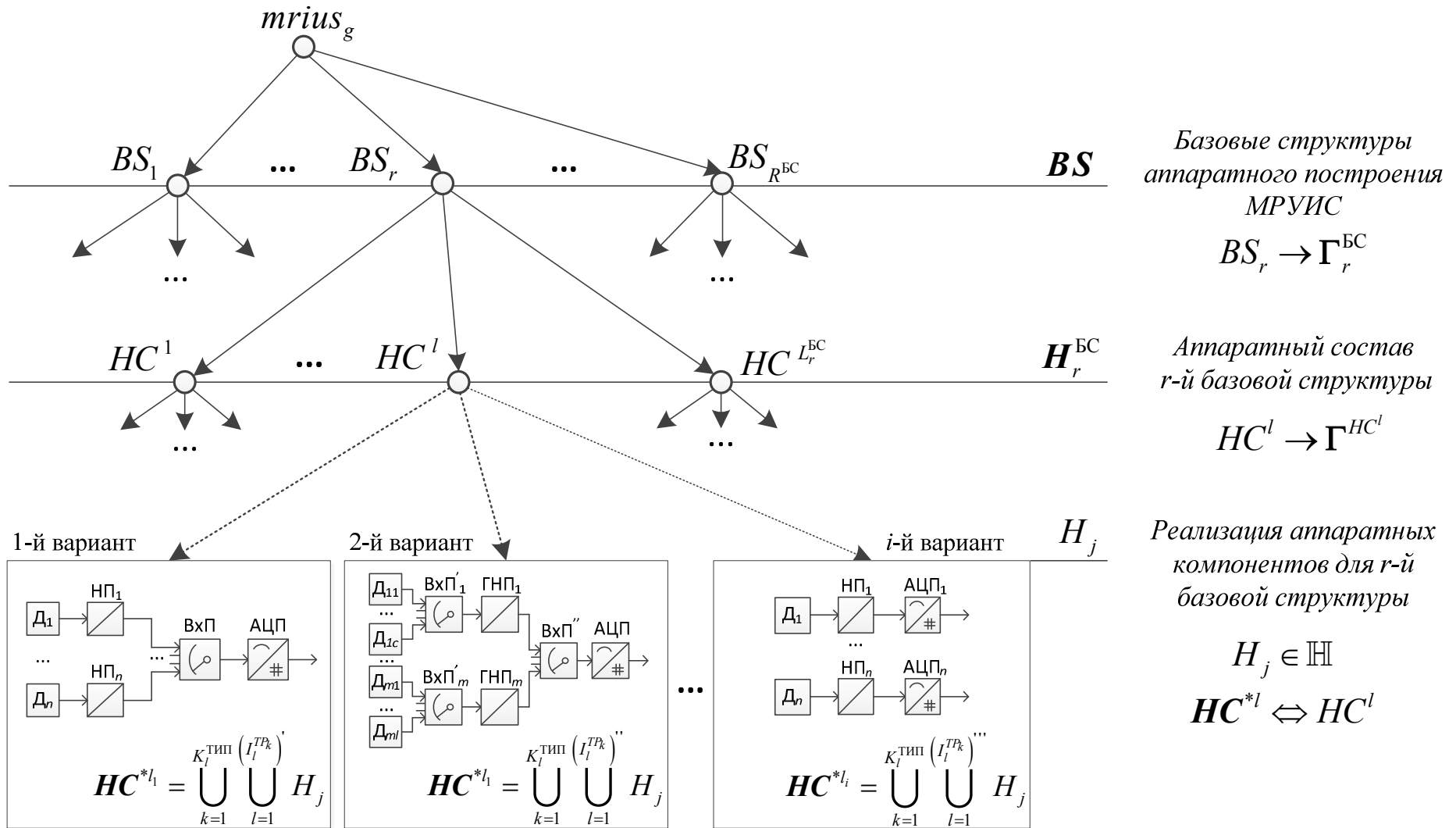


Рисунок 2.2.1 – Схематическая иллюстрация принципа иерархичности: Д – датчик; НП – нормирующий преобразователь; ВхП – входной переключатель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГНП – групповой нормирующий преобразователь

2.2.2 Принцип ограничения количества допустимых альтернатив

Суть принципа ограничения количества допустимых альтернатив заключается в локализации подмножества проектных решений МРИУС на общем множестве альтернативных вариантов в соответствии с выделенными частными требованиями технического задания. Принцип ограничения допустимых альтернатив в рамках методологии реализуется посредством рассмотрения и последующей селекции возможных сочетаний аппаратного и программного обеспечения МРИУС, осуществляющих решение заданного перечня измерительных задач (см. выражение (2.1.27)) с учетом заданных значений параметров оперативности [233]. Для локализации структуры МРИУС при формировании альтернативных вариантов проектных решений в составе методологии используется решение в виде базовых аппаратных структур построения, сформированных на основе *принципа иерархичности*, который рассмотрен в предыдущем пункте.

С учетом заданного в ТЗ перечня измерительных задач MT , соответствующих ему множества операций O и требований к качеству их выполнения Q (выражение (2.1.2)) для каждой базовой структуры МРИУС BS_r (см. выражение (2.2.1)) проектируются аппаратные и программные компоненты МРИУС на основе вошедшей в методологию *методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС*. Таким образом, каждой базовой структуре МРИУС соответствует пара множеств аппаратно-программного обеспечения, определяемая выражением

$$HS^{BC} = \langle H, S \rangle^{BC}. \quad (2.2.11)$$

Каждой базовой структуре построения МРИУС в общем случае соответствуют несколько вариантов исполнения аппаратного и программного обеспечения, каждый из которых удовлетворяет условиям выполнимости операций. То есть:

$$\forall BS_r \rightarrow HS_r^{BC}; \quad (2.2.12)$$

$$HS_r^{BC} = \{HS_{v_r}^{BC} \mid v_r = 1, V_r^{BI}\}, V_r^{BI} \in V^{BI}; \quad (2.2.13)$$

$$V^{BI} = \{V_r^{BI} \mid r = 1, R^{BC}\}, \quad (2.2.14)$$

где HS_r^{BC} – множество вариантов исполнения r -й базовой структуры МРИУС; $HS_{v_r}^{BC}$ – v -й вариант исполнения аппаратно-программного обеспечения r -й базовой структуры

МРИУС; $V_r^{\text{БИ}}$ – количество вариантов исполнения r -й базовой структуры; $V^{\text{БИ}}$ – множество количеств вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС.

Варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС HS_r^{BC} образуют множество HS^{BC} :

$$HS^{\text{BC}} = \{HS_r^{\text{BC}} \mid r = 1, R^{\text{BC}}\}. \quad (2.2.15)$$

Каждому варианту аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ соответствуют среднее число заданий пользователей $\bar{X}_{v_r}^{\text{BC}}$, формируемых в диалоговом режиме в целях решения измерительных задач, среднее время размышления пользователей между формированием заданий $\bar{t}_{\text{разм}}$, а также совокупность длительностей функциональных операций, выполняемых в результате заданий и обобщенно характеризуемых средним временем обслуживания $\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{BC}}$. Следовательно, каждому варианту $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ соответствует пара параметров сценария диалога $SD_{v_r}^{\text{BC}}$:

$$HS_{v_r}^{\text{BC}} \rightarrow SD_{v_r}^{\text{BC}}, \quad (2.2.16)$$

$$SD_{v_r}^{\text{BC}} = \langle \lambda; \mu \rangle_{v_r}^{\text{BC}}, \quad (2.2.17)$$

где $\lambda = 1/\bar{t}_{\text{разм}}$; $\mu = \bar{t}_{\text{обсл}}$.

Таким образом, множеству HS_r^{BC} сопоставляется множество SD_r^{BC} :

$$f^{\text{CD}}: HS_r^{\text{BC}} \mapsto SD_r^{\text{BC}}, \quad (2.2.18)$$

$$SD_r^{\text{BC}} = \{SD_{v_r}^{\text{BC}} \mid v_r = 1, V_r^{\text{БИ}}\}, V_r^{\text{БИ}} \in V^{\text{БИ}}, \quad (2.2.19)$$

где f^{CD} – правило сопоставления элементов множества HS_r^{BC} с элементами множества SD_r^{BC} в соответствии с вошедшей в состав методологии *методикой оценки параметров сценария диалога*; SD_r^{BC} – множество пар параметров диалога, соответствующих вариантам исполнения аппаратно-программного состава в рамках r -й базовой структуры; \mapsto – знак отображения [238, 253, 259, 260].

Для определения границ множества *допустимых* вариантов проектных решений МРИУС на основе итерационного решения задачи «анализ – синтез» с использованием методов математического моделирования необходимо наличие *априорной информации* о

структуре проектируемой МРИУС, параметрах распределения длительностей обслуживания, вероятностной модели входного потока (см. рисунок 2.1.1).

В соответствии с результатами исследований, представленными в параграфе 1.2.3, и рассмотренным в пункте 2.2.1 принципом иерархичности для каждой базовой структуры МРИУС BS_r определяется множество граничных значений пар параметров сценария диалога SD_r^{GP} согласно заданному в ТЗ параметру оперативности $p_q^{оп} \in P^{огр}$:

$$f^{GP}: \langle BS_r, p_q^{оп} \rangle \mapsto SD_r^{GP}; \quad (2.2.20)$$

$$SD_r^{GP} = \{SD_{l_r}^{GP} | l_r = 1, L_r^{GP}\}; \quad (2.2.21)$$

$$SD_{l_r}^{GP} = \langle \lambda; \mu \rangle_{l_r}^{GP}, \quad (2.2.22)$$

где f^{GP} – правило сопоставления пары $\langle BS_r, p_q^{оп} \rangle$ с элементами множества SD_r^{GP} , определяемое вошедшей в состав методологии *методикой формирования граничных значений параметров сценария диалога*; L_r^{GP} – мощность формируемого множества граничных значений пар параметров сценария диалога.

Область допустимых значений пар параметров для r -й базовой структуры $SD_r^{ОДЗ}$ определяется как результат пересечения множеств SD_r^{BC} и SD_r^{GP} :

$$SD_r^{ОДЗ} = SD_r^{BC} \cap SD_r^{GP}; \quad (2.2.23)$$

$$SD_r^{ОДЗ} = \{SD_{k_r}^{ОДЗ} | k_r = 1, K_r^{ОДЗ}\}; \quad (2.2.24)$$

$$SD_{k_r}^{ОДЗ} = \langle \lambda; \mu \rangle_{k_r}^{ОДЗ}; \quad (2.2.25)$$

$$K_r^{ОДЗ} \in K^{ОДЗ}, K^{ОДЗ} = \{K_r^{ОДЗ} | r = 1, R^{BC}\}, \quad (2.2.26)$$

где $SD_{k_r}^{ОДЗ}$ и $K_r^{ОДЗ}$ – пара параметров диалога k -го варианта и число вариантов аппаратно-программного состава МРИУС r -й базовой структуры, удовлетворяющие условию

$$p_{q,k_r}^{оп} \in P^{огр}, \quad (2.2.27)$$

где $p_{q,k_r}^{оп}$ – значение q -го параметра оперативности для соответствующего k -го варианта реализации аппаратно-программного состава МРИУС r -й базовой структуры (выражение (1.2.9)).

Каждому множеству SD_r^{OD3} соответствует множество HS_r^{OD3} , которое можно выразить следующим образом:

$$(f^{CD})^{-1}: SD_r^{OD3} \mapsto HS_r^{OD3}; \quad (2.2.28)$$

$$HS^{OD3 BC} = \{HS_r^{OD3} \mid r = 1, R^{BC}\}. \quad (2.2.29)$$

Множество $HS^{OD3 BC}$ содержит варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС для r -х базовых структур, удовлетворяющие сформулированному в (2.2.20) условию ограничения.

Упрощенная схематическая иллюстрация рассмотренного выше принципа на основе диаграмм Эйлера представлена на рисунке 2.2.2.

Реализация данного принципа позволяет сократить область поиска искомого проектного решения МРИУС посредством селекции вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения, не отвечающих заданным требованиям по оперативности функционирования.

Рассмотренный принцип реализуется в рамках методологии посредством комплексирования и организации взаимодействия упомянутых ранее и описываемых в последующих главах методик и математических моделей. Данное взаимодействие осуществляется на основе методики проектирования МРИУС. Подробно методика проектирования МРИУС представлена в главе 5.

2.2.3 Принцип унификации

Суть принципа унификации заключается в *типизации* и *симплификации* аппаратных, программных, аппаратно-программных решений, положенных в основу формирования базовых множеств \mathbb{H} и \mathbb{S} [261].

Применительно к МРИУС данный подход выражается в применении стандартизованных интерфейсов обмена между компонентами системы, типовых унифицированных аппаратных компонентов, в преимущественном использовании стандартных конструктивных решений, реализации на основе ряда промышленных стандартов, таких как, например, *PXI*, *VXI*, *LXI*, *AXIe* [86, 262, 263 и др.].

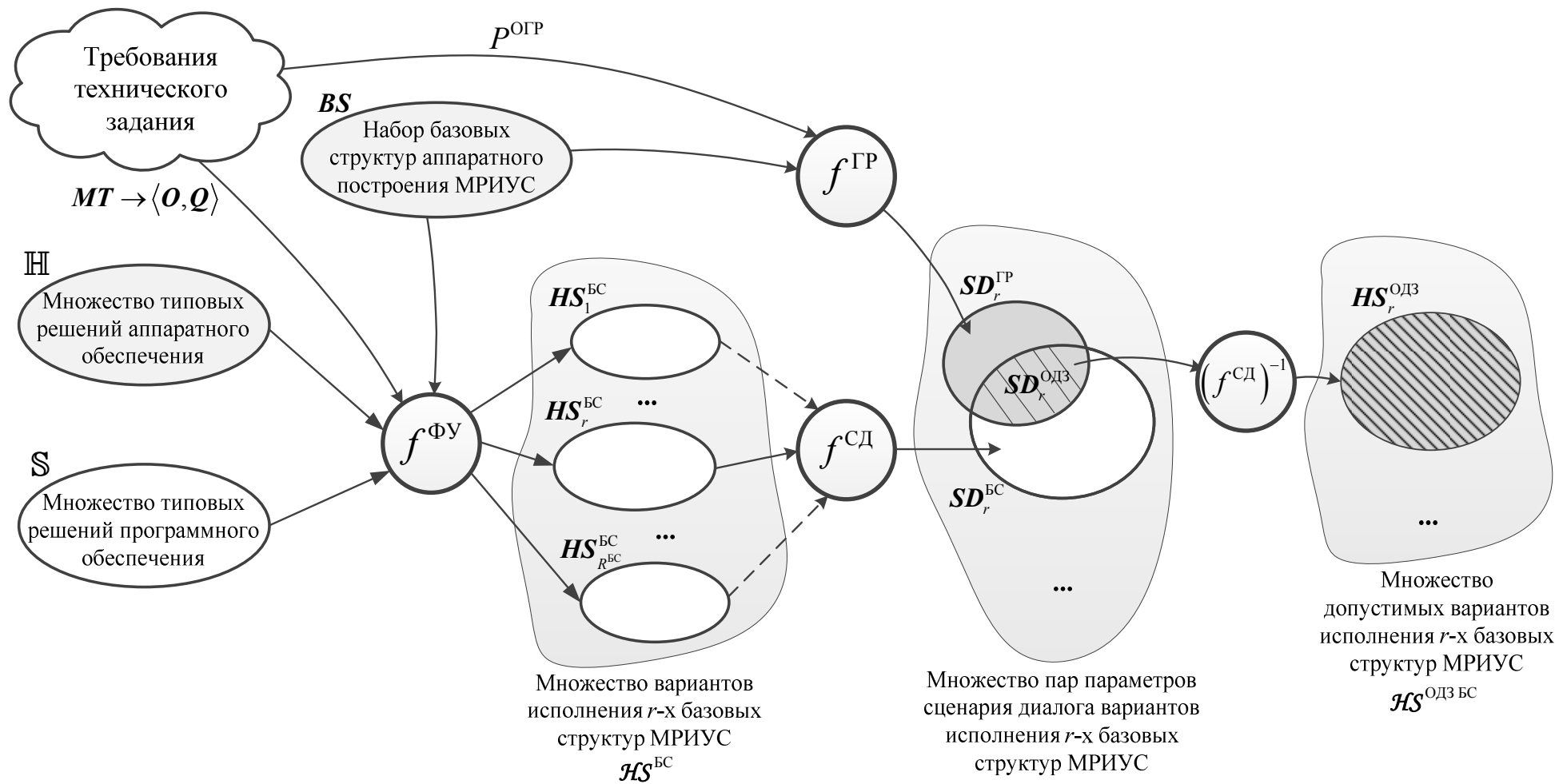


Рисунок 2.2.2 – Схематическая иллюстрация принципа ограничения количества допустимых альтернатив проектных решений MRIUS

Использование интегрированных сред разработки программного обеспечения, высокоуровневых языков программирования реализует *кроссплатформенность* компонентов программного обеспечения МРИУС, а также делает возможными применение и интеграцию в одном программном компоненте нескольких разноязыковых фрагментов программ [248, 264].

Кроме того, в рамках методологии проектирования МРИУС, с учетом специфики выполнения конфигурационных и измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме, разработан и применяется ряд решений, в состав которого вошли также *комплекс базовых универсальных виртуальных приборов*, реализующих функции формирования сигналов, сбора и обработки данных в МРИУС, и *базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя*. Данные решения подробно будут рассмотрены в главе 5.

Применение интегрированных сред разработки, унифицированных, серийно выпускаемых функциональных узлов, модулей и устройств позволяет сократить затраты на создание и реализацию компонентов программного и аппаратного обеспечения МРИУС. Реализация принципа унификации обеспечивает гибкость, масштабируемость и комплексируемость проектных решений МРИУС, создаваемых в рамках разработанной методологии. Основные направления реализации принципа унификации при разработке проектных решений МРИУС представлены на рисунке 2.2.3.



Рисунок 2.2.3 – Направления реализации принципа унификации в рамках методологии проектирования МРИУС

Реализация мероприятий в рамках приведенных направлений обеспечивает решение задачи конструктивной и функциональной преемственности, возможности заимствования отдельных решений и упрощения процесса взаимодействия различных субъектов, участвующих в процессе разработки и эксплуатации МРИУС.

Текущий уровень развития техники и технологий в соответствии с устойчивой тенденцией использования ЭВМ на всех этапах сбора, обработки, отображения информации обеспечивает широкую номенклатуру программных, аппаратных и интегрированных аппаратно-программных решений в области построения автоматизированных измерительных и управляющих систем, которые могут быть положены в основу базисных множеств \mathbb{H} и \mathbb{S} [265–268]. При этом следует отметить, что в процессе разработки каждый из разработчиков может использовать свой индивидуальный базис, к которому имеется доступ. В случае отсутствия в составе базиса необходимых аппаратных или программных компонентов они могут быть разработаны на основе частных технических заданий и впоследствии включены в состав соответствующих множеств.

Базирование методологии на рассмотренных принципах иерархичности, ограничения допустимых альтернатив и унификации обеспечивает единство подходов к решению ряда частных проектных задач, а также локализацию множества допустимых вариантов синтезируемых проектных решений МРИУС. В качестве критерия выбора проектного решения МРИУС из локализованной в соответствии с требованиями технического задания совокупности возможных проектных решений используется обобщенный показатель оценки технического уровня МРИУС [237], разработка которого рассмотрена в следующем параграфе.

2.3 Разработка критерия оценки технического уровня проектных решений МРИУС

Как показали исследования, в общем случае для автоматизированных систем экспериментальных систем, учитывая многообразие объектов управления и контроля, целей назначения, а также задач измерения, управления и контроля, не выделяют какую-либо характеристику, однозначно являющуюся критерием проектируемой системы. Эффективность или технический уровень любой системы принято оценивать по комплексу характеристик, таких как, например, производительность, стоимость, средняя

наработка на отказ, габариты, масса, энергопотребление, пропускная способность, число одновременно работающих пользователей и т. д. [20, 188, 189].

Применительно к многопользовательским вычислительным системам с разделением времени в качестве основного показателя их эффективности при исследовании возможности практического создания А. Шерром сформулирован и введен следующий критерий: «Общая сумма затрат времени, материальных ресурсов и труда при выполнении рассматриваемой задачи с помощью этой системы должна быть ниже аналогичных затрат для существующих систем» [7].

В целом для продукции ГОСТ 15467–79 устанавливает следующее определение [237]: «Технический уровень продукции – относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с базовыми значениями соответствующих показателей».

Таким образом, учитывая основную целевую и функциональную направленность применения многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем в обеспечении и предоставлении интерактивной диалоговой работы с разделяемым ресурсом нескольким пользователям и операторам, в качестве обобщенного критерия оценки технического уровня проектного решения МРИУС, в работе рассматривается отношение

$$\eta = \frac{C_1}{C_{N_T^{\max}}}, \quad (2.3.1)$$

где C_1 – совокупность затрат на оснащение рабочего места пользователя с применением аналога разрабатываемой МРИУС или ее прототипа (модернизируемого исходного комплекса, системы, установки и пр.); $C_{N_T^{\max}}$ – затраты на оснащение рабочего места пользователя, терминала оператора и т. д. [20, 226], определяемые на основе следующего выражения:

$$C_{N_T^{\max}} = \delta \cdot \frac{C_{\Sigma}}{N_T^{\max}}, \quad (2.3.2)$$

где C_{Σ} – совокупность затрат, характеризующая создание МРИУС, в общем случае включающая в свой состав затраты на развертывание соответствующей инфраструктуры, автоматизацию процессов измерения и управления объектом управления и контроля, разработку программного обеспечения, проведение научно-

исследовательских и опытно-конструкторских работ, закупку комплектующих, изготовление, испытания, ввод в эксплуатацию и т. д.; N_T^{\max} – максимальное число организуемых терминалов пользователей в МРИУС; δ – масштабный коэффициент, который учитывает несоответствие функциональных возможностей аналога или прототипа (модернизируемых исходных комплекса, системы, установки) и разрабатываемой МРИУС. При этом:

- $\delta = 1$, если функциональные возможности проектируемой МРИУС и исходной системы или аналога совпадают;
- $\delta > 1$, если при построении МРИУС реализуется вынужденное упрощение функциональности, например, обусловленное возникающими техническими особенностями и ограничениями при автоматизации процессов управления и измерения, особенностями объекта управления и контроля [109, 159 и пр.];
- $\delta < 1$, если в результате мероприятий по обеспечению организации режима разделения времени реализуются дополнительные функциональные возможности, например, повышение информативности и точности измерений, расширение перечня выполняемых исследований, расширенная постобработка результатов измерения, автоматизация ручного управления, организация дистанционного доступа, автоматизация и сокращение длительности процесса испытаний, повышение производительности работ и пр. [2, 89, 93, 95, 128 и др.].

На рисунке 2.3.1 представлен график обобщенной зависимости $C_{N_T^{\max}} = f(N_T^{\max})$, построенный на основе выражения (2.3.2), и график зависимости $C_1 = f(N_T^{\max})$. Прямая $C_1 = C_1$ характеризует себестоимость рабочего места пользователя, терминала оператора в аналогичной системе монопольного функционирования или системе прототипе.

Рассмотрим представленные на рисунке 2.3.1 зависимости. Очевидно, что существует такое число терминалов пользователей МРИУС N_T' , при котором значения функций $C_{N_T^{\max}} = f(N_T^{\max})$ и $C_1 = f(N_T^{\max})$ равны, т. е.

$$\delta \cdot \frac{C_{\Sigma}}{N_T'} = C_1. \quad (2.3.3)$$

Выражая N_T' , получаем

$$N_T' = \delta \cdot \frac{C_{\Sigma}}{C_1}. \quad (2.3.4)$$

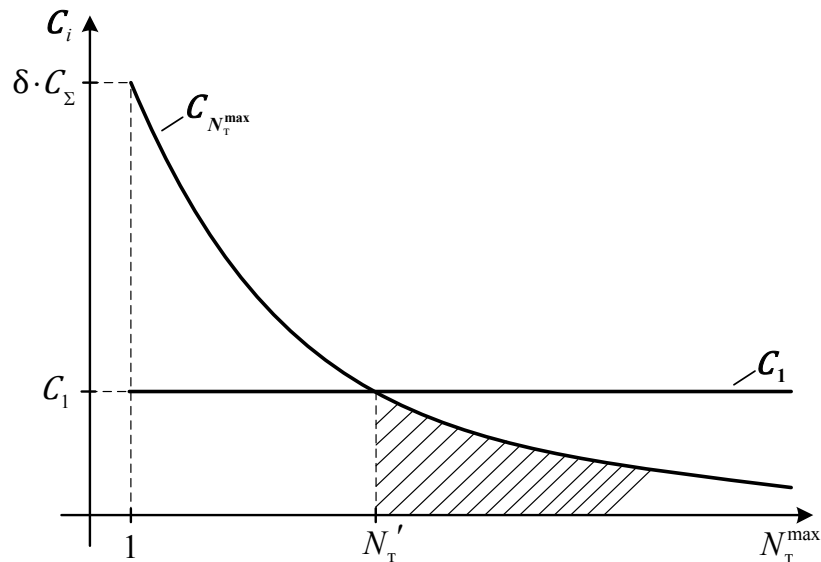


Рисунок 2.3.1 – Графики обобщенных зависимостей стоимости оснащения рабочего места: C_1 – система с монопольной работой; $C_{N_T^{\max}}$ – МРИУС

Минимально достаточный технический уровень разрабатываемой МРИУС по сравнению с аналогичной по функциональным возможностям системой монопольного функционирования обеспечивается при выполнении следующего условия:

$$\eta > 1. \quad (2.3.5)$$

Для МРИУС, функционирование которых в общем виде описывается замкнутой системой массового обслуживания, максимально возможное число рабочих мест характеризуется выражением (1.2.6) (см. п. 1.2.2). Соответственно, сформулируем следующее положение:

«Организация режима внешнего асинхронного временного разделения экспериментального оборудования посредством создания МРИУС целесообразна и обоснована, при выполнении условия $N_T^{\text{пр}} > N_T'$ »:

$$N_T^{\text{пр}} > \frac{\delta \cdot C_\Sigma}{C_1}, \quad (2.3.6)$$

или в общем виде:

$$C_{N_T^{\max}} \Big|_{N_T^{\max} = N_T^{\text{пр}}} < C_1. \quad (2.3.7)$$

То есть выполнение условия (2.3.5) обеспечивается при меньшей величине приведенных затрат на оснащение одного рабочего места (терминала пользователя) в МРИУС, чем в аналогичной по функциональности системе с монопольной работой (см. рисунок 2.3.1).

Рассмотрим графики обобщенных зависимостей $C_{N_T^{\max}} = f(N_T^{\max})$ и $C_1 = f(N_T^{\max})$, представленные на рисунке 2.3.2, с учетом сформулированного выражением (2.3.6) условия и сформулированных в параграфе 1.2.3 требований к оперативности функционирования МРИУС.

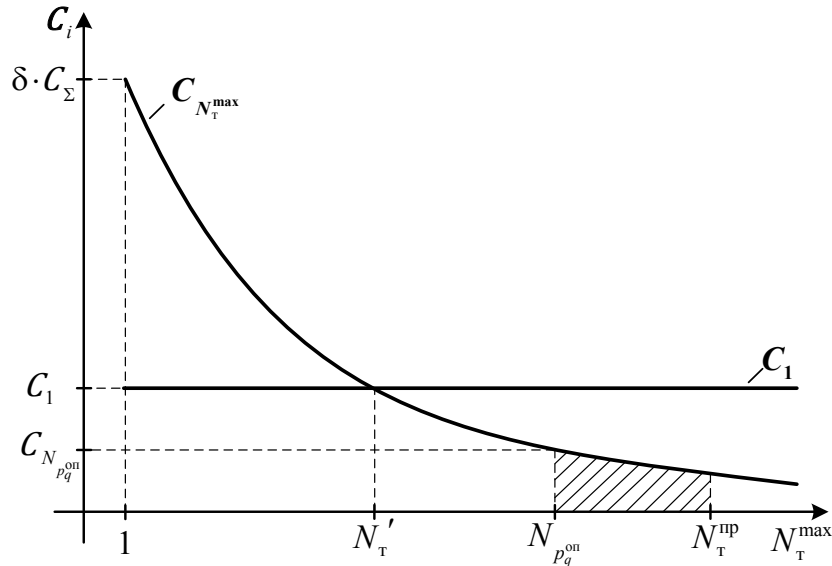


Рисунок 2.3.2 – Графики обобщенных зависимостей затрат оснащения рабочего места с учетом требований к оперативности функционирования МРИУС

В соответствии с выражением (1.2.11) можно записать:

$$N_T^{\max} = N_{p_q^{\text{оп}}} = f_q^{\text{оп}}(mrius)|_{p_q^{\text{оп}}}. \quad (2.3.8)$$

Следовательно, приведенная стоимость оснащения терминала пользователя, рабочего места в МРИУС с учетом заданного требования к оперативности функционирования определяется следующим образом:

$$C_{N_T^{\max}} = C_{N_T^{\max}}|_{N_T^{\max}=N_{p_q^{\text{оп}}}} = \frac{\delta \cdot C_{\Sigma}}{N_{p_q^{\text{оп}}}}. \quad (2.3.9)$$

В соответствии с (2.3.1) и (2.3.9) технический уровень проектируемой МРИУС при выполнении заданных требований по оперативности можно оценить на основе выражения

$$\eta = \frac{N_{p_q^{\text{оп}}} \cdot C_1}{\delta \cdot C_{\Sigma}}. \quad (2.3.10)$$

Условие (2.3.5) с учетом (2.3.9) относительно $N_{p_q^{\text{оп}}}$ преобразуется следующим образом:

$$N_{pq}^{\text{оп}} > \frac{\delta \cdot C_{\Sigma}}{C_1}. \quad (2.3.11)$$

Принимая во внимание существующее ограничение (1.2.3) и исходя из достижения минимально достаточного технического уровня МРИУС, неравенство, определяющее общие требования к числу терминалов пользователей, обслуживание которых осуществляется с заданной оперативностью, имеет следующий вид:

$$N_{\text{т}}^{\text{пр}} \geq N_{pq}^{\text{оп}} > \frac{\delta \cdot C_{\Sigma}}{C_1}. \quad (2.3.12)$$

С учетом (1.2.6) для МРИУС, функционирование которой описывается замкнутой однородной системой массового обслуживания, выражение (2.3.12) преобразуется к следующему виду:

$$k \cdot \frac{\overline{\Delta T}}{\overline{X} \cdot \overline{t}_{\text{обсл}}} \geq N_{pq}^{\text{оп}} > \delta \cdot \frac{C_{\Sigma}}{C_1}. \quad (2.3.13)$$

Выражение (2.3.13) предоставляет возможность оценки целесообразности режима эксплуатации экспериментального оборудования на основе концепции *мультиарендности* на рассматриваемом временном интервале функционирования $\overline{\Delta T}$, а также формулирует в общем виде требования к значениям $N_{pq}^{\text{оп}}$ с точки зрения достижения минимально достаточного технического уровня создаваемой МРИУС.

Результаты исследования потенциальных направлений повышения технического уровня МРИУС, оцениваемого на основе предложенного обобщенного критерия (2.3.1), рассматриваются в следующем параграфе.

2.4 Исследование потенциальных направлений повышения технического уровня МРИУС

Анализ выражения (2.3.10) позволяет выделить следующие основные направления повышения технического уровня синтезируемого проектного решения МРИУС.

Направление 1 – сокращение затрат на разработку и реализацию аппаратно-программного обеспечения МРИУС. Графическая иллюстрация данного подхода на примере графика обобщенной зависимости затрат оснащения рабочего места МРИУС

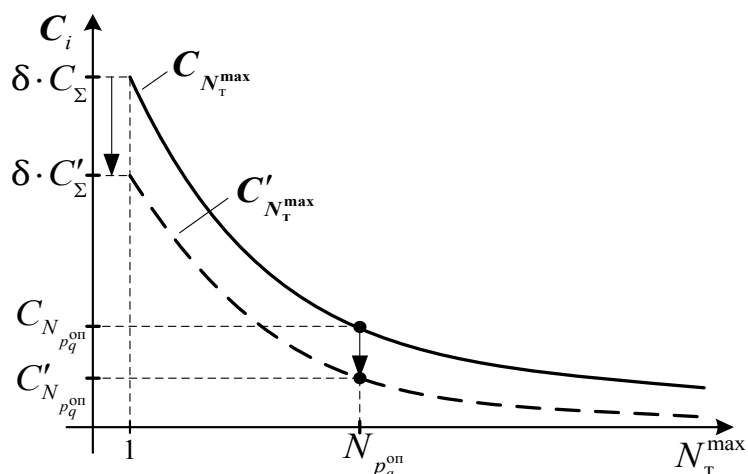
представлена на рисунке 2.4.1, а. Снижение затрат в рамках данного направления достигается, например, посредством реализации следующих мероприятий:

- применения унифицированных технических аппаратных и программных решений;
- выбора рациональной архитектуры построения МРИУС (комплексирование нескольких объектов в составе одной системы, применение внутреннего временного разделения – *мультиплексирование каналов* и т.д.);
- унификации подходов к разработке прикладного программного обеспечения МРИУС.

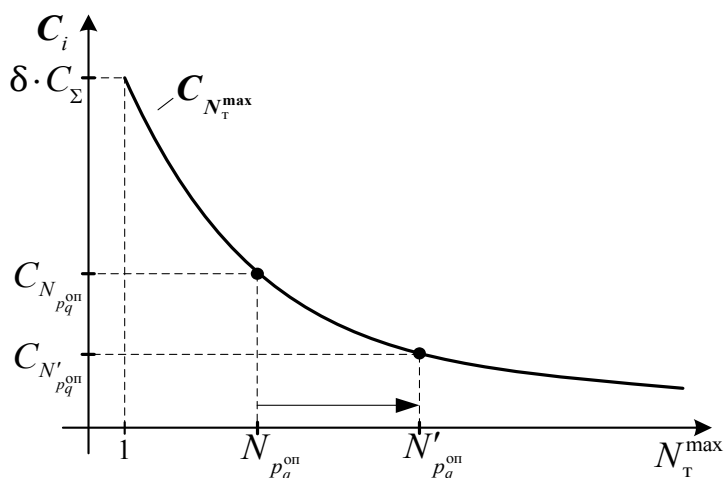
Направление 2 – увеличение числа терминалов пользователей, рабочих мест за счет повышения оперативности функционирования МРИУС. Результат достигается посредством применения специализированных алгоритмов диспетчеризации, учитывающих специфику выполняемых операций управления и измерения, технические особенности объекта управления и контроля (инерционность, исследование нескольких вариантов исполнения функциональных устройств или узлов и пр.). Графическая иллюстрация данного подхода на примере графика зависимости затрат оснащения рабочего места МРИУС представлена на рисунке 2.4.1, б.

Направление 3 – увеличение числа терминалов пользователей, рабочих мест за счет перехода на аппаратную структуру, реализующую более ресурсоёмкие технические решения, но обладающую более высокой оперативностью. Данный эффект обеспечивается, например, посредством распараллеливания процесса измерений нескольких величин, комплексирования нескольких объектов управления и контроля в составе аппаратного обеспечения одной МРИУС, организации дополнительных «каналов обслуживания».

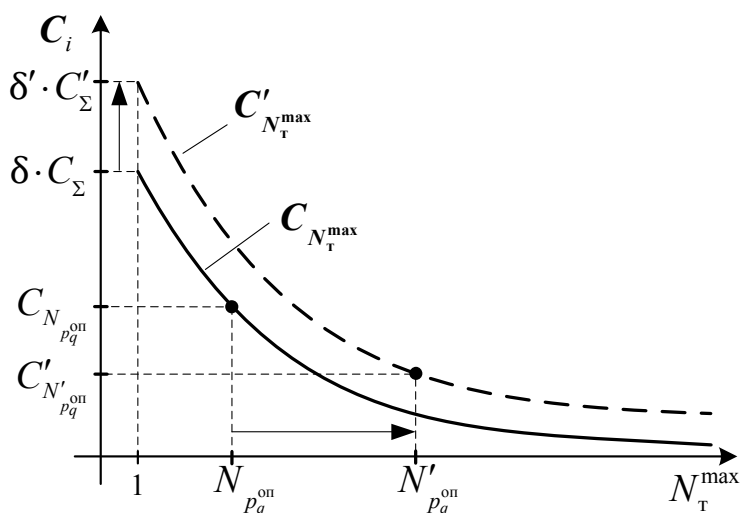
Графическая иллюстрация данного подхода на примере графика зависимости затрат на оснащение рабочего места МРИУС приведена на рисунке 2.4.1, в. Применение подходов в рамках данного направления также рассматривается в качестве промежуточного шага в процессе разработки проектных решений, целью которого является переход и рассмотрение альтернативных структур аппаратного построения МРИУС с возможностью применения подходов, ранее обозначенных в рамках направлений 1 и 2.



а



б



в

Рисунок 2.4.1 – Графическая иллюстрация подходов снижения себестоимости рабочего места пользователя МРИУС: *а* – снижение затрат на разработку; *б* – повышение оперативности функционирования; *в* – модификация структуры и компонентов аппаратного построения МРИУС; C_{Σ} – исходные затраты на создание МРИУС; C'_{Σ} – сниженные затраты; N_{pq}^{op} – исходное число терминалов пользователей МРИУС; $N'_{pq}{}^{op}$ – увеличенное число терминалов пользователей; $C_{N_T}{}^{max}$ – исходная МРИУС; $C'_{N_T}{}^{max}$ – модифицированная МРИУС

Результативность реализации соответствующего комплекса мероприятий в рамках направлений 2 и 3 может быть оценена на основе аппарата теории параметрической чувствительности [250].

Практическая реализация подходов в рамках представленных в данном параграфе направлений вошла в состав методологии проектирования МРИУС в виде как известных ранее, так и вновь разработанных автором и при его непосредственном участии методов, методик, моделей и комплекса решений. Предложенная методология проектирования МРИУС рассматривается в следующем параграфе.

2.5 Методология проектирования МРИУС

Предложенная информационная модель проектного решения (п. 2.1), рассмотренные принципы (п. 2.2) и введенный обобщенный критерий оценки технического уровня проектного решения МРИУС (п. 2.3) легли в основу разработанной в диссертации методологии проектирования МРИУС с *улучшенными показателями технического уровня*. Структура методологии приведена на рисунке 2.5.1.

Принципиальным отличием данной предметно-ориентированной методологии является ее акцентирование на выявленной в ходе исследований специфике МРИУС, характеризуемой выполнением конфигурационных и измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме.

В соответствии с этим в состав методологии вошли как ранее известные, так и *новые* теоретически исследованные и апробированные на практике *методы повышения оперативности функционирования МРИУС*, направленные на повышение технического уровня синтезируемых вариантов проектных решений, а также комплекс решений, обеспечивающих унификацию и систематизацию подходов к решению ряда проектных задач.

Разработанные *новые методы повышения оперативности функционирования МРИУС* реализуются в рамках рассмотренных в параграфе 2.4 направлений и базируются на результатах исследований технических особенностей объектов управления и контроля, структур аппаратного построения, состава выполняемых конфигурационных и измерительных заданий, особенностей выполняемых измерений и т. д.

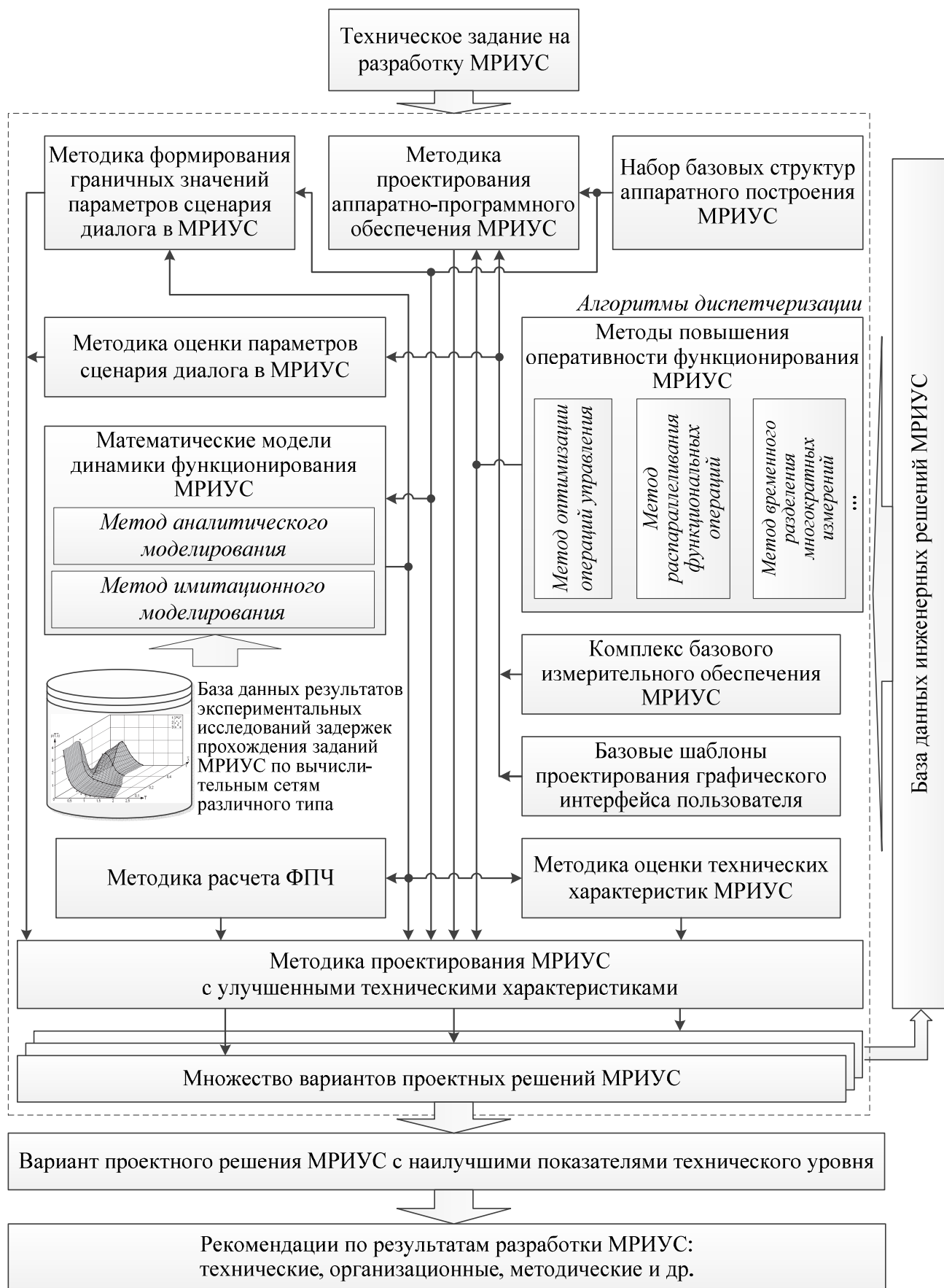


Рисунок 2.5.1 – Методология проектирования МРИУС с улучшенными показателями технического уровня

Указанная отличительная особенность приведенной методологии увеличивает в несколько раз число вариантов проектных решений, синтезируемых в процессе разработки МРИУС в соответствии с заданными требованиями технического задания.

В состав представленной на рисунке 2.5.1 методологии вошел *набор базовых структур аппаратного построения МРИУС*, рассматриваемых на этапе разработки как начальные условия локализации задачи структурного синтеза аппаратного обеспечения МРИУС на основе принципа иерархичности (см. п. 2.2.1). Предложенный набор структур определяет ограничения общего вида для пары $\langle H, S \rangle$ проектного решения, обеспечивая конечность множества вариантов аппаратных структур МРИУС на начальном этапе разработки. Данные базовые структуры аппаратного построения МРИУС описаны в главе 3.

На основе *методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС* реализуется формирование аппаратно-программного обеспечения проектного решения МРИУС – множеств функциональных узлов и устройств, программ подпрограмм, программных модулей из *базисных множеств* \mathbb{H} и \mathbb{S} – в соответствии с заданным перечнем решаемых измерительных задач MT , характеризуемых парой $\langle O, Q \rangle$. К таким методикам следует отнести методики, рассмотренные, например, в [20, 103, 105, 189, 235 и др.].

Методика оценки параметров сценария диалога в МРИУС позволяет выявить число необходимых заданий и длительность функциональных операций, выполняемых в диалоговом режиме для соответствующего варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения проектного решения МРИУС, который реализует решение заданного в ТЗ перечня измерительных задач MT . Для анализа быстродействия аналоговых и цифровых, электромеханических и других функциональных узлов и устройств при выполнении функциональных операций управления, а также оценки длительности последующих переходных процессов в объектах управления и контроля применяются подходы, рассмотренные, например, в [20, 256].

Методика формирования граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС позволяет сформировать на основе предложенного комплекса решений, методов математического моделирования и ряда упрощающих гипотез, множество пар параметров сценария диалога SD_r^{GP} , являющихся критериями селекции множества

альтернативных вариантов проектных решений МРИУС в соответствии с выделенными частными требованиями ТЗ к оперативности функционирования (см. п. 2.2.2) [181, 252].

Предварительная оценка параметров оперативности и формирование граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС осуществляются посредством *метода аналитического моделирования* на основе ряда упрощающих гипотез (например, о видах распределения времени обслуживания и интервалов размышления пользователей и др.). *Метод имитационного моделирования* применяется при исследовании функционирования МРИУС с использованием результатов выполняемой в ходе процесса разработки идентификации видов распределения интервалов размышления и времени обслуживания в соответствии с аппаратно-программным составом анализируемого проектного решения МРИУС. Совместное применение *методов аналитического и имитационного моделирования* направлено на сокращение временных затрат при решении ряда проектных задач в процессе разработки МРИУС.

Вошедшая в состав методологии *методика оценки технических характеристик МРИУС* позволяет определить технические характеристики МРИУС, характеризуемой ее проектным решением, на основе методов математического моделирования и систем автоматизированного проектирования [252, 269] с учетом специфики ее функционирования в интерактивном диалоговом режиме.

Методика расчета функций параметрической чувствительности позволяет выполнить оценку уровня влияния параметров МРИУС как системы массового обслуживания на ее оперативность функционирования и, как следствие, число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей. Расчет функций параметрической чувствительности (ФПЧ) параметров оперативности $R^{оп}$ осуществляется методом приращений на основе *математических моделей динамики функционирования МРИУС* (см. рисунок 2.5.1) [250]. Рассчитанные относительные ФПЧ применяются в процессе разработки в качестве критерия принятия решения о результативности реализации комплекса соответствующих мероприятий для анализируемых проектных решений МРИУС.

Перечисленные выше методики также рассмотрены в главе 3.

Алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса в рамках методологии представлены набором известных и *новых* разработанных в диссертационной работе *алгоритмов*, определяющих дисциплину обслуживания заданий. К известным отнесены

дисциплины с абсолютными и относительными приоритетами обслуживания, которые достаточно подробно рассмотрены, например, в [155, 164, 192]. Разработанные алгоритмы диспетчеризации представлены в главе 4 в рамках предложенных методов повышения оперативности функционирования МРИУС.

Комплекс базового измерительного обеспечения включает решения по выполнению сбора данных в диалоговом режиме на основе измерения параметров сигналов конечной длительности и решает задачу унификации подходов к разработке компонентов прикладного программного обеспечения МРИУС для ряда областей возможного практического применения [270]. Алгоритмы синтеза и измерения параметров сигналов на основе методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов, учитывающие специфику выполнения в МРИУС измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме, и их практическая реализация в виде комплекса базовых универсальных виртуальных приборов на основе компьютерных измерительных технологий рассмотрены в главе 5. Результаты исследований и практической апробации алгоритмов базового измерительного обеспечения также вошли в состав методологии в качестве *эмпирической информации* о длительностях функциональных операций измерения, выполняемых на их основе.

Базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя формализуют основные подходы к реализации прикладного программного обеспечения МРИУС $SA^{ТП}$ (см. (2.2.10)). Подробно предложенные шаблоны и методика проектирования ГИП МРИУС на их основе описаны в главе 5.

В состав методологии в виде соответствующей базы данных (см. рисунок 2.5.1) также включены результаты экспериментальных исследований задержек прохождения заданий по вычислительным сетям различного типа, полученные в работах [145, 208, 209, 271]. Включение в состав методологии экспериментальных значений транспортных задержек также позволяет дополнить информативность оценки параметров оперативности функционирования МРИУС посредством уточнения принятых ранее гипотез и дополнения предложенных ранее математических моделей [157, 160, 255, 272, 273].

Методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками является центральным ядром методологии, реализует заданный маршрут разработки, оперируя решениями промежуточных задач «синтез – анализ – принятие решения» на основе рассмотренных выше компонентов методологии

(методов, моделей, методик, алгоритмов и комплекса решений), и осуществляет поиск проектного решения с наилучшим показателем технического уровня. Подробно методика проектирования представлена в главе 5.

Решения ряда проектных задач (*базовые структуры аппаратного построения МРИУС, алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса, комплекс базового измерительного обеспечения МРИУС, базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя*) в комплексе с полученными эмпирическими данными о длительностях выполняемых функциональных операций и вариантами исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС предлагается интегрировать в *базу данных инженерных решений МРИУС*, которая предназначена для информационной поддержки процесса разработки (см. рисунок 2.5.1). Разработанная в диссертации *методика формирования базы данных инженерных решений МРИУС* посредством итерационного ее наполнения по мере накопления положительного опыта и результатов создания данных систем приведена в главе 5.

В соответствии с вышеизложенным техническое задание определяет перечень решаемых измерительных задач, перечень необходимых конфигураций (состояний) и состав объектов управления и контроля, измеряемые параметры и характеристики, режимы измерения, требования к оперативности функционирования МРИУС и пр., на основе которых в рамках приведенной методологии осуществляется поиск облика проектного решения МРИУС с наилучшим показателем технического уровня. В последующих главах рассмотрены разработанные в ходе выполненных диссертационного исследования составные компоненты представленной методологии.

2.6 Выводы по главе 2

1. Разработана информационная модель проектного решения МРИУС, отличающаяся от известных тем, что ее состав учитывает выделенную двойственную специфику функционирования МРИУС. Формализована и представлена в виде схемы взаимосвязь предложенных компонентов проектного решения и математической модели динамики функционирования МРИУС как СМО.

2. Рассмотрен ряд принципов (принцип иерархичности, принцип ограничения количества допустимых альтернатив, принцип унификации), положенных в основу

разработанной методологии и обеспечивающих в процессе разработки сокращение и локализацию области поиска допустимых вариантов проектных решений МРИУС.

3. Предложен обобщенный критерий оценки технического уровня проектного решения МРИУС, характеризующий уровень технического совершенства разработанного образца по отношению к существующим его аналогам и прототипам в части обеспечения одновременной работы нескольких терминалов пользователей с одним экземпляром специализированного оборудования.

4. Сформулированы в общем виде требования к числу одновременно работающих терминалов пользователей в МРИУС с точки зрения обеспечения заданных требований к ее оперативности функционирования и минимально достаточного технического уровня.

5. Исследованы потенциальные направления повышения технического уровня синтезируемых проектных решений МРИУС. Для каждого направления определен перечень основных целевых мероприятий и технических решений, которые учитывают в том числе обозначенную специфику функционирования МРИУС.

6. Разработана предметно-ориентированная методология проектирования МРИУС, отличительной особенностью которой от известных является ее фокусировка на специфике МРИУС, характеризуемой выполнением в интерактивном диалоговом режиме индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий нескольких пользователей на основе разделяемых аппаратно-программных ресурсов. В соответствии с этим в состав предложенной методологии вошли как ранее известные, так и новые методы повышения оперативности функционирования МРИУС, новые модели, новые методики, новые алгоритмы, а также комплекс технических решений, которые в целом направлены на повышение технического уровня синтезируемых проектных решений МРИУС.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОМПОНЕНТОВ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

3.1 Разработка базовых структур аппаратного построения МРИУС

На основе проведенных в главе 1 анализа, обобщения и систематизации подходов применения метода разделения времени в автоматизированных системах экспериментальных исследований, а также существующего опыта разработки и эксплуатации образцов МРИУС [88, 114–122, 273 и др.], в рамках исследований выделены следующие виды базовых структур аппаратного построения, используемые в качестве прототипов в процессе разработки (рисунок 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 – Классификация базовых структур аппаратного построения МРИУС

В основу предложенной классификации базовых структур аппаратного построения МРИУС положены следующие признаки:

- количество объектов управления и контроля, входящих в состав;
- применение внутреннего разделения каналов;
- номенклатура объектов управления и контроля, входящих в состав.

В соответствии с вышеизложенным в зависимости от количества объектов управления и контроля известны следующие виды структур аппаратного построения МРИУС:

- *однообъектовая;*
- *многообъектовая.*

Для *многообъектовых МРИУС* в зависимости от функций, реализуемых измерительным каналом и каналом управления, выделены структуры (см. рисунок 3.1.1):

- *с индивидуальными каналами;*
- *с внутренним разделением каналов.*

Многообъектовая базовая структура МРИУС с индивидуальными каналами содержит отдельные каналы для каждого объекта управления и контроля. В свою очередь, в соответствии с номенклатурой входящих в аппаратный состав объектов управления и контроля для *многообъектовых МРИУС с индивидуальными каналами* предлагается различать следующие виды систем:

- *с идентичными ОУиК;*
- *с отличающимися ОУиК.*

Многообъектовые МРИУС с внутренним разделением каналов, в свою очередь, в зависимости от выполняемых каналами функций могут быть построены:

- *с разделением измерительного канала;*
- *с разделением канала управления;*
- *с разделением измерительного канала и канала управления.*

Таким образом, каждая из выделенных базовых структур определяет состав и вариант внутренней организации взаимодействия составных компонентов аппаратного обеспечения МРИУС (см. выражения (2.2.1)–(2.2.8)). Базовые структуры с внутренним разделением каналов реализуют подход *комбинированного разделения времени* (см. рисунок 1.1.11).

Возможность реализации МРИУС на основе одной из выделенных базовых структур МРИУС определяется перечнем решаемых измерительных задач, индивидуальными техническими особенностями объектов управления и контроля, а также возможностью унификации каналов для различных видов ОУиК. Рассмотрим

отличительные особенности представленных на рисунке базовых структур аппаратного построения МРИУС.

3.1.1 Однообъектовая базовая структура

Обобщенная структурная схема МРИУС, построенная на основе однообъектовой базовой структуры, представлена на рисунке 3.1.2. МРИУС данного вида характеризуется обслуживанием входящего потока заданий от терминалов пользователя с использованием одного «обслуживающего прибора» [150, 151].

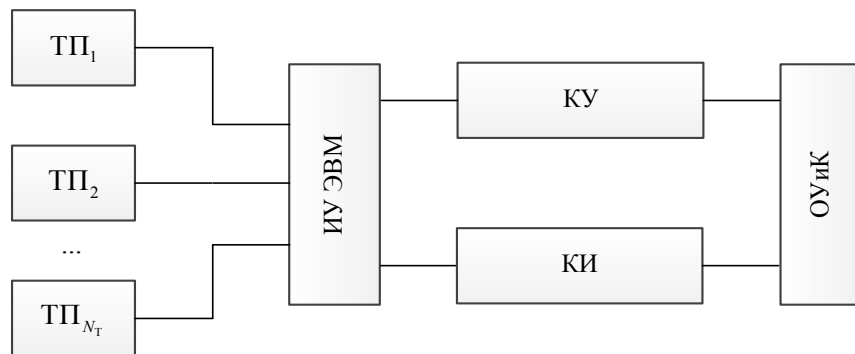


Рисунок 3.1.2 – Структурная схема однообъектовой МРИУС: $ТП_1, ТП_2, \dots, ТП_{N_T}$ – терминалы пользователей; ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; КУ – канал управления; КИ – измерительный канал; ОУиК – объект управления и контроля

Применение данной структуры обуславливается индивидуальными техническими особенностями ОУиК, реализуемыми алгоритмами управления, составом и объемом контролируемых данных и т. д., которые существенно усложняют унификацию измерительных каналов и каналов управления или характеризуют ее техническую нецелесообразность [109, 117, 118, 159 и др.].

Аппаратный состав данной базовой структуры МРИУС обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

$$H_{BS_1}^{BC} = \{H_{BS_1}^{TP}, H_{BS_1}^{ЭВМ}, H_{BS_1}^{КУ}, H_{BS_1}^{КИ}, H_{BS_1}^{ОУиК}\}, \quad (3.1.1)$$

где $H_{BS_1}^{TP}$ – подмножество терминалов пользователей; N_T – число пользователей:

$$H_{BS_1}^{TP} = \{H_{BS_1}^{TP_n} \mid n = 1, N_T\}. \quad (3.1.2)$$

Матрицу смежности графа соединений аппаратных компонентов однообъектовой МРИУС, (см. выражение (2.2.2)) можно представить в следующем виде [250, 253, 274]:

$$\begin{array}{rccccc}
 & & HC_{BS_1}^{ТП} & HC_{BS_1}^{ЭВМ} & HC_{BS_1}^{КУ} & HC_{BS_1}^{КИ} & HC_{BS_1}^{ОУиК} \\
 E_1^{BC} \rightarrow & HC_{BS_1}^{ТП} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 & HC_{BS_1}^{ЭВМ} & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 & HC_{BS_1}^{КУ} & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 & HC_{BS_1}^{КИ} & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 & HC_{BS_1}^{ОУиК} & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
 \end{array} \quad (3.1.3)$$

Матрица смежности описывает аппаратную структуру МРИУС в базе компонентов, рассмотренных в главе 2 (выражение (2.1.15)), на основе представленного на рисунке 2.2.1 принципа иерархичности. Состав каждого аппаратного компонента в общем виде определяется выражением (2.2.4).

3.1.2 Многообъектовые базовые структуры

Отличительной особенностью рассматриваемого в данном пункте семейства базовых структур является наличие в аппаратном составе МРИУС нескольких объектов управления и контроля. В соответствии с этим, в зависимости от номенклатуры объектов управления и контроля, функций, выполняемых каналами, автором в диссертации выделены следующие виды структур МРИУС, описанные далее.

3.1.2.1 Многообъектовые базовые структуры с индивидуальными каналами

Многообъектовая МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК

В целях обеспечения возможности обслуживания заданий для заданного числа терминалов пользователей, а также требуемой оперативности функционирования, в ряде прикладных областей применяют МРИУС на основе аппаратной структуры, которая представляет собой совокупность нескольких однотипных измерительных каналов, каналов управления, объектов управления и контроля. Данная структура обеспечивает параллельное обслуживание входящего потока заданий от терминалов пользователей [114, 140, 147, 273, 275].

Структурная схема многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК представлена на рисунке 3.1.3.

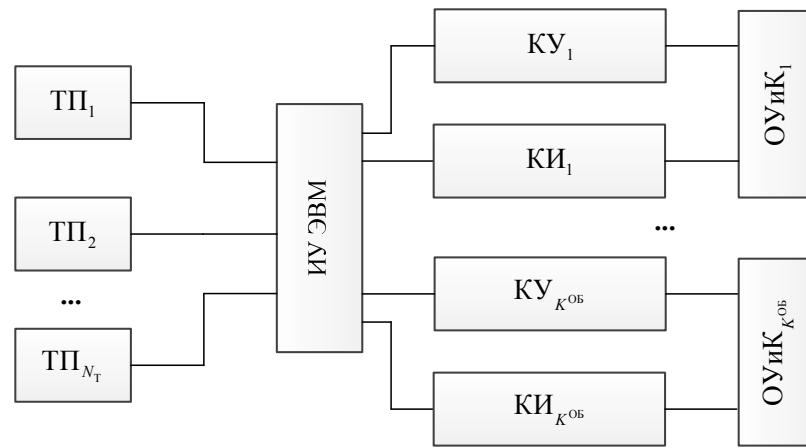


Рисунок 3.1.3 – Структурная схема многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными объектами управления и контроля: $ТП_1, ТП_2, \dots, ТП_{N_T}$ – терминалы пользователей;

ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; $ОУиК_1, \dots, ОУиК_{K^{OB}}$ – идентичные объекты управления и контроля; $КУ_1, \dots, КУ_{K^{OB}}$ – идентичные каналы управления;

$КИ_1, \dots, КИ_{K^{OB}}$ – идентичные измерительные каналы

Аппаратный состав данной базовой структуры МРИУС обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

$$H_{BS_2}^{BC} = \{HC_{BS_2}^{TP}, HC_{BS_2}^{ЭВМ}, HC_{BS_2}^{КУ}, HC_{BS_2}^{КИ}, HC_{BS_2}^{ОУиК}\}, \quad (3.1.4)$$

где K^{OB} – число идентичных $ОУиК$; $HC_{BS_2}^{TP}$ определяется в соответствии с (3.1.2);

$$HC_{BS_2}^{КУ} = \{HC_k^{КУ} | k = 1, K^{OB}\}; \quad (3.1.5)$$

$$HC_{BS_2}^{КИ} = \{HC_k^{КИ} | k = 1, K^{OB}\}; \quad (3.1.6)$$

$$HC_{BS_2}^{ОУиК} = \{HC_k^{ОУиК} | k = 1, K^{OB}\}. \quad (3.1.7)$$

Матрица смежности графа соединений аппаратных компонентов многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными $ОУиК$ может быть представлена в соответствии с выражением (3.1.8) [250, 274].

Приведенные матрицы смежности (3.1.3), (3.1.8), могут быть использованы в рамках автоматизации процесса разработки или как формализованное описание структур в составе базы данных инженерных решений МРИУС [252, 269, 276].

		$HC_{BS_2}^{ТП}$	$HC_{BS_2}^{ЭВМ}$	$HC_1^{КУ}$	...	$HC_{К^{ОБ}}^{КУ}$	$HC_1^{КИ}$	...	$HC_{К^{ОБ}}^{КИ}$	$HC_1^{ОУиК}$	...	$HC_{К^{ОБ}}^{ОУиК}$
$E_2^{БС} \rightarrow$	$HC_{BS_2}^{ТП}$	0	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0
	$HC_{BS_2}^{ЭВМ}$	1	0	1	...	1	1	...	1	0	...	0
	$HC_1^{КУ}$	0	1	0	...	0	0	...	0	1	...	0

	$HC_{К^{ОБ}}^{КУ}$	0	1	0	...	0	0	...	0	0	...	1
	$HC_1^{КИ}$	0	1	0	...	0	0	...	0	1	...	0

	$HC_{К^{ОБ}}^{КИ}$	0	1	0	...	0	0	...	0	0	...	1
	$HC_1^{ОУиК}$	0	0	1	...	0	1	...	0	0	...	0

$HC_{К^{ОБ}}^{ОУиК}$	0	0	0	...	1	0	...	1	0	...	0	

(3.1.8)

Многообъектовая МРИУС с индивидуальными каналами и отличающимися ОУиК

В целях обеспечения решения перечня измерительных задач, относящихся к разным объектам управления и контроля в рамках одной системы, МРИУС может быть выполнена на основе аппаратной структуры в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 3.1.4.

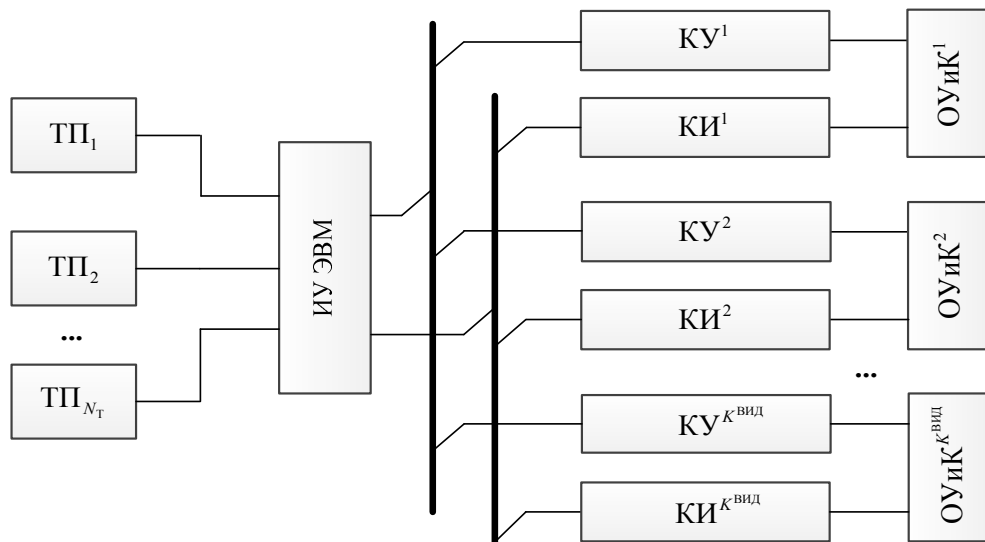


Рисунок 3.1.4 – Структурная схема многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и отличающимися объектами управления и контроля: $ТП_1, ТП_2, \dots, ТП_{N_T}$ – терминалы пользователей; ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; $ОУиК^1, ОУиК^2, \dots, ОУиК^{K^{вид}}$ – объекты управления и контроля; $КУ^1, КУ^2, \dots, КУ^{K^{вид}}$ – каналы управления;

$КИ^1, КИ^2, \dots, КИ^{K^{вид}}$ – измерительные каналы

Аппаратный состав многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и отличающимися ОУиК обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

$$\mathbf{H}_{BS_3}^{BC} = \{ \mathbf{H}_{BS_3}^{ТП}, \mathbf{H}_{BS_3}^{ЭВМ}, \mathbf{H}_{BS_3}^{КУ}, \mathbf{H}_{BS_3}^{КИ}, \mathbf{H}_{BS_3}^{ОУиК} \}, \quad (3.1.9)$$

где

$$\mathbf{H}_{BS_3}^{КУ} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} \mathbf{H}_{BS_3}^{КУ_k}, \quad (3.1.10)$$

$$\mathbf{H}_{BS_3}^{КИ} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} \mathbf{H}_{BS_3}^{КИ_k}, \quad (3.1.11)$$

$$\mathbf{H}_{BS_3}^{ОУиК} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} \mathbf{H}_{BS_3}^{ОУиК_k}, \quad (3.1.12)$$

$K^{вид}$ – число видов объектов управления и контроля, подмножество $\mathbf{H}_{BS_3}^{ТП}$ определяется в соответствии с выражением (3.1.2).

Соответствующая матрица смежности графа соединений аппаратных компонентов может быть сформирована аналогично выражениям (3.1.3), (3.1.8) на основе известных подходов [250, 274].

3.1.2.2 Многообъектовые базовые структуры с внутренним разделением каналов

При проектировании многообъектовых МРИУС широкое применение также получил подход, основанный на применении унифицированных функциональных узлов и многофункциональных устройств [88, 121, 189 и пр.]. Данное решение позволяет реализовывать общие каналы измерения и управления для различных объектов управления и контроля на основе внутреннего временного разделения (см. рисунок 1.1.11).

Рассмотренные в данном подпункте базовые структуры обеспечивают возможность выполнения входящего потока заданий в текущий момент времени только на основе одного из объектов управления и контроля, входящего в состав аппаратного обеспечения МРИУС. Длительность выполнения заданий при решении пользователем измерительных задач определяется длительностями функциональных операций, осуществляемых компонентами аппаратного и программного обеспечения МРИУС на

основе соответствующего ОУиК. При этом в системах, реализованных на основе рассматриваемых структур, в процессе функционирования общее число терминалов пользователей может быть функционально перераспределено в различном количественном сочетании по принадлежности к одному из $K^{\text{вид}}$ объектов управления и контроля, входящих в состав аппаратной структуры.

Многообъектовая базовая структура с разделением измерительного канала

Реализация МРИУС на основе базовой структуры с внутренним разделением измерительного канала может быть выполнена при унификации по параметрам и составу сигналов, измеряемых с объектов управления и контроля. Обобщенная структурная схема данной МРИУС представлена на рисунке 3.1.5, а.

Наличие индивидуальных каналов управления в рассматриваемой базовой структуре также предоставляет возможность организации локальных контуров управления объектами, входящими в состав аппаратного обеспечения МРИУС. Например, установка и поддержание уровня тока, требуемого значения температуры корпуса ЭРИ, частоты вращения вала электродвигателя и пр. [159].

Аппаратный состав многообъектовой МРИУС с разделением измерительного канала обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

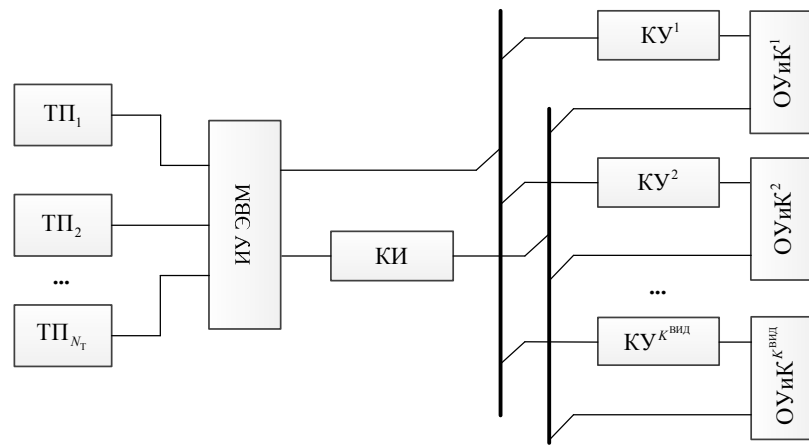
$$\mathbf{H}_{BS_4}^{\text{БС}} = \{ \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ТП}}, \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ЭВМ}}, \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{КУ}}, \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{КИ}}, \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ОУиК}} \}, \quad (3.1.13)$$

где

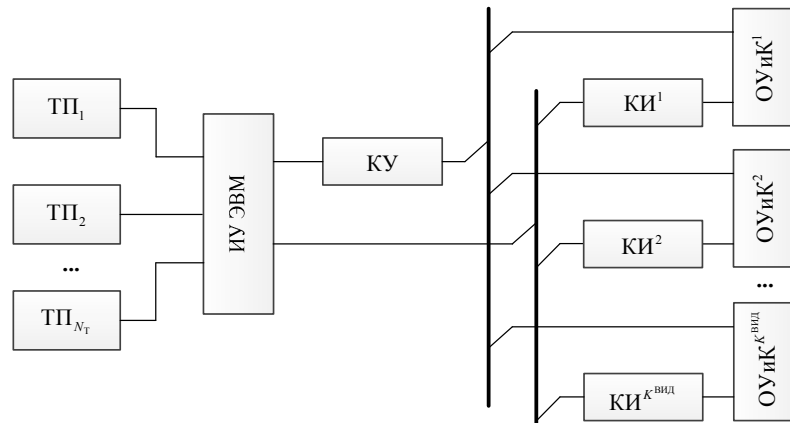
$$\mathbf{H}_{BS_4}^{\text{КУ}} = \bigcup_{k=1}^{K^{\text{вид}}} \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{КУ}_k}, \quad (3.1.14)$$

$$\mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ОУиК}} = \bigcup_{k=1}^{K^{\text{вид}}} \mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ОУиК}_k}, \quad (3.1.15)$$

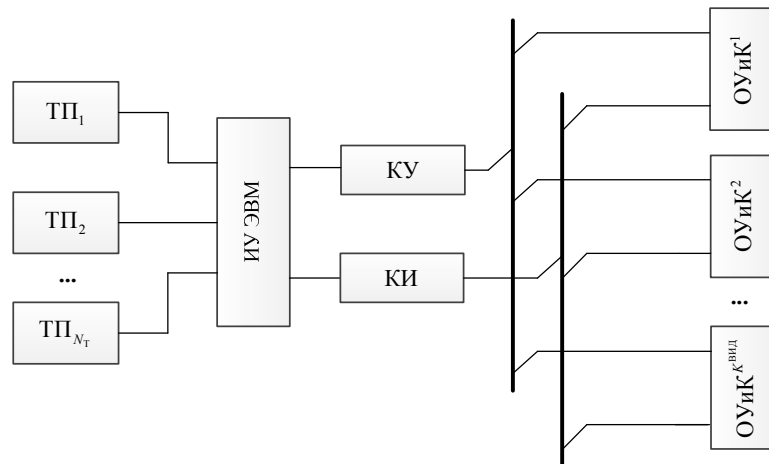
$K^{\text{вид}}$ – число видов объектов управления и контроля, подмножество терминалов пользователей $\mathbf{H}_{BS_4}^{\text{ТП}}$ определяется в соответствии с (3.1.2).



а



б



в

Рисунок 3.1.5 – Многообъектовые МРИУС с внутренним разделением каналов:
 а – с разделением измерительного канала; б – с разделением канала управления; в – с разделением измерительного канала и канала управления; ТП₁, ТП₂, ..., ТП_{NT} – терминалы пользователей; ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; КИ – общий измерительный канал; КУ – общий канал управления; КИ¹, КИ², ..., КИ^{К-вид} – измерительные каналы; КУ¹, КУ², ..., КУ^{К-вид} – каналы управления; ОУиК¹, ОУиК², ..., ОУиК^{К-вид} – объекты управления и контроля

Многообъектовая базовая структура с разделением канала управления

Отличительной особенностью данной базовой структуры МРИУС является использование общего канала управления для нескольких ОУиК, что возможно при унификации объектов по управляющим сигналам и воздействиям (например, реализация управления объектом на основе стандартных интерфейсов [262, 263, 277]). Обобщенная структурная схема МРИУС, построенной на основе многообъектовой базовой структуры с разделением канала управления представлена на рисунке 3.1.5, б.

Аппаратный состав многообъектовой МРИУС с разделением канала управления обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

$$H_{BS_5}^{BC} = \{HC_{BS_5}^{TP}, HC_{BS_5}^{ЭВМ}, HC_{BS_5}^{КУ}, HC_{BS_5}^{КИ}, HC_{BS_5}^{ОУиК}\}, \quad (3.1.16)$$

где

$$HC_{BS_5}^{КИ} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} HC^{КИ_k}, \quad (3.1.17)$$

$$HC_{BS_5}^{ОУиК} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} HC^{ОУиК_k}, \quad (3.1.18)$$

$K^{вид}$ – число видов объектов управления и контроля, подмножество $HC_{BS_5}^{TP}$ определяется в соответствии с (3.1.2).

Многообъектовая базовая структура с разделением измерительного канала и канала управления

Применение данной базовой структуры целесообразно при высокой степени унификации объектов управления и контроля по управляющим воздействиям и измеряемым сигналам. Например, данная структура может быть использована при построении МРИУС с несколькими однотипными объектами управления и контроля в целях расширения возможных параметрических вариантов решения измерительных задач или при исследовании вариативности характеристик объекта управления и контроля на примере различных вариантов его исполнения (или при исследовании технологического разброса) [121]. Обобщенная структурная схема МРИУС,

построенной на основе многообъектовой базовой структуры с разделением канала управления представлена на рисунке 3.1.5, в.

Аппаратный состав многообъектовой МРИУС с разделением измерительного канала и канала управления обобщенно характеризуется следующим множеством компонентов:

$$HC_{BS_6}^{BC} = \{HC_{BS_6}^{TP}, HC_{BS_6}^{ЭВМ}, HC_{BS_6}^{КУ}, HC_{BS_6}^{КИ}, HC_{BS_6}^{ОУиК}\}, \quad (3.1.19)$$

где

$$HC_{BS_6}^{ОУиК} = \bigcup_{k=1}^{K^{вид}} HC^{ОУиК_k}, \quad (3.1.20)$$

$K^{вид}$ – число видов объектов управления и контроля, а подмножество $HC_{BS_6}^{TP}$ определяется на основе (3.1.2).

Матрицы смежности графов соединений аппаратных компонентов МРИУС в соответствии со структурными схемами, представленными на рисунке 3.1.5, формируются аналогично выражениям (3.1.3) и (3.1.8) на основе известных подходов [250, 253, 274 и пр.].

Предложенные структуры аппаратного построения (рисунки 3.1.2–3.1.5) определяют состав и внутреннюю взаимосвязь компонентов аппаратного обеспечения МРИУС. Рассмотрим их функциональные отличия.

В качестве основного достоинства однообъектовой базовой структуры аппаратного обеспечения МРИУС (рисунок 3.1.2) можно отметить относительную простоту реализации. Многообъектовые базовые структуры с внутренним разделением каналов (рисунок 3.1.5) реализуют возможность сокращения затрат на реализацию аппаратного обеспечения за счет применения общих аппаратных компонентов. При этом, например, реализация многообъектовой базовой структуры МРИУС с разделением измерительного канала и канала управления (рисунок 3.1.5, в) в ряде случаев может быть нецелесообразной вследствие существенного отличия входящих в состав аппаратного обеспечения объектов управления и контроля [109, 115].

В многообъектовой структуре МРИУС с индивидуальными каналами и отличающимися объектами управления и контроля (рисунок 3.1.4) осуществляется сокращение затрат на реализацию аппаратного обеспечения за счет использования

общей измерительно-управляющей ЭВМ при решении пользователями измерительных задач, относящихся к разным объектам управления и контроля (см. рисунок 1.1.7).

Вариант построения многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными объектами управления и контроля (рисунок 3.1.3) является самым аппаратно-затратным по сравнению с рассмотренными выше, однако при тех же параметрах сценария диалога обеспечивает более высокую оперативность функционирования системы за счет реализации возможности параллельного выполнения заданий, поступающих с терминалов пользователей.

В рамках диссертационной работы полагается, что предложенный набор базовых структур аппаратного построения МРИУС будет дополняться по мере накопления и формирования базы данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 2.5.1). Например, при разработке проектных решений МРИУС, в ходе выполнения научно-исследовательских работ по разработке и исследованию возможных вариантов структур построения, обусловленных особенностями объектов управления и контроля и пр. При этом в предложенный набор не вошли архитектуры, формируемые как различные сочетания компоновки предложенных базовых. Подразумевается, что в процессе проектирования МРИУС данные структуры могут быть синтезированы на основе морфологического подхода [233].

Критерии выбора соответствующей базовой структуры аппаратного построения МРИУС формализованы в виде схемы укрупненного дерева принятия решений, приведенной на рисунке 3.1.6.

Затраты на реализацию той или иной базовой структуры аппаратного обеспечения в процессе проектирования оцениваются на этапе анализа технического уровня проектного решения (см. выражение (2.3.10)) в рамках методики проектирования МРИУС, рассматриваемой в параграфе 5.4. Максимальное число терминалов пользователей, соответствующее заданному значению параметра оперативности для вариантов исполнения базовых структур, определяется в процессе проектирования аппаратно-программного обеспечения на основе моделей динамики функционирования МРИУС, реализуемых с использованием методов аналитического и имитационного моделирования. Соответствующие математические модели динамики функционирования МРИУС для приведенных базовых структур рассматриваются в параграфе 3.4.

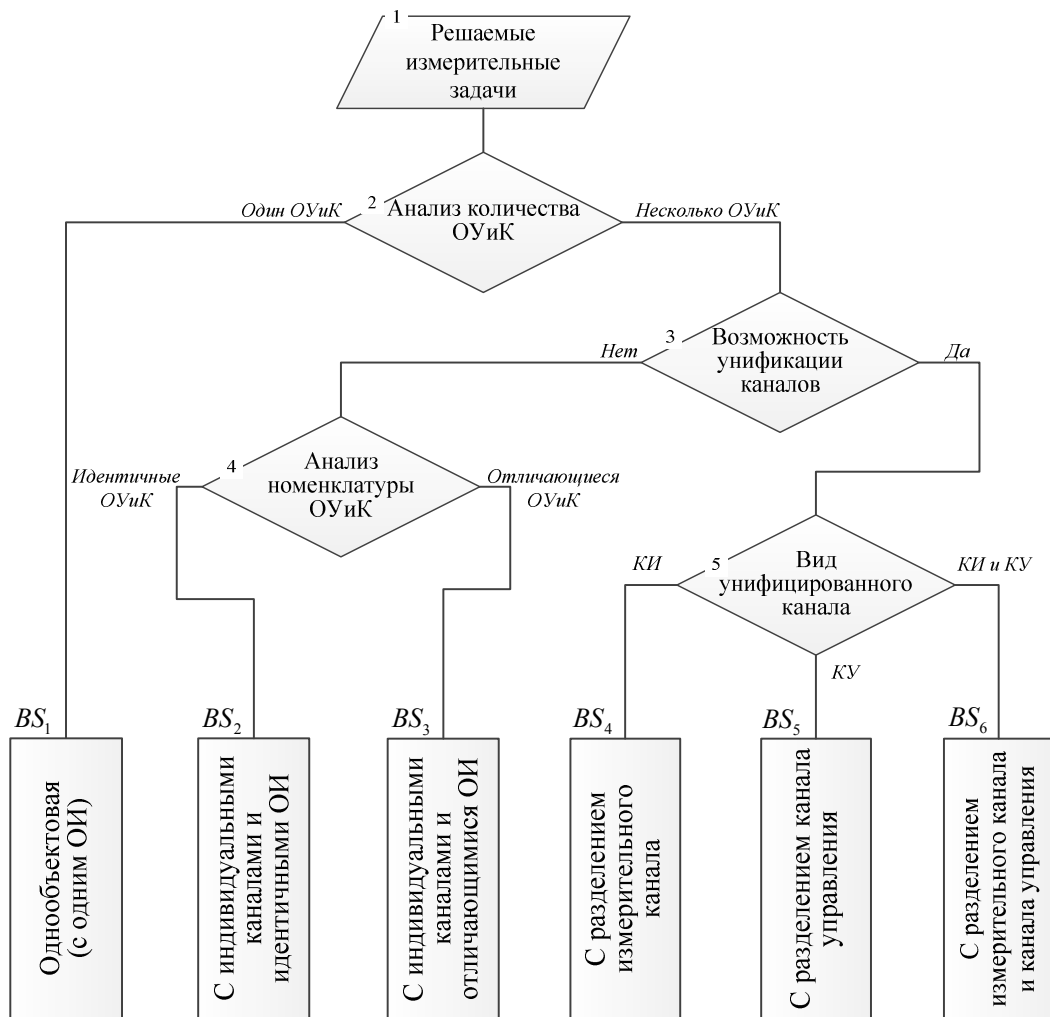


Рисунок 3.1.6 – Схема дерева принятия решения о возможности применения соответствующей базовой структуры аппаратного построения МРИУС

Для предложенных базовых структур **BS** (см. рисунки 3.1.1–3.1.5) в рамках методологии с применением известных подходов выполняется многовариантный синтез вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРУИС (см. выражения (2.2.12)–(2.2.14)) и оценка длительностей реализуемых функциональных операций на их основе. Соответствующие методики рассматриваются в последующих параграфах 3.2, 3.3.

3.2 Разработка методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС

Как было показано в главе 2, техническое задание на разработку МРИУС (см. п. 2.1, рисунок 2.5.1) определяет объект управления и контроля, а также перечень измерительных задач, решаемых на его основе в режиме диалога:

$$MT = \{MT_{i^{из}} | i^{из} = 1, I^{из}\}, \quad (3.2.1)$$

где MT – множество измерительных задач, определенных техническим заданием; $I^{из}$ – число измерительных задач. Каждая измерительная задача $MT_{i^{из}}$ характеризует измеряемую физическую величину, требуемую точность и условия измерения [125].

В соответствии с заданным перечнем решаемых измерительных задач, на основе базисных множеств \mathbb{H} и \mathbb{S} (см. п. 2.1) и набора базовых структур аппаратного построения BS (см. п. 3.1), путем выполнения шагов разработанной методики выполняется разработка вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС. Блок-схема алгоритма разработанной методики представлена на рисунке 3.2.1. Рассмотрим блоки алгоритма приведенной методики.

Блок 1. На данном шаге осуществляется ввод перечня решаемых на основе разрабатываемой МРИУС измерительных задач, ввод множеств типовых аппаратных и программных решений, реализуемый алгоритм диспетчеризации.

Блок 2. На данном этапе выполняется перебор вариантов базовых структур аппаратного построения МРИУС, представленных множеством BS .

Блок 3. На данном шаге алгоритма для варианта состава и взаимосвязи составных компонентов аппаратного обеспечения МРИУС (см. выражения (2.2.1)–(2.2.8), п. 3.1) осуществляется формирование перечня операций, выполняемых системой в диалоговом режиме и требований к качеству их выполнения (выражения (2.1.2)–(2.1.4)). Данный процесс реализуется на основе подходов, рассмотренных, например, в [20, 189 и др.].

Блок 4. На данном этапе в соответствии с реализуемым принципом иерархичности (см. п. 2.2) осуществляется нисходящее проектирование компонентов аппаратного обеспечения, формируются перечни управляющих воздействий, измеряемых параметров и/или характеристик объекта управления и контроля и т.д. В рамках данного шага методики реализуются известные подходы, описанные, в частности, в работах [20, 105, 189, 235, 240 и др.].

Вариативность исполнения аппаратного обеспечения МРИУС обусловлена отличием реализуемых алгоритмов управления, сбора и обработки измерительной информации, типами используемых виртуальных приборов, многофункциональных устройств, функциональных узлов, аппаратных интерфейсов и пр. [20, 262–268].

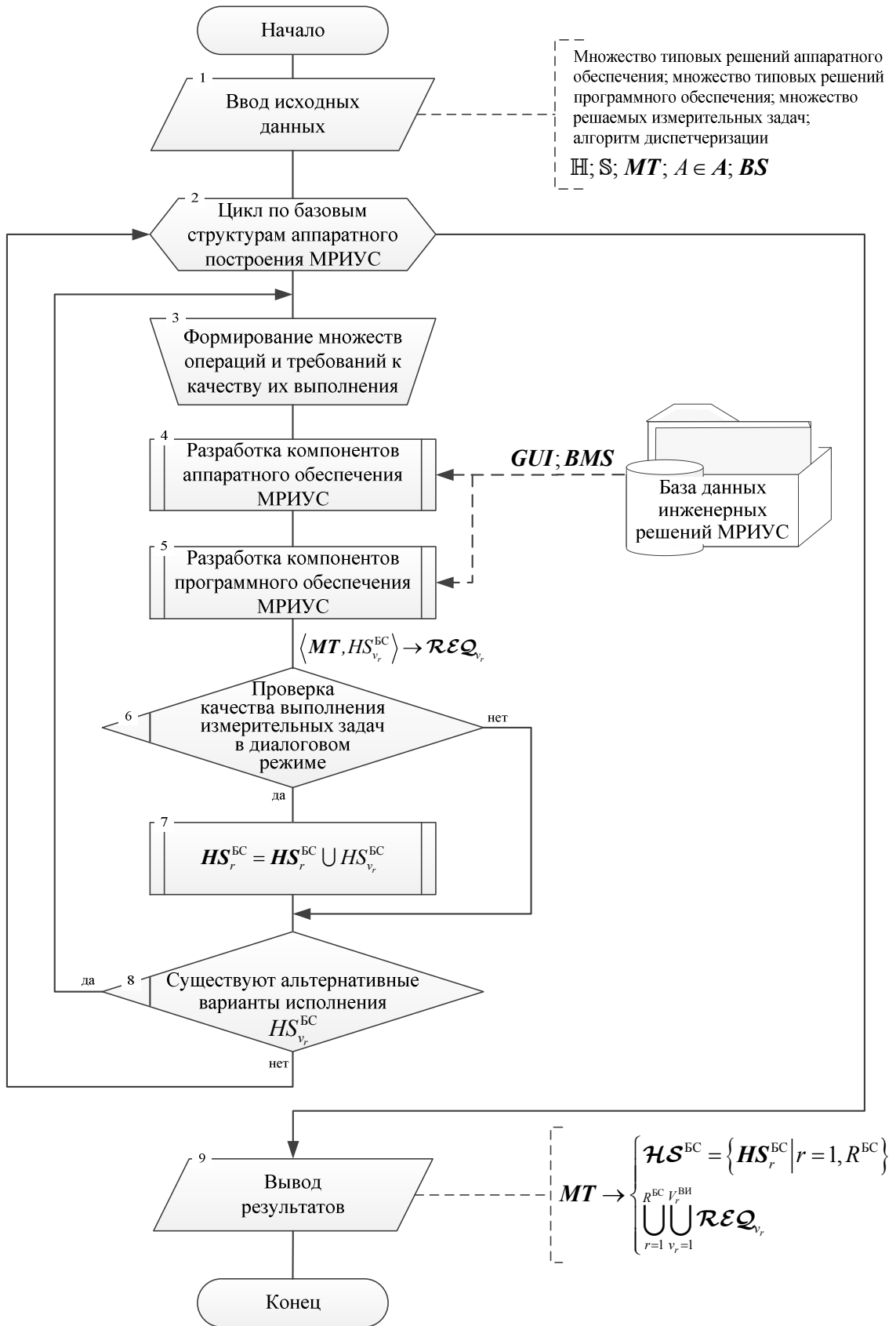


Рисунок 3.2.1 – Блок-схема алгоритма методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС

Блок 5. На данном шаге осуществляется разработка компонентов прикладного и системного программного обеспечения МРИУС на основе элементов базисного множества \mathcal{S} . Данный процесс в рамках разработанной методики реализует основные подходы, рассмотренные в работах [2, 183, 188, 242, 247, 248 и пр.].

Посредством анализа, выбора и применения известных типовых решений определяется состав системного программного обеспечения МРИУС. С учетом локализованных ограничений [246] разрабатываются компоненты прикладного программного обеспечения (см. выражения (2.1.24), (2.1.25)). В процессе проектирования данных компонентов осуществляется распределение функций обработки измерительной информации между соответствующими компонентами (см. рисунок 1.2.2).

На данном шаге методики в качестве технического решения применяется разработанный в диссертации комплекс базового измерительного обеспечения МРИУС **BMS**, который представлен в параграфе 5.1. Методика адаптации входящих в него базовых универсальных виртуальных приборов в соответствии с заданным перечнем решаемых измерительных задач **MT** приведена в пункте 5.1.2. Прикладное программное обеспечение МРИУС $SA^{ТП}$ (см. (2.1.24)), размещаемое на терминале пользователя (ГИП), обеспечивает возможность формирования предопределенного множества заданий, а также соответствующую обработку результатов экспериментальных исследований и проектируется в соответствии с одним из функциональных шаблонов проектирования **GUI**, входящих в базу данных инженерных решений. Методика разработки ГИП МРИУС на основе предложенных шаблонов рассматривается в параграфе 5.2.

Программный комплекс управления и измерения – прикладное программное обеспечение ИУ ЭВМ $SA^{ЭВМ}$ (см. выражение (2.1.25)) разрабатывается на основе подходов, представленных, например, в работах [2, 242, 264].

Возможные варианты распределения функций преобразования множеств \mathcal{S} , \mathcal{X} , \mathcal{Y} (см. рисунок 1.2.1) между ГИП и программным комплексом управления и измерения также обуславливают вариативность множества формируемых пользователем заданий $REQ_{iиз}$ при решении измерительной задачи $MT_{iиз}$. Вариативность исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС в целом (см. выражения (2.2.12)–(2.2.15)), также обусловлена измерениями, реализуемыми в целях решения

измерительных задач в диалоговом режиме на его основе: однократные, многократные, динамические, прямые, косвенные, совокупные, совместные и т.д. [125]. Следовательно, для каждой измерительной задачи, решаемой в интерактивном диалоговом режиме, на основе варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС в рамках r -й базовой структуры, определяется множество заданий $REQ_{i^{из}, v_r}$, формируемых посредством интерфейса пользователя. То есть

$$MT_{i^{из}} \rightarrow REQ_{i^{из}, v_r}. \quad (3.2.2)$$

Таким образом, множеству измерительных задач MT , решаемых на основе каждого v_r -го варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС, соответствует множество заданий пользователей REQ_{v_r} :

$$REQ_{v_r} = \bigcup_{i^{из}=1}^{I^{из}} REQ_{i^{из}, v_r}; \quad (3.2.3)$$

$$\langle MT, HS_{v_r}^{BC} \rangle \rightarrow REQ_{v_r}. \quad (3.2.4)$$

Диспетчер разделяемого ресурса разрабатывается как отдельный компонент программного обеспечения МРИУС и реализует очередность и порядок обработки заданий в соответствии с заданным в исходных данных алгоритмом диспетчеризации. Разработка компонента $SV_g^{ЭВМ}$ выполняется на основе базового алгоритма диспетчеризации $FIFO$. В рамках данной методики аспекты оперативности функционирования МРИУС как системы массового обслуживания не анализируются.

Блок 6. На данном этапе методики на основе разработанного варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС с использованием расчетно-аналитического метода, метода математического моделирования и/или предварительных прототипирования и макетирования осуществляется оценка соответствия качественных характеристик решения заданного множества измерительных задач MT в диалоговом режиме их требуемыми значениям (см. выражения (2.1.2)–(2.1.5)).

Блок 7. На данном шаге алгоритма при выполнении условия соответствия (блок 6) осуществляется включение текущего варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения $HS_{v_r}^{BC}$ в состав множества допустимых альтернативных вариантов исполнения HS_r^{BC} МРИУС.

Блок 8. С учетом результатов выполнения блоков 3–5 алгоритма методики выполняется проверка возможности альтернативной реализации аппаратно-программного обеспечения МРИУС при решении заданного перечня измерительных задач на основе текущей базовой структуры. В случае их наличия повторяются шаги 3–8 алгоритма методики.

Блок 9. Вывод результатов. На данном шаге осуществляется вывод результатов выполнения методики (см. рисунок 3.2.1) в виде совокупности вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$ и соответствующих им множеств заданий REQ_{v_r} (см. выражения (3.2.2)–(3.2.4)).

Варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС в рамках решения заданного множества измерительных задач MT определяют вариативность проектных решений МРИУС (см. выражение (1.3.4)). В целях параметризации соответствующей математической модели динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания (см. рисунок 2.1.1) в рамках методологии для каждого варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения $HS_{v_r}^{BC}$ выполняется оценка параметров реализуемого сценария диалога на основе методики, рассматриваемой в следующем параграфе.

3.3 Разработка методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС

Как показано в параграфе 3.2, на основе вошедшей в состав методологии (см. рисунок 2.5.1) методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС в соответствии с множеством MT формируются варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС для множества базовых структур BS .

Для каждой r -й базовой структуры решение измерительной задачи $MT_{i_{из}}$ на основе варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$ реализуется посредством выполнения в интерактивном диалоговом режиме совокупности заданий, формируемой на терминалах пользователей и характеризуемой множеством $REQ_{i_{из}, v_r}$ (см. выражение (3.2.2)). Таким образом

$$REQ_{i_{из}, v_r} = \{REQ_{x_{i_{из}}} | x_{i_{из}} = 1, X_{i_{из}}\}, \quad (3.3.1)$$

$$\mathbf{T}_{i\text{из}} = \left[t_{\text{обсл}_{x_{i\text{из}}}} \right], x_{i\text{из}} = \overline{1, X_{i\text{из}}}, \quad (3.3.2)$$

$$REQ_{x_{i\text{из}}} \leftrightarrow t_{\text{обсл}_{x_{i\text{из}}}}, \quad (3.3.3)$$

где $REQ_{i\text{из}, v_r}$ – множество заданий пользователей, обеспечивающее решение измерительной задачи $MT_{i\text{из}}$ на основе v_r -го варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения; $X_{i\text{из}}$ – число заданий, обеспечивающих решение измерительной задачи $MT_{i\text{из}}$; $\mathbf{T}_{i\text{из}}$ – соответствующий массив длительностей выполнения в МРИУС заданий, определяемых множеством $REQ_{i\text{из}, v_r}$.

Время выполнения $t_{\text{обсл}_{x_{i\text{из}}}}$ каждого задания из множества $REQ_{i\text{из}, v_r}$ определяется длительностями соответствующих функциональных операций, реализуемых компонентами аппаратного и программного обеспечения МРИУС. Блок-схема алгоритма разработанной методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС представлена на рисунке 3.3.1. Рассмотрим блоки алгоритма приведенной методики.

Блок 1. На данном шаге алгоритма осуществляется ввод вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС для r -й базовой структуры; ввод варьируемых параметров для множества заданий пользователей, обеспечивающих решение заданного перечня измерительных задач на основе рассматриваемого варианта исполнения.

Блок 2. Цикл по вариантам исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС. На данном шаге осуществляется перебор вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС для r -й базовой структуры.

Блоки 3–6. На данном этапе для анализируемого варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ оценивают длительности функциональных операций выполнения заданий, формируемых в целях решения каждой измерительной задачи $MT_{i\text{из}}$.

В соответствии с этим для варианта решения измерительной задачи, характеризуемого парой $\langle HS_{v_r}^{\text{BC}}, REQ_{v_r} \rangle$, для которого отсутствуют сведения о длительностях функциональных операций, выполняемых компонентами МРИУС, оценка значений $t_{\text{обсл}_{x_{i\text{из}}}}$ осуществляется на основе расчетно-аналитического и экспериментального методов (блок 5, 6).

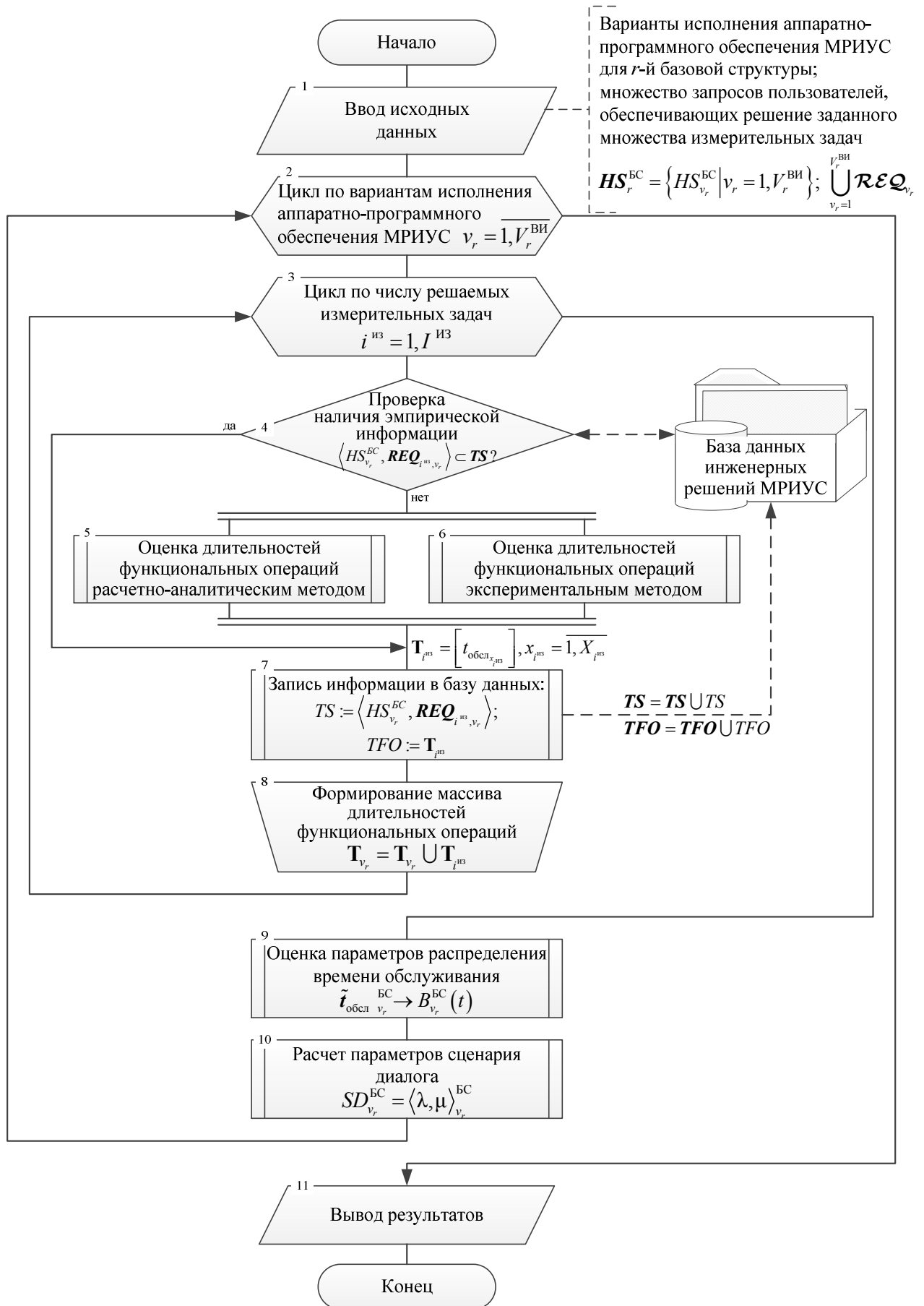


Рисунок 3.3.1 – Блок-схема алгоритма методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС

Оценка расчетно-аналитическим методом (блок 5) длительностей функциональных операций, выполняемых компонентами аппаратного и программного обеспечения МРУИС, осуществляется на основе положений и методов теории электрических цепей, теории автоматического управления, теории автоматов, теории обработки сигналов и других с использованием систем автоматизации инженерных расчетов (САЕ-систем) [252, 269]. Рассмотренные в работах [20, 100, 256, 278] методики аналитической оценки длительностей функциональных операций, выполняемых компонентами аппаратного и программного обеспечения МРУИС, а также оценка времени установления заданной конфигурации объектов управления и контроля на основе численных методов реализуются, например, с использованием систем *MATLAB*, *LabVIEW*, *Mathcad*, *Maple*, *Mathematica* и др. [182, 279, 280].

Оценка времени установления заданной конфигурации объектов управления и контроля электрической природы с учетом обрабатываемого задания, оценка длительности переходных процессов в соответствующих измерительных каналах и каналах управления (см. рисунки 3.1.1–3.1.5) выполняются с использованием систем автоматизации инженерных расчетов, реализующих алгоритмы аналогового, цифрового и аналогово-цифрового моделирования, таких как, например, *Altium Designer*, *Orcad*, *Electronic Workbench* и пр. [281, 282].

На рисунке 3.3.2 в качестве примера реализации расчетно-аналитического метода представлен результат оценки быстродействия процесса управления двухкоординатным столиком микроскопа с пьезоэлектрическим приводом, полученный в работе [283] средствами математического моделирования на основе среды *Simulink*.

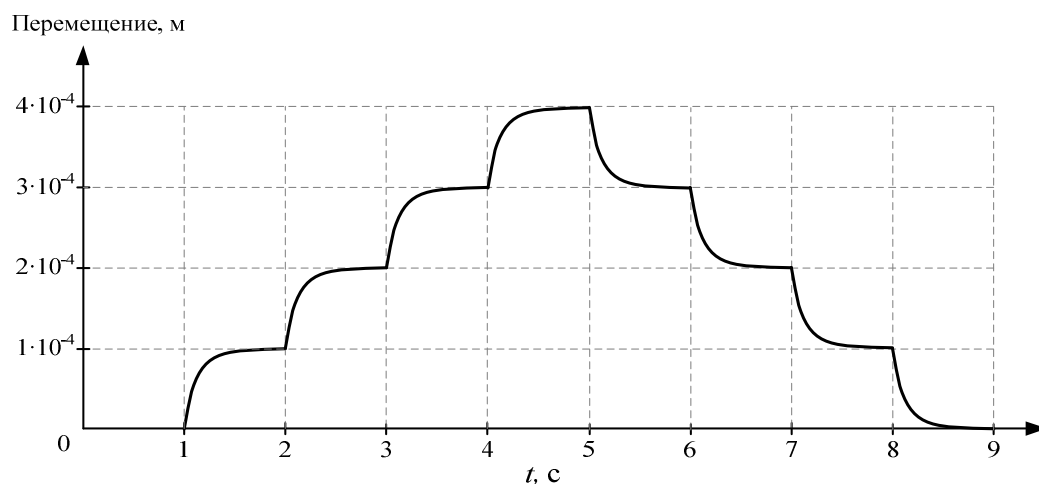


Рисунок 3.3.2 – Зависимость перемещения столика микроскопа по одной из осей координат в шаговом режиме на основе системы управления с обратной связью и ПИД-регулятором

В рамках разработанной методики расчетно-аналитический метод оценки используется совместно с представленным в блоке 6 экспериментальным методом. Оценка экспериментальным методом длительностей функциональных операций, реализуемых компонентами МРИУС, осуществляется на основе предварительного макетирования компонентов аппаратного обеспечения и прототипирования компонентов программного обеспечения [284, 285].

На рисунке 3.3.3 представлены графики зависимостей длительности операции измерения частотной зависимости комплексного коэффициента передачи от числа гармоник на декаду n_T методом перестройки частоты генератора тестового сигнала в диапазоне частот 10 Гц – 100 кГц, полученные экспериментально на примере многофункционального устройства сбора данных М-6251 для различного числа периодов тестового сигнала – n_T [286, 287].

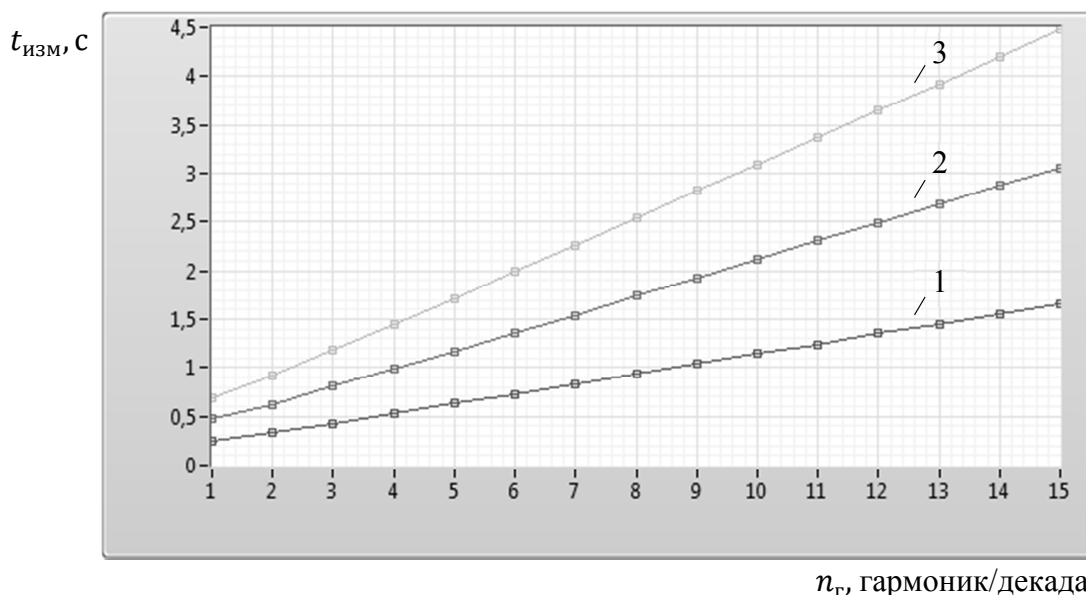


Рисунок 3.3.3 – Экспериментальные зависимости длительности функциональной операции измерения частотной зависимости комплексного коэффициента передачи в частотном диапазоне 10 Гц – 100 кГц от числа гармоник на декаду при различном количестве периодов тестового сигнала: 1 – $n_T = 2$; 2 – $n_T = 4$; 3 – $n_T = 4$

Для ряда МРИУС выявление полного объема соответствующих данных о длительностях функциональных операций может быть технически затруднено и/или нецелесообразно, например, при их зависимости от состояния, в котором пребывали канал управления, измерительный канал, объект управления и контроля на момент начала выполнения задания. В данном случае в блоках 5 и 6 алгоритма (см. рисунок

3.3.1) для сформированного множества заданий $REQ_{i_{из}, v_r}$ предлагается выполнять оценку граничных значений длительностей соответствующих функциональных операций.

Блок 7. На данном шаге методики обеспечивается накопление массива информации о полученных значениях длительностей функциональных операций, соответствующих решению измерительной задачи $MT_{i_{из}}$ в интерактивном диалоговом режиме на основе варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$, в виде элементов базы данных инженерных решений (см. рисунок 3.3.1):

$$TS = \langle HS_{v_r}^{BC}, REQ_{i_{из}, v_r} \rangle; \quad (3.3.4)$$

$$TFO = T_{i_{из}}.$$

Данная информация в дальнейшем используется в качестве эмпирической в блоке 4 алгоритма методики для анализа возможности применения ранее полученных результатов.

База данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 2.1.5) на предварительном этапе содержит информацию о типовых, унифицированных аппаратно-программных решениях функциональных узлов и устройств, для которых уже известны длительности выполняемых функциональных операций. Например, для ряда измерительных задач оценка длительностей функциональных операций измерения параметров сигналов с заданной погрешностью выполнена на основе результатов работ [121, 249, 286–289 и др.], которые включаются в базу данных в качестве соответствующей информации. Подробно разработанный в диссертации информационный состав базы данных инженерных решений МРИУС и структурная схема взаимодействия с ней в процессе разработки проектных решений рассмотрены в параграфе 5.3.

Блок 7. На данном этапе осуществляется накопление массива длительностей функциональных операций T_{v_r} , соответствующих выполнению заданий в рамках решения заданного перечня измерительных задач на основе рассматриваемого варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС. В связи с тем, что в процессе функционирования МРИУС длительность функциональных операций в общем случае зависит в том числе от последовательности и содержания поступающих с терминалов пользователей заданий, время обслуживания заданий для варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$ описывается как

некоторая случайная величина $\tilde{t}_{\text{обсл}v_r}^{\text{BC}}$, возможные значения которой определяются на основе представленных выше методов оценки (блок 5, 6).

Блок 9. Оценка параметров распределения времени обслуживания. На данном шаге алгоритма для сформированного массива значений \mathbf{T}_{v_r} определяются числовые характеристики случайной величины $\tilde{t}_{\text{обсл}v_r}^{\text{BC}}$, формируются статистические гипотезы и выбирается вид аппроксимирующей функции распределения на основе одного из критериев согласия [290–294].

Для МРИУС, реализованных на основе многообъектовых базовых структур, измерительные задачи решаются пользователем на базе соответствующего ОУиК (см. п. 3.1). Таким образом, каждый набор измерительных задач на основе соответствующего ОУиК^{К^{вид}} в общем случае характеризуется отличающимися длительностями функциональных операций, выполняемых компонентами аппаратного и программного обеспечения МРИУС. Для многообъектовых базовых структур МРИУС с внутренним разделением каналов расчет параметров сценария диалога осуществляется по принадлежности решаемой совокупности измерительных задач к каждому из $K^{\text{вид}}$ объектов управления и контроля (см. рисунки 3.1.4, 3.1.5).

Блок 10. На данном этапе рассчитываются параметры реализуемого сценария диалога для анализируемого варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС. Среднее значение длительности выполнения заданий в рамках каждой измерительной задачи $MT_{i\text{из}}$ определяется на основе массива сформированных значений \mathbf{T}_{v_r} в соответствии с выражением

$$\bar{t}_{\text{обсл}i\text{из}} = \frac{1}{X_{i\text{из}}} \sum_{x_i=1}^{X_{i\text{из}}} t_{\text{обсл}x_{i\text{из}}}. \quad (3.3.5)$$

Для совокупности решаемых в интерактивном диалоговом режиме измерительных задач, характеризуемых множеством \mathbf{MT} , среднее время обслуживания заданий на основе v_r -го варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС рассчитывается на основе следующего выражения:

$$\bar{t}_{\text{обсл}v_r}^{\text{BC}} = \frac{1}{I^{\text{из}}} \sum_{i^{\text{из}}=1}^{I^{\text{из}}} \bar{t}_{\text{обсл}i^{\text{из}}}. \quad (3.3.6)$$

Минимальное необходимое число заданий, формируемых с каждого терминала пользователя, выполнение которых обеспечивает решение перечня измерительных задач **MT**, определяется на основе выражения

$$X_{v_r}^{\text{BC}} \min = \sum_{i^{\text{из}}=1}^{I^{\text{из}}} X_{i^{\text{из}}}. \quad (3.3.7)$$

Учитывая наличие возможных ошибочных и пробных заданий пользователей, среднее число формируемых каждым пользователем заданий в рамках разработанной методики принимается равным

$$\bar{X}_{v_r}^{\text{BC}} = X_{v_r}^{\text{BC}} \min + K^3 \cdot X_{v_r}^{\text{BC}} \min, \quad (3.3.8)$$

где K^3 – коэффициент запаса, учитывающий допуск на формирование пользователями «пробных» и «ошибочных» заданий (например $K^3 = 0,1 - 0,25$).

Возможные значения интенсивности поступления заданий с каждого терминала пользователя $\lambda = 1/\bar{t}_{\text{разм}}$ задаются на основе имеющихся эмпирических данных о работе пользователей в соответствующих системах [7, 29, 161] и впоследствии уточняются в процессе опытной эксплуатации (см. п. 5.5).

Интенсивность обслуживания заданий пользователей μ определяется как

$$\mu = \frac{1}{\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{BC}}}. \quad (3.3.9)$$

Таким образом, на основе выражений (3.3.4)–(3.3.9) на рассматриваемом временном интервале функционирования ΔT для варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ в рамках методики определяется пара параметров реализуемого сценария диалога $SD_{v_r}^{\text{BC}} = \langle \lambda; \mu \rangle_{v_r}^{\text{BC}}$ (см. выражение (2.2.16)).

Для многообъектовых базовых структур МРИУС с внутренним разделением каналов расчет параметров сценария диалога осуществляется для каждой группы измерительных задач по принадлежности к каждому из $K^{\text{вид}}$ объектов управления и контроля, входящих в состав аппаратного обеспечения.

Блок 11. На данном шаге осуществляется вывод результатов в виде аппроксимирующего закона распределения времени выполнения заданий $\tilde{t}_{\text{обсл}}^{\text{BC}} \rightarrow B_{v_r}^{\text{BC}}(t)$ и рассчитанных параметров сценария диалога $SD_{v_r}^{\text{BC}} = \langle \lambda; \mu \rangle_{v_r}^{\text{BC}}$,

полученных для текущего варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$.

Итерационно повторяя шаги представленной методики для каждой базовой структуры МРИУС, осуществляется формирование множеств пар параметров реализуемого сценария диалога для множества альтернативных вариантов проектных решений МРИУС (выражение (2.2.29)).

Сформированные пары параметров сценария диалога $SD_{v_r}^{BC}$ в дальнейшем используются в качестве исходных данных для оценки параметров оперативности функционирования МРИУС на основе методов математического моделирования (см. рисунок 2.5.1). Соответствующие математические модели динамики функционирования МРИУС рассматриваются в следующем параграфе.

3.4 Разработка математических моделей динамики функционирования МРИУС

3.4.1 Постановка задачи моделирования

Разработка математической модели МРИУС решает задачу выявления и исследования функциональных зависимостей выделенных в главе 1 параметров оперативности функционирования МРИУС (выражение (1.2.10)) от ее структуры, состава аппаратно-программного обеспечения и реализуемого алгоритма диспетчеризации (выражение (2.1.29)) посредством рассмотрения ее функционирования как системы массового обслуживания (см. рисунок 2.1.1). В соответствии с вышеизложенным в рамках диссертационной работы под математической моделью МРИУС понимается модель системного уровня, отображающая работу МРИУС во времени при обслуживании поступающих заданий пользователей, т. е. ее динамику функционирования [30, 127, 181]. Рассмотрим временную диаграмму обработки поступающего с терминала пользователя задания (рисунок 3.4.1), построенную на основе обобщенных структурной схемы и алгоритма функционирования МРИУС, представленных на рисунках 1.2.1 и 1.2.5 соответственно.

В соответствии с выделенной в главе 1 спецификой работы МРИУС при непосредственном выполнении заданий пользователей на временной диаграмме (рисунок 3.4.1) отдельно представлены функциональные операции управления и

измерения, характеризующие в целом время обслуживания задания в МРИУС на основе соответствующих компонентов ее аппаратно-программного обеспечения.

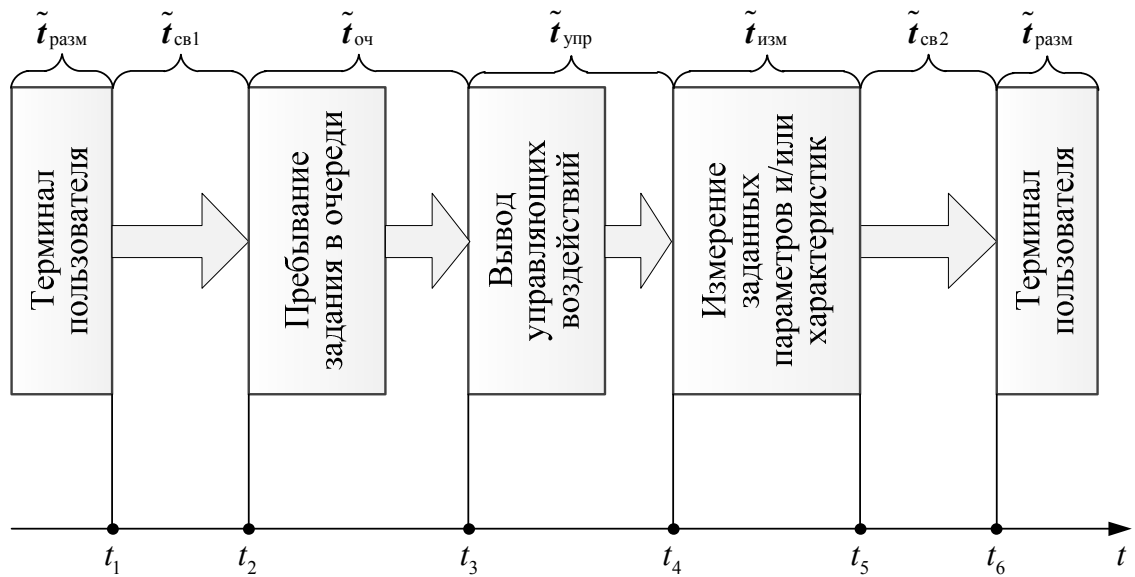


Рисунок 3.4.1 – Обобщенная временная диаграмма обработки задания в МРИУС: t_1 – отправка задания на измерительно-управляющую ЭВМ; t_2 – получение задания измерительно-управляющей ЭВМ, запись задания в очередь; t_3 – извлечение задания из очереди, вывод управляющих воздействий; t_4 – начало выполнения измерений; t_5 – отправка результатов выполнения задания на терминал пользователя; t_6 – получение результатов выполнения задания терминалом пользователя

Рассмотрим временные интервалы приведенной на рисунке 3.4.1 диаграммы. Величины временных отрезков $[t_1, t_2]$ и $[t_5, t_6]$ определяются временем прохождения сформированного задания и результатов его выполнения данных по каналу связи, в качестве которого рассматривается вычислительная сеть. Они зависят от пропускной способности сети и объема передаваемых данных [295]. Введем следующее обозначение: $\tilde{t}_{св}$ – случайное время задержки передачи данных по каналу связи в МРИУС; $\tilde{t}_{св} = \tilde{t}_{св1} + \tilde{t}_{св2} = (t_6 - t_5) + (t_2 - t_1)$.

Временной интервал $[t_2, t_3]$ характеризуется временем нахождения задания в очереди и зависит от числа заданий, имеющих в очереди на измерительно-управляющей ЭВМ на момент поступления текущего, а также реализуемого алгоритма диспетчеризации. Обозначим величиной $\tilde{t}_{оч}$ случайное время пребывания поступающих заданий в очереди в МРИУС, $\tilde{t}_{оч} = t_3 - t_2$.

Длина интервала диаграммы $[t_3, t_4]$ определяется временем выполнения функциональной операции формирования и вывода управляющих воздействий в соответствии с обрабатываемым заданием (внесение параметрических и структурных изменений в объект управления и контроля, изменение конфигурации измерительного канала и канала управления и пр.). Введем обозначение: $\tilde{t}_{\text{упр}}$ – случайное время выполнения функциональной операции управления в МРИУС (см. п. 3.3), $\tilde{t}_{\text{упр}} = t_4 - t_3$.

Участок диаграммы $[t_4, t_5]$ определяется временем, затраченным на выполнение функциональной операции измерения заданных параметров и/или характеристик в соответствии с обрабатываемым заданием. В зависимости от числа и номенклатуры объектов управления и контроля, выполняемого вида измерений в МРИУС и т.д. величина интервала может быть фиксированной или случайной, распределенной на заданном интервале. Введем обозначение: $\tilde{t}_{\text{изм}}$ – случайное время выполнения функциональной операции измерения в МРИУС (см. п. 3.3), $\tilde{t}_{\text{изм}} = t_5 - t_4$.

В соответствии с вышеизложенным время ожидания результатов выполнения задания $\tilde{t}_{\text{ож}}$, характеризующее оперативность функционирования МРИУС, определяется выражением

$$\tilde{t}_{\text{ож}} = \tilde{t}_{\text{св}} + \tilde{t}_{\text{оч}} + \tilde{t}_{\text{упр}} + \tilde{t}_{\text{изм}} = \tilde{t}_{\text{св}} + \tilde{t}_{\text{оч}} + \tilde{t}_{\text{обсл}}, \quad (3.4.1)$$

где $\tilde{t}_{\text{обсл}}$ – время выполнения задания в МРИУС, определяемое на основе методики, рассмотренной в предыдущем параграфе.

Случайные величины $\tilde{t}_{\text{св}}$, $\tilde{t}_{\text{оч}}$, $\tilde{t}_{\text{упр}}$, $\tilde{t}_{\text{изм}}$ в общем случае являются взаимонезависимыми, таким образом математическое ожидание величины $\tilde{t}_{\text{ож}}$ находится следующим образом [290, 296]:

$$M(\tilde{t}_{\text{ож}}) = M(\tilde{t}_{\text{св}} + \tilde{t}_{\text{оч}} + \tilde{t}_{\text{обсл}}) = M(\tilde{t}_{\text{св}}) + M(\tilde{t}_{\text{оч}}) + M(\tilde{t}_{\text{обсл}}), \quad (3.4.2)$$

или

$$\bar{t}_{\text{ож}} = \bar{t}_{\text{св}} + \bar{t}_{\text{оч}} + \bar{t}_{\text{обсл}} = \bar{t}_{\text{св}} + \bar{t}_{\text{оч}} + \bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}_{\text{изм}}. \quad (3.4.3)$$

Соответственно дисперсия времени ожидания $D(\tilde{t}_{\text{ож}})$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma(\tilde{t}_{\text{ож}})$ определяются выражениями:

$$D(\tilde{t}_{\text{ож}}) = D(\tilde{t}_{\text{св}} + \tilde{t}_{\text{оч}} + \tilde{t}_{\text{обсл}}) = D(\tilde{t}_{\text{св}}) + D(\tilde{t}_{\text{оч}}) + D(\tilde{t}_{\text{обсл}}); \quad (3.4.4)$$

$$\delta(\tilde{t}_{\text{ож}}) = \sqrt{D(\tilde{t}_{\text{ож}})} = \sqrt{D(\tilde{t}_{\text{св}}) + D(\tilde{t}_{\text{оч}}) + D(\tilde{t}_{\text{обсл}})}. \quad (3.4.5)$$

После возврата результатов выполнения задания на терминал пользователь на обработку и формирование нового задания тратит случайное время «размышления» $\tilde{t}_{\text{разм}}$, по истечении которого цикл обработки задания в МРИУС повторяется в соответствии с участком $[t_1, t_6]$ временной диаграммы (см. рисунки 1.2.5, 3.4.1).

На основе выражения (3.4.2) могут быть определены рассмотренные в главе 1 (1.2.10), параметры оперативности $\bar{t}_{\text{ож}}$ и ε :

$$\bar{t}_{\text{ож}} = M(\tilde{t}_{\text{ож}}); \quad (3.4.6)$$

$$\varepsilon = \frac{\bar{t}_{\text{ож}}}{M(\tilde{t}_{\text{обсл}})} = \frac{\bar{t}_{\text{ож}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}}. \quad (3.4.7)$$

Для оценки оперативности функционирования МРИУС на основе критерия $P_{t_{\text{ож,пор}}}$ необходимо определить функцию распределения величины $\tilde{t}_{\text{ож}}$. Введем следующие обозначения:

$R(t)$ – функция распределения интервалов размышления пользователя $\tilde{t}_{\text{разм}}$;

$E(t)$ – функция распределения времени ожидания результатов выполнения заданий $\tilde{t}_{\text{ож}}$;

$C(t)$ – функция распределения времени задержки передачи заданий по каналу связи $\tilde{t}_{\text{св}}$;

$W(t)$ – функция распределения времени пребывания заданий в очереди $\tilde{t}_{\text{оч}}$;

$B(t)$ – функция распределения времени выполнения (обслуживания) заданий $\tilde{t}_{\text{обсл}}$.

Функция распределения времени ожидания $E(t)$ в соответствии с выражением 3.3.1 может быть найдена как композиция функций распределений $C(t)$, $W(t)$ и $B(t)$ [290, 291]:

$$E(t) = C(t) * W(t) * B(t). \quad (3.4.8)$$

Таким образом

$$P_{t_{\text{ож_пор}}} = E(t \leq t_{\text{ож_пор}}). \quad (3.4.9)$$

Выражения (3.4.6), (3.4.7) и (3.4.9) в общем виде определяют введенные в главе 1 параметры оперативности функционирования МРИУС. Рассмотрим подробно слагаемые (3.4.1).

Исследования временных задержек передачи данных по вычислительным сетям выполнялись неоднократно, в частности, в работах [297, 298]. Соответствующие обобщающие результаты применительно к МРИУС, например, приведены в [145, 208–210 и пр.]. Так, в [209, 271] представлены обобщенные экспериментальные зависимости функции плотности вероятности распределения времени задержки передачи данных по вычислительным сетям различных типов от интенсивности входящего потока заданий. Данные результаты экспериментальных исследований включены в состав методологии в качестве эмпирической информации, представленной соответствующей базой данных (см. рисунок 2.5.1). Схема метода определения задержки передачи данных в МРИУС, функционирующих на основе вычислительных сетей, с использованием базы данных результатов экспериментальных исследований, обобщенных в работах [209, 271], приведена на рисунке 3.4.2.

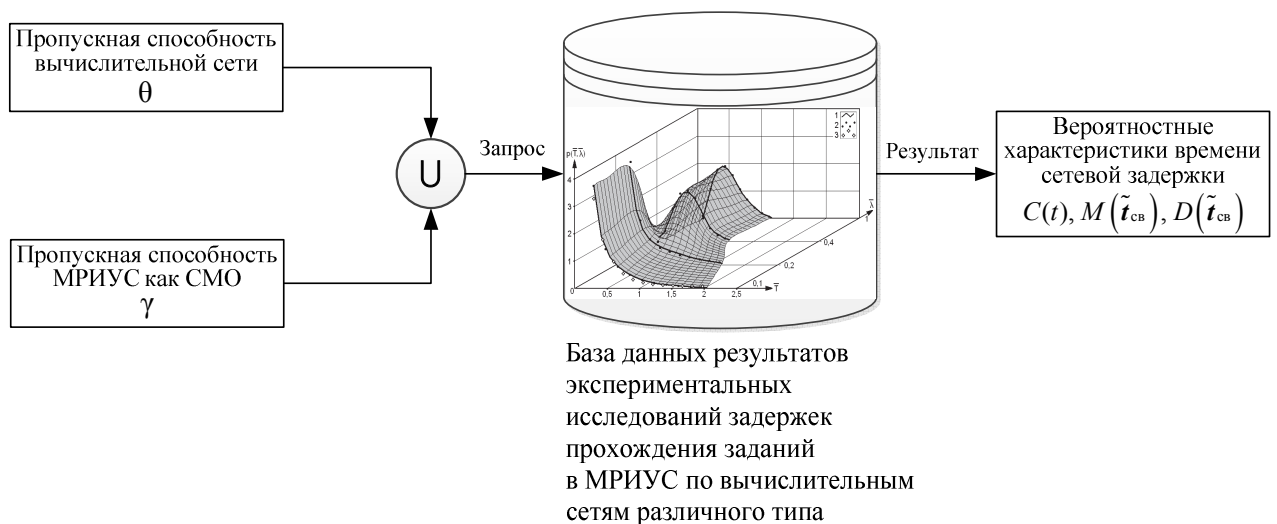


Рисунок 3.4.2 – Схема метода определения задержки передачи данных между терминалами пользователей и измерительно-управляющей ЭВМ МРИУС на основе базы данных результатов экспериментальных исследований

Приведенные в работах [88, 208, 209, 271] результаты показывают, что, например, для МРИУС, функционирующей в «насыщении» с пропускной способностью

$\gamma \approx 1/\bar{t}_{\text{обсл}} \approx 1$ задание/с (см. п. 1.2.2) на основе сети Интернет с использованием выделенной линии 10 Мбит/с, средняя задержка передачи заданий составит $\approx 0,6$ с.

Также следует отметить, что в соответствии с программой развития цифровой экономики РФ в отношении цифровой инфраструктуры планируется обеспечить широкополосный доступ к сети Интернет для 89 % домашних хозяйств от общего числа, а для городов с населением более 1 млн человек – устойчивое покрытие сетью 5G [43]. В сетях 3G задержки передачи данных составляют сотни миллисекунд, для сетей 4G – десятки миллисекунд, в свою очередь, для сетей 5G сформированы требования к задержке в 1–4 мс [299, 300]. Таким образом, обозначена явная тенденция к сокращению временных задержек передачи данных по мобильным сетям, которыми в ряде случаев по отношению к величине $\bar{t}_{\text{обсл}}$ можно пренебречь.

Время ожидания заданий в очереди $\tilde{t}_{\text{оч}}$ в общем случае зависит от вида и параметров распределения интервалов размышления между повторными заданиями, формируемых на терминалах пользователей, вида и параметров распределения времени обслуживания заданий, структуры МРИУС и реализуемого алгоритма диспетчеризации.

С учетом вышеизложенного оценка параметров оперативности функционирования МРИУС (выражения (3.4.6), (3.4.7), (3.4.9)) осуществляется на основе методов аналитического и имитационного моделирования, в рамках которых применяются модели динамики функционирования МРИУС [181, 252, 269], рассматриваемые далее.

3.4.2 Базовые аналитические модели

Как показали исследования, проведенные в главе 1, многообразие направлений прикладного применения систем с разделением времени обусловило развитие их системных представлений (моделей), учитывающих специфику соответствующих областей использования [15, 193–201 и др.]. Динамика функционирования МРИУС как системы массового обслуживания, приведенной на рисунке 1.2.6, в общем виде может быть описана моделью замкнутой СМО с ожиданием $G/G//k/N$. Приближенный анализ данной СМО на основе метода диффузионной аппроксимации и результаты его сравнительной оценки рассмотрены в работах [301, 302]. Выявление функции распределения времени ожидания в явном виде для данной системы на основе известных методов не представляется возможным [150, 301].

В зависимости от области прикладного применения и принятых статистических предположений о распределении интервалов времени между повторными заявками, распределении времени обслуживания и реализуемой дисциплине обслуживания и пр. в научных изданиях рассмотрено достаточно большое количество разновидностей моделей с конечным источником [163–165]. Развитие частных аналитических моделей обусловлено постоянным расширением и индивидуальными отличительными особенностями сфер прикладного применения общей модели [303].

Модели СМО с конечным источником, показательным распределением времени обслуживания и различными гипотезами о входящем потоке заданий рассмотрены, например, в работах [304–306]. При этом в [305] показано, что вид аналитических выражений для стационарных вероятностей распределения числа заданий в канале обслуживания для систем $G/M//k/N$ и $M/M//k/N$ совпадает.

В предположении об экспоненциальном распределении времени между повторными заданиями, поступающими с терминалов пользователей, и распределении времени обслуживания, заданном в общем виде, аналитические выражения для параметров производительности системы $M/G//1/N$ детально рассмотрены, в частности, в работах [162, 307]. Алгоритм расчета характеристик для многоканальной системы $M/G//k/N$ представлен в [28, 308]. При этом, например, для системы $M/G//1/N$ вид распределения времени пребывания заданий в очереди может быть получен на основе обратного преобразования Лапласа – Стилтеса только с применением численных методов для ограниченного перечня видов распределений времени обслуживания [162]. Основные подходы анализа МРИУС на основе модели $M/G//1/N$ рассмотрены автором в работе [272].

В рамках диссертационной работы, в целях упрощения математического описания и последующих вычислений при выявлении общих функциональных зависимостей и формировании множества допустимых вариантов проектных решений МРИУС, приняты следующие допущения:

- с терминалов пользователей задания отправляются независимо один от другого, время «размышления», необходимое каждому пользователю для формирования задания после получения ответа на предыдущее, распределено по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $1/\lambda = \bar{t}_{\text{разм}}$. При этом вероятность того, что в канал обслуживания от терминала пользователя поступит задание в интервале времени

$\Delta t'$, равна $\lambda \Delta t' + o(\Delta t')$ [162, 151, 166 и пр.]. В литературе такой поток заявок от N терминалов пользователей также называют *квазислучайным* (*quasi-random*) [30, 162, 309 и др.];

- время обслуживания заданий распределено по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $\bar{t}_{\text{обсл}} = 1/\mu$;
- обслуживающий прибор является абсолютно надежным.

В качестве дисциплины обслуживания заданий рассматривается базовая дисциплина *FIFO* (см. п. 1.1). Соответствующие аналитические модели Марковских СМО для оценки среднего значения времени пребывания заданий в очереди в МРИУС кратко рассмотрены далее.

3.4.2.1 Одноканальная замкнутая система массового обслуживания

Рассмотрим однообъектовую МРИУС, выполненную на основе базовой структуры, представленной на рисунке 3.1.2. Данная система характеризуется выполнением входящего потока заданий с использованием одного «обслуживающего прибора». В соответствии с этим и учетом вышеизложенных допущений в качестве обобщенной модели динамики функционирования однообъектовой МРИУС рассматривается одноканальная замкнутая система массового обслуживания $M/M/1/N$ (рисунок 3.4.3).

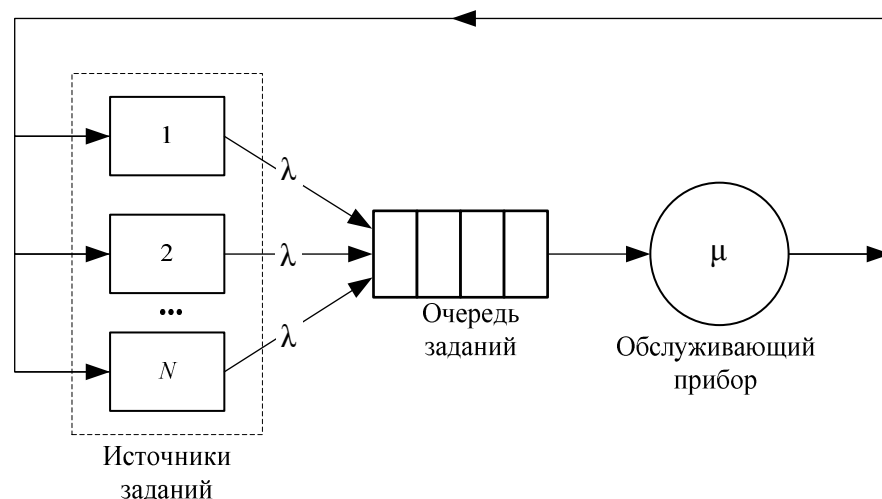


Рисунок 3.4.3 – Представление однообъектовой МРИУС в качестве системы массового обслуживания $M/M/1/N$

Среднее время ожидания в очереди для системы $M/M/1/N$ определяется на основе следующего выражения [167]:

$$\bar{W} = \frac{N}{U \cdot \mu} - \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\mu}, \quad (3.4.10)$$

где μ – интенсивность обслуживания; λ – интенсивность поступления заданий с каждого источника; N – число источников заданий; U – коэффициент использования обслуживающего прибора.

Коэффициент использования обслуживающего прибора U равен:

$$U = 1 - P_0, \quad (3.4.11)$$

где P_0 – вероятность простоя обслуживающего прибора, определяемая на основе выражения

$$P_0 = \left(1 + \sum_{k=1}^N \frac{N!}{(N-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right)^{-1}. \quad (3.4.12)$$

При функционировании *многообъектовой системы с индивидуальными каналами и отличающимися ОУиК* (рисунок 3.1.4) обеспечивается возможность параллельного выполнения заданий, принадлежащих к разным ОУи и входящих в состав аппаратного обеспечения. Таким образом, в качестве модели динамики функционирования МРИУС, реализованной на основе данной базовой структуры, рассматривается совокупность нескольких независимых одноканальных замкнутых СМО. При этом число терминалов пользователей для каждой из них определяется текущим реализуемым режимом эксплуатации. Таким образом, для каждой из $K^{\text{вид}}$ одноканальных СМО число источников заданий N в общем случае может изменяться в пределах от 0 до N_T .

Рассмотрим семейство *многообъектовых структур МРИУС с внутренним разделением каналов* (см. рисунок 3.1.5). В данных системах в связи с объединением нескольких объектов управления и контроля в составе одной системы общее число терминалов пользователей функционально разделяется на совокупность «групп терминалов», каждая из которых формирует задания для одного из $K^{\text{вид}}$ имеющихся ОУиК, при этом обслуживание потока поступающих заданий возможно только на основе одного «обслуживающего прибора». В режиме эксплуатации, в котором обеспечивается временное разнесение выделенных интервалов работы для каждой «группы терминалов», функционирование каждой из *многообъектовых МРИУС с внутренним разделением каналов* (рисунок 3.1.5) представляется в виде приведенной на

рисунке 3.4.3 системы массового обслуживания $M/M/1//N$ с соответствующими числом источников заданий и интенсивностью обслуживания заданий для конкретного ОУиК. Для режима эксплуатации, обеспечивающего возможность формирования заданий различными «группами терминалов» в пересекающиеся интервалы времени в МРИУС, реализованных на основе рассматриваемых структур (см. рисунок 3.1.5), функционирование каждой представляется в виде неоднородной одноканальной замкнутой СМО, подробно рассмотренной в п. 3.4.2.3.

3.4.2.2 Многоканальная замкнутая система массового обслуживания

В многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК (см. рисунок 3.1.3) входящий поток заданий с терминалов пользователей параллельно выполняется на основе нескольких однотипных измерительных каналов, каналов управления, объектов управления и контроля – «обслуживающих приборов». Таким образом, функционирование МРИУС, реализованной на основе данной базовой структуры, рассматривается в виде многоканальной замкнутой системы массового обслуживания (см. рисунок 3.4.4).

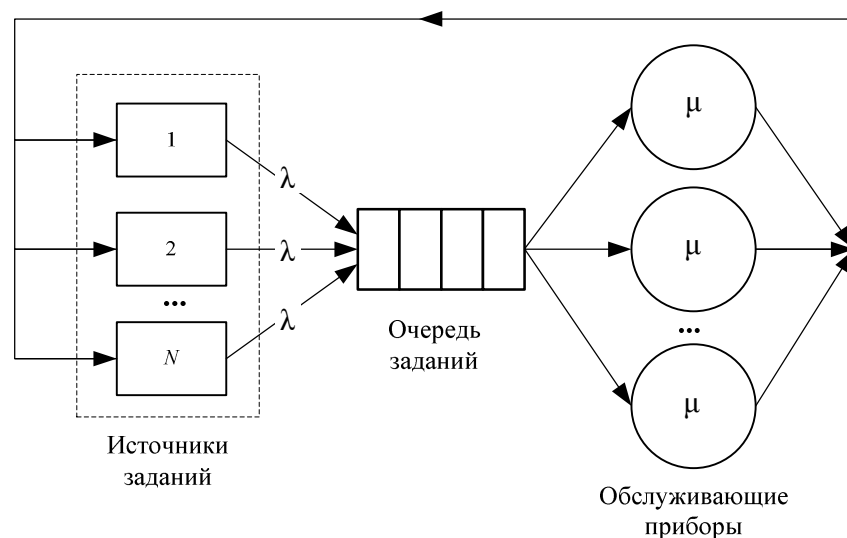


Рисунок 3.4.4 – Представление многообъектовой МРИУС в качестве системы массового обслуживания $M/M/k//N$

Среднее время пребывания заданий в очереди для системы $M/M/k//N$ определяется следующим выражением [151, 167, 310]:

$$\bar{W} = \frac{\bar{Q}}{\mu \cdot (k - \bar{S})}, \quad (3.4.13)$$

где k – число однотипных обслуживающих приборов; \bar{Q} – средняя длина очереди заданий, определяемая выражением

$$\bar{Q} = \sum_{n=k}^N \frac{(n-k) \cdot N!}{k^{(n-k)} \cdot (N-n)! \cdot k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0; \quad (3.4.14)$$

\bar{S} – среднее число простаивающих обслуживающих приборов, равное

$$\bar{S} = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(k-n) \cdot N!}{n! \cdot (N-n)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0, \quad (3.4.15)$$

а P_0 – вероятность простоя обслуживающих приборов, рассчитываемая на основе следующего выражения:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{N!}{n! \cdot (N-n)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n + \sum_{n=k}^N \frac{N!}{k^{(n-k)} \cdot (N-n)! \cdot k!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \right]^{-1}. \quad (3.4.16)$$

На рисунке 3.4.5 приведен график двумерной зависимости среднего времени пребывания заданий в очереди для системы $M/M/2//N$ от интенсивности поступления заданий с каждого источника заданий λ и интенсивности их обслуживания μ , при $N = 40$.

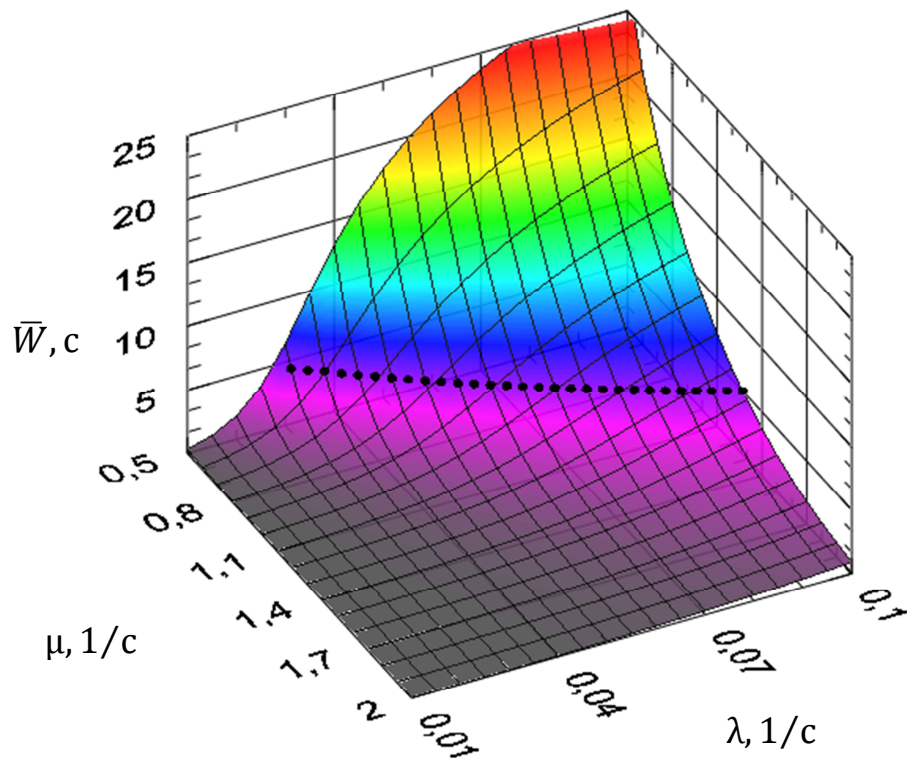


Рисунок 3.4.5 – Пример графика зависимости $\bar{W} = f(\lambda, \mu)$ для системы массового обслуживания $M/M/2//N$ при $N = 40$

На основе зависимостей, представленных выражениями (3.4.10), (3.4.13), с учетом выражения (3.4.3) могут быть сформированы граничные значения параметров реализуемого сценария диалога в МРИУС. В качестве примера на рисунке 3.4.5 пунктирной линией показана граница для возможных значений пары $\langle \lambda, \mu \rangle$, соответствующая $\bar{W} = \bar{t}_{оч} = 5$ с.

3.4.2.3 Неоднородная одноканальная замкнутая система массового обслуживания

Рассмотрим режим эксплуатации *многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов* (рисунок 3.1.5), при котором решение измерительных задач различными «группами терминалов» выполняется на одном временном интервале функционирования. Заданиям каждой «группы терминалов» в общем случае соответствует индивидуальные времена их выполнения на основе соответствующего объекта управления и контроля (см. п. 3.1.2).

Введем следующие обозначения в терминах теории массового обслуживания:

- C – число классов источников заданий системы, равное для рассматриваемой системы в общем случае числу объектов управления и контроля, входящих в состав аппаратного обеспечения базовой структуры МРИУС – $K^{вид}$;
- $\vec{N} = (N_1, N_2, \dots, N_c, \dots, N_c)$, где N_c – число источников заданий c -го класса;
- $\vec{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_c, \dots, \lambda_c)$, где λ_c – интенсивность поступления заданий для источников c -го класса;
- $\vec{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_c, \dots, \mu_c)$, где μ_c – интенсивность обслуживания заданий c -го класса;

Соответствующие значения λ_c и μ_c , определяются на основе методики оценки параметров сценария диалога, рассмотренной в параграфе 3.3. Структурная схема *многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов* как неоднородной системы массового обслуживания приведена на рисунке 3.4.6.

Расчет среднего значения времени ответа для рассмотренной на рисунке 3.4.6 системы осуществляется на основе итерационного метода анализа средних значений (*Mean Value Analysis*) посредством ее представления как закрытой сети массового обслуживания с двумя узлами [311, 312].

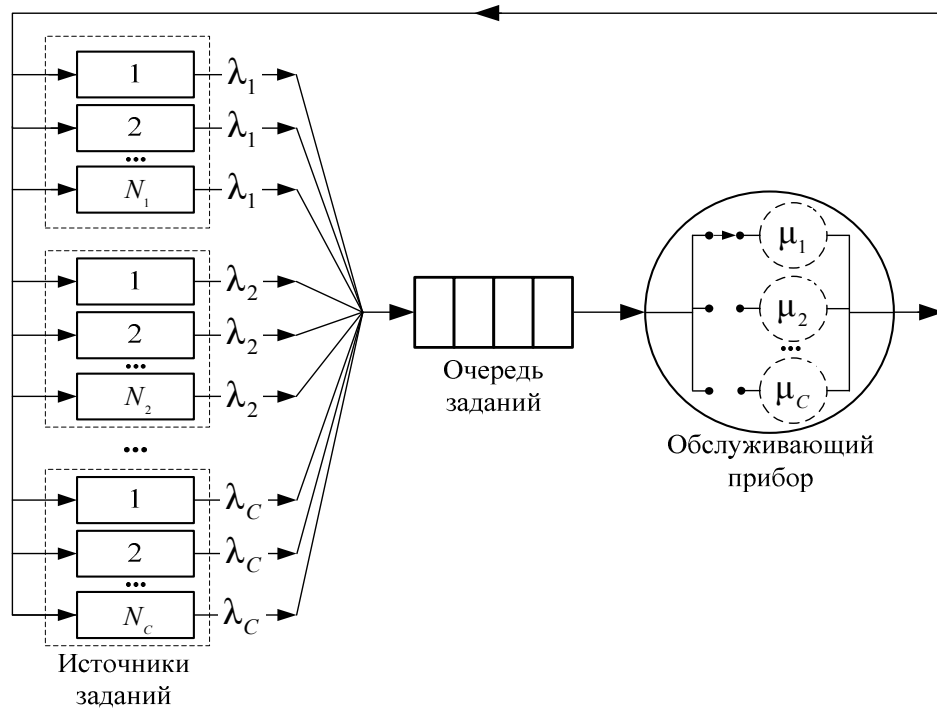


Рисунок 3.4.6 – Представление многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов в качестве неоднородной системы массового обслуживания $\vec{M}/\vec{M}/1//N$

Базовые уравнения для оценки параметров производительности рассматриваемой сети определяются следующими основными выражениями [162, 167, 311–314]:

$$\bar{W}_i(\vec{N}) = \sum_{c=1}^c \frac{1}{\mu_c} \cdot \bar{Q}_c(\vec{N} - \vec{1}_i) + \sum_{c=1}^c \frac{1}{\mu_c} \cdot U_c(\vec{N} - \vec{1}_i); \quad (3.4.17)$$

$$\bar{Q}_c(\vec{N}) = \bar{W}_c(\vec{N}) \cdot (N_c - \bar{L}_c(\vec{N})) \cdot \lambda_c; \quad (3.4.18)$$

$$\bar{L}_c(\vec{N}) = N_c - \frac{U_c(\vec{N}) \cdot \mu_c}{\lambda_c}, \quad (3.4.19)$$

где $\bar{W}_i(\vec{N})$ – среднее время ожидания в очереди для заданий i -го класса, рассматриваемого в качестве прибывающего, $i = 1, \dots, C$; $U_c(\vec{N})$ – коэффициент использования обслуживающего прибора заданиями c -го класса; $\bar{L}_c(\vec{N})$ – среднее число заданий c -го класса в очереди и обслуживании; $\bar{Q}_c(\vec{N} - \vec{1}_i)$ и $U_c(\vec{N} - \vec{1}_i)$ – число ожидающих в очереди заданий и коэффициент использования обслуживающего прибора для заданий c -го класса в системе с одним удаленным заданием i -го класса.

Подстановка выражения (3.4.19) в (3.4.18) преобразует выражение для $\bar{Q}_c(\vec{N})$ следующим образом:

$$\bar{Q}_c(\vec{N}) = \bar{W}_c(\vec{N}) \cdot U_c(\vec{N}) \cdot \mu_c. \quad (3.4.20)$$

Коэффициент использования соответствующего обслуживающего прибора заданиями c -го класса определяется на основе выражения [167, 313]

$$U_c(\vec{N}) = \frac{N_c}{\left(\bar{W}_c(\vec{N}) + \frac{1}{\mu_c} + \frac{1}{\lambda_c}\right) \cdot \mu_c} \quad (3.4.21)$$

Расчет значений среднего времени пребывания заданий в очереди $\bar{W}_i(\vec{N})$ осуществляется посредством последовательного итерационного вычисления выражений (3.4.17), (3.4.20), (3.4.21) для каждого класса заданий, поочередно рассматриваемого в качестве прибывающего, при изменении общей численности популяции системы от 1 до $\sum_{c=1}^C N_c$.

Более подробно алгоритмы расчета показателей производительности сетей массового обслуживания на основе точного и приближенных методов анализа средних значений описаны, например, в работах [161, 312, 315 и др.].

На рисунке 3.4.7 представлены результаты расчета графических зависимостей среднего времени пребывания заданий в очереди на примере неоднородной системы с четырьмя классами источников заданий от числа источников в одном классе N_1 для следующих исходных данных:

- $\lambda_1 = 0,015; \lambda_2 = 0,005; \lambda_3 = 0,02; \lambda_4 = 0,03;$
- $\mu_1 = 0,5; \mu_2 = 1; \mu_3 = 0,5; \mu_4 = 2;$
- $N_2 = N_3 = N_4 = 10.$

Посредством подстановки в выражение (3.4.3) результатов расчета среднего времени ожиданий заданий в очереди, выполненных на основе выражений (3.4.10), (3.4.13), (3.4.17), вычисляется среднее значение времени ожидания результатов измерения для анализируемого варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения базовой структуры МРИУС (п. 3.2) и реализуемого на его основе сценария диалога (п. 3.3).

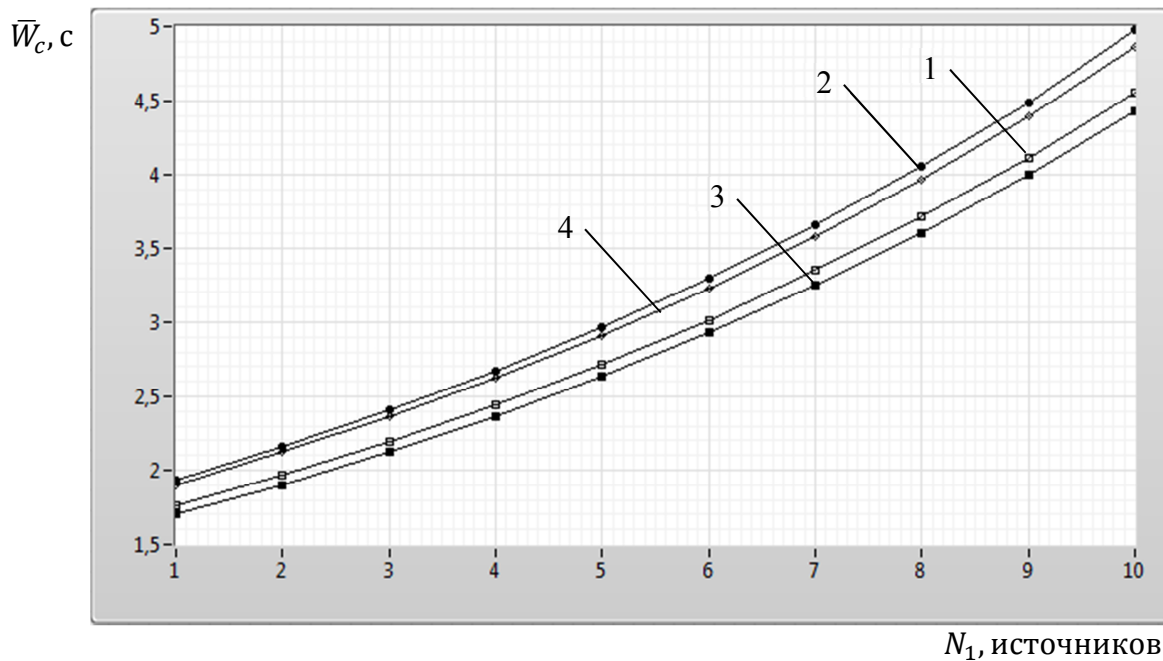


Рисунок 3.4.7 – Графики зависимости среднего времени пребывания в очереди для заданий c -го класса от числа источников заданий первого класса N_1 :

$$1 - \bar{W}_1; 2 - \bar{W}_2; 3 - \bar{W}_3; 4 - \bar{W}_4$$

В рамках разработанной методологии рассмотренные аналитические модели используются при оценке граничных параметров сценария диалога на основе параметров оперативности $\bar{t}_{ож}$ и ε (выражения (3.4.6), (3.4.7)). Сформированные граничные значения параметров сценария диалога являются критерием селекции множества сформированных вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС (см. п. 2.2.2).

Для решения задачи оценки оперативности МРИУС на основе вероятностного критерия (выражение 3.4.9), а также исследования динамики функционирования на основе уточненных статистических гипотез, в рамках методологии реализован подход, базирующийся на методе имитационного моделирования [181, 187]. Разработанная имитационная модель динамики функционирования МРИУС рассматривается в следующем пункте.

3.4.3 Базовая имитационная модель

В целях обеспечения возможности исследовать распределение времени ожидания результатов выполнения заданий при произвольно и индивидуально заданных распределениях интервалов размышления пользователей, времени обслуживания, задержек

прохождения данных по каналу связи, а также возможных реализуемых алгоритмов диспетчеризации, отличных от базового алгоритма *FIFO*, в рамках диссертационной работы разработана и применяется имитационная модель динамики функционирования МРИУС, позволяющая средствами вычислительного эксперимента исследовать поведение МРИУС при варьировании перечисленных параметров [316–317].

Обобщенная структура разработанной имитационной модели представлена на рисунке 3.4.8.

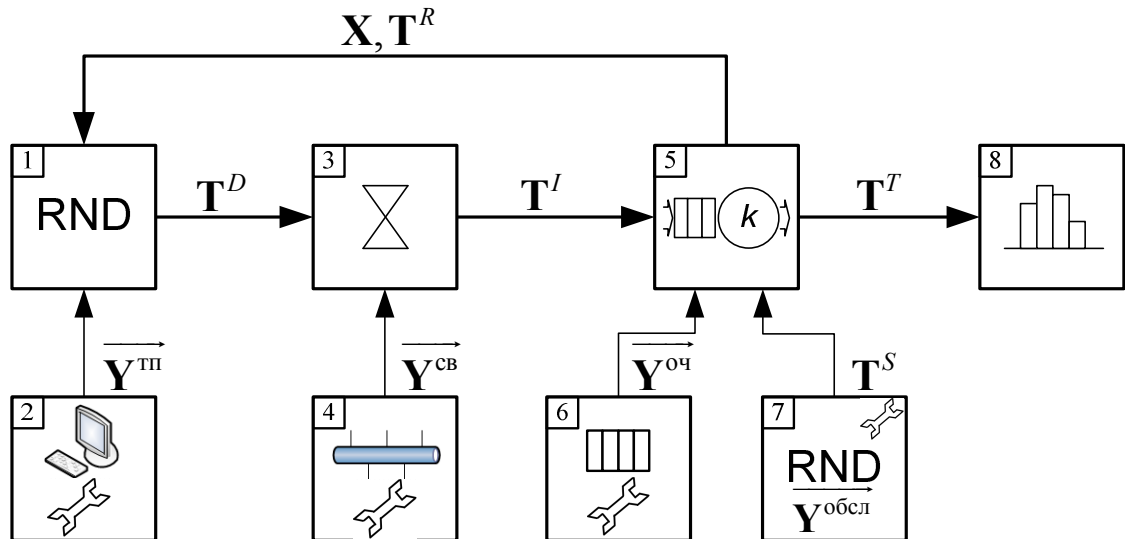


Рисунок 3.4.8 – Обобщенная структура имитационной модели МРИУС: 1 – формирование времен пребывания заданий в источнике $\tilde{t}_{\text{разм}}$; 2 – блок управления параметрами формирования $\tilde{t}_{\text{разм}}$; 3 – формирование задержки прохождения данных по каналу связи $\tilde{t}_{\text{св}}$ (ЛВС, Интернет); 4 – блок управления параметрами формирования $\tilde{t}_{\text{св}}$; 5 – обработка заданий в канале обслуживания, расчет времени «возврата» задания в источник; 6 – блок управления очередью заданий (реализация алгоритма диспетчеризации); 7 – формирование времени обслуживания заданий $\tilde{t}_{\text{обсл}}$; 8 – блок обработки состояний системы

На рисунке 3.4.8 приняты следующие обозначения:

$\mathbf{T}^D = [T_{j,n}^D]$ – массив моментов времени убытия заданий на измерения из источника (терминалов пользователей);

$\mathbf{T}^I = [T_{j,n}^I]$ – массив моментов времени помещения заданий в канал обслуживания;

$\mathbf{T}^S = [T_{j,n}^S]$ – массив длительностей выполнения заданий;

$\mathbf{T}^R = [T_{j,n}^R]$ – массив моментов времени «возврата» заданий в источник из канала обслуживания;

$\mathbf{T}^T = [T_{j,n}^T]$ – массив длительностей времени ожидания пользователями результатов выполнения заданий;

$\mathbf{X} = [X_j]$ – массив количеств обслуженных заданий для каждого терминала пользователя; при этом $\overline{j} = \overline{1, N_T}$, $n = \overline{1, X_j}$, где N_T – число терминалов пользователей, X_j – счетчик числа заданий, сформированных с каждого терминала пользователя;

$\overrightarrow{\mathbf{Y}^{тп}}$, $\overrightarrow{\mathbf{Y}^{св}}$, $\overrightarrow{\mathbf{Y}^{оч}}$, $\overrightarrow{\mathbf{Y}^{обсл}}$ – вектора параметров управления формированием времени «размышления» пользователей, управления формированием задержки прохождения данных по каналу связи, управления порядком обработки заданий в очереди и управления формированием времени выполнения заданий соответственно.

Дискретно-событийное имитационное моделирование динамики функционирования МРИУС осуществляется на основе алгоритма с переменным шагом системного времени Δt [181, 187]. Укрупненная блок-схема алгоритма, моделирующего процесс функционирования МРИУС, представлена на рисунке 3.4.9. Рассмотрим основные шаги его работы.

На начальном этапе (блок № 1) вводятся исходные данные, такие как рассматриваемый временной интервал функционирования системы ΔT , число терминалов пользователей N_T , массив заданного числа формируемых заданий для каждого терминала пользователя $\mathbf{X}_0 = [X_{0,j}]$, $\overline{j} = \overline{1, N_T}$, законы распределения случайных величин $\tilde{t}_{разм}$, $\tilde{t}_{св}$, $\tilde{t}_{обсл}$.

В блоке 2 устанавливаются начальные значения внутренних переменных алгоритма. Основные операции по имитации процесса функционирования МРИУС осуществляются в цикле (блоки 3–19). На первой итерации системного времени для каждого из терминалов пользователей (блок 4) вычисляются моменты убытия заданий $T_{j,n}^D$ в соответствии с заданной функцией распределения $R(t)$ (блоки 6, 8). В блоке 8 также при необходимости формируются множества параметров измерения и управления \mathbf{S} , \mathbf{X} (см. рисунок 1.2.1), соответствующие текущему заданию (на блок-схеме алгоритма не приведены).

В блоке 14 для текущего значения системного времени t осуществляется поиск момента времени следующего ближайшего события среди элементов массивов \mathbf{T}^D , \mathbf{T}^I , \mathbf{T}^S и вычисление соответствующего приращения системного времени Δt .

В блоке 19 выполняется приращение системного времени t .

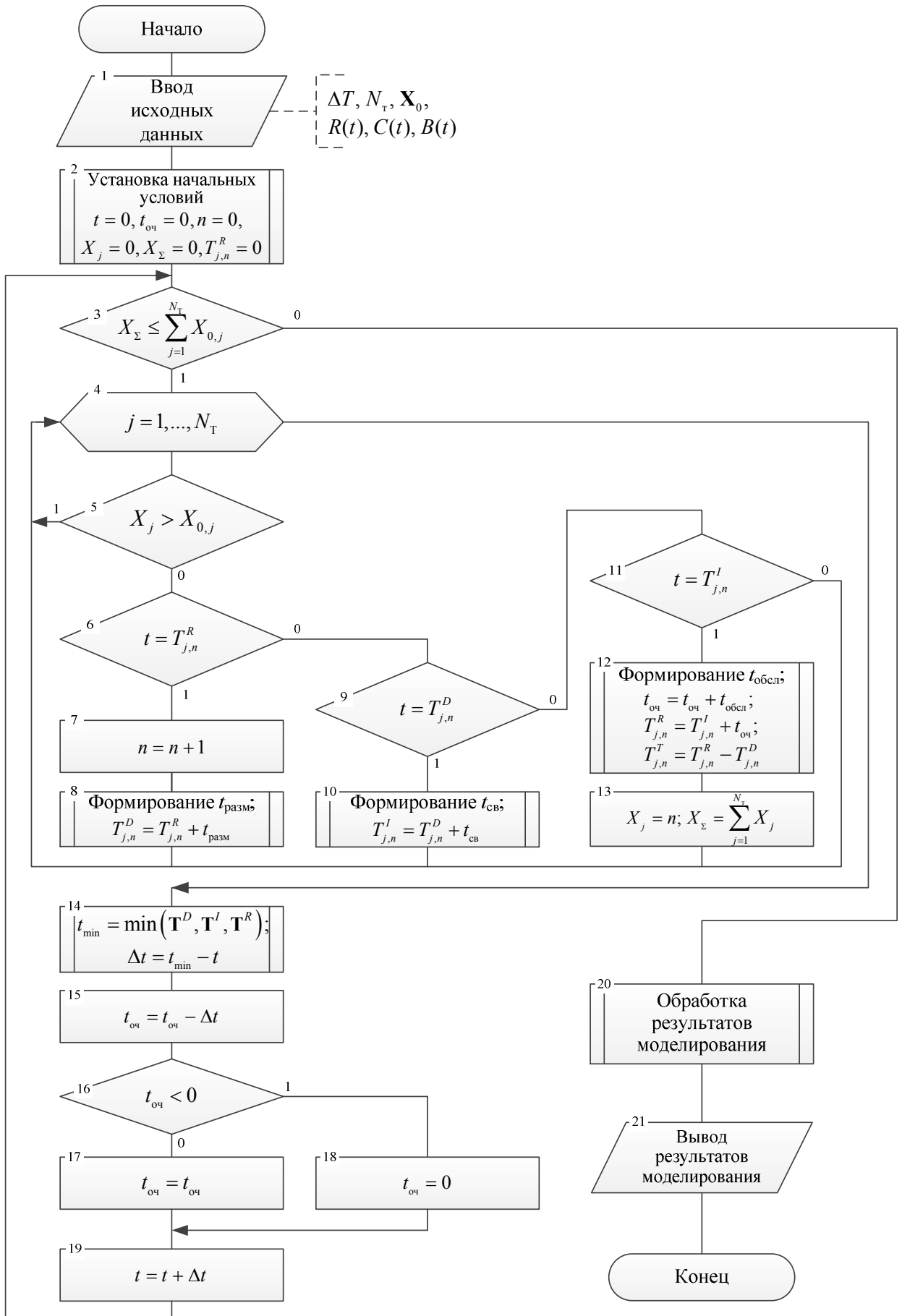


Рисунок 3.4.9 – Блок-схема обобщенного алгоритма имитационного моделирования функционирования МРИУС

При наступлении соответствующего момента времени (блоки 9, 11) выполняется перемещение задания от j -го терминала пользователя из текущей в следующую «фазу»: задержка задания на время $t_{св}$ (блок 10) или обработка задания в канале обслуживания (блок 12).

В блоке 10 осуществляется формирование времени задержки прохождения заданий по каналам связи в соответствии с функцией распределения $C(t)$, полученной на основе обобщенных результатов экспериментальных исследований, рассмотренных в работах [209, 271] (см. рисунок 3.4.2), а также вычисление моментов времени перехода задания в следующую «фазу» $T_{j,n}^I$.

В блоке 12 осуществляется формирование времени выполнения заданий $t_{обсл}$ в соответствии с заданной функцией распределения $B(t)$ или индивидуально заданными распределениями величин $\tilde{t}_{упр}$, $\tilde{t}_{изм}$ (см. п. 3.3) или с учетом сформированного в блоке 8 параметрического и функционального содержания соответствующих заданий. Также в данном блоке выполняется определение моментов времени возврата заданий из канала обслуживания в источник $T_{j,n}^R$ и вычисление значения времени пребывания в очереди $t_{оч}$ для последующих заданий. В блоке 12 используются как статистические гипотезы, так и результаты анализа вида распределения случайной величины $\tilde{t}_{обсл_{v_r}}^{BC}$, полученные на основе методики оценки параметров сценария диалога (см. рисунок 3.3.1, блоки 5, 6, 9).

Операции, выполняемые блоком 12 при нахождении моментов возврата заданий в источник $T_{j,n}^R$, определяются реализуемым алгоритмом диспетчеризации. На рисунке 3.4.9 (блок 12) приведены аналитические выражения для вычисления времени возврата заданий в источник для базового алгоритма диспетчеризации *FIFO*.

Переход задания по «фазам» в процессе моделирования осуществляется до тех пор, пока оно не вернется обратно в источник, далее задание с новым порядковым номером n повторяет циркуляцию по «фазам». Моделирование завершается при окончании обслуживания всех заданий, когда каждый элемент X_j будет равен соответствующему значению $X_{0,j}$ (блоки 3, 13).

Далее осуществляется статистическая обработка накопленных данных о параметрах динамики функционирования МРИУС в процессе выполнения заданий и вывод результатов в виде гистограммы плотности распределения времени ожидания $\tilde{t}_{ож}$ и соответствующих оценок его параметров (блоки 19, 20).

В общем случае законы распределения случайных величин $\tilde{t}_{\text{разм}}$, $\tilde{t}_{\text{св}}$ и $\tilde{t}_{\text{обсл}}$ могут быть заданы для каждого терминала пользователя (или групп терминалов) индивидуально, это выполняется посредством ввода соответствующего объема исходных данных в блоке 1 и их последующего учета при формировании значений случайных величин в блоках 8, 10, 12.

Предложенная математическая модель в отличие от ранее известных дополнительно учитывает структуру аппаратного построения, влияние транспортных задержек прохождения заданий по каналам связи и длительностей функциональных операций, выполняемых компонентами аппаратно-программного обеспечения МРИУС, на динамику ее функционирования, а также обеспечивает возможность представления (установки) в явном виде состава и параметров функциональных операций для циркулирующих в МРИУС заданий (*транзактов*) (блок 8 и 12). Реализация произвольных алгоритмов диспетчеризации, основанных на особенностях выполняемых конфигурационных и измерительных заданий, осуществляется посредством выполнения соответствующих вычислительных операций в блоке 12 (рисунок 3.4.9).

На рисунке 3.4.10 приведены графики зависимостей плотности вероятности $e(t)$ и функции распределения $E(t)$ времени ожидания результатов выполнения заданий от числа терминалов пользователей N_T , полученные на примере исследования функционирования однообъектовой МРУИС в сети Интернет 10 Мбит/с, с показательным распределением интервалов «размышления» пользователей $\lambda = 0,02$, равномерным распределением времени обслуживания заданий со средним значением $\bar{t}_{\text{обсл}} = 2$ с, дисперсией $D(\tilde{t}_{\text{обсл}}) = 0,33$ и алгоритмом диспетчеризации *FIFO*.

Таким образом, в рамках разработанной в диссертационной работе методологии реализуется комплексный подход совместного использования методов аналитического и имитационного моделирования. Применяемые математические модели позволяют выявить взаимосвязи между аппаратно-программным обеспечением проектного решения МРИУС и введенными в главе 1 параметрами оперативности функционирования (выражения (1.2.9) – (1.2.12)).

Выявление общих зависимостей параметров оперативности выполняется на основе аналитических моделей систем массового обслуживания. Имитационная модель имитирует функционирование системы при выявленных или предполагаемых

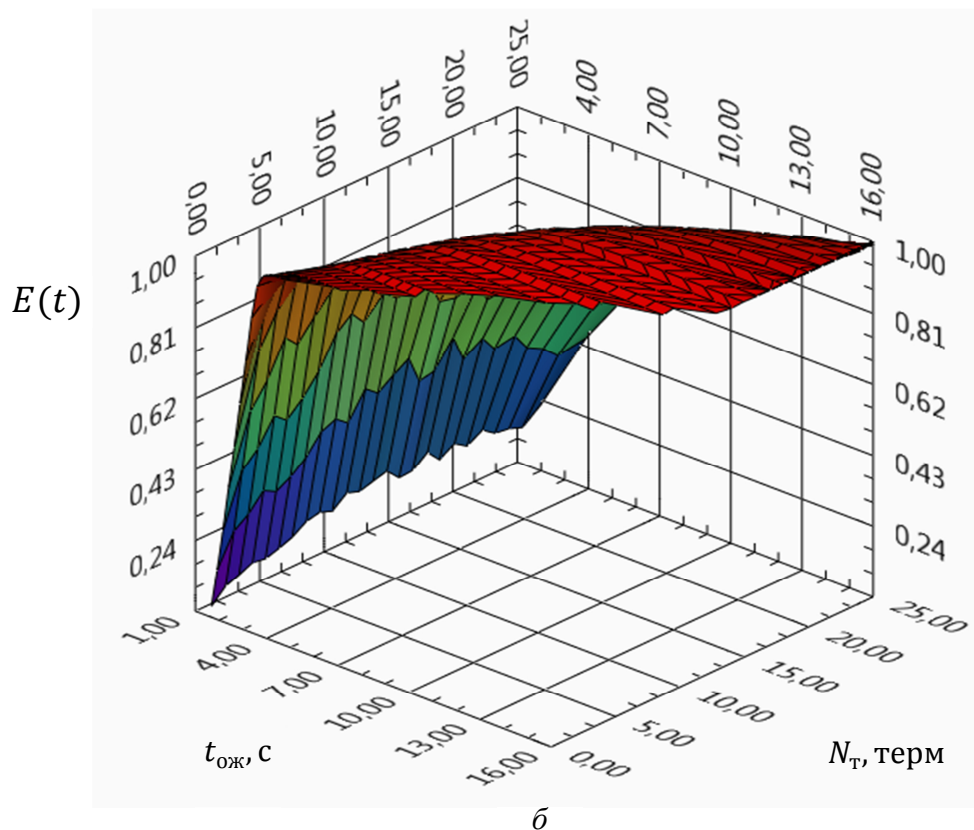
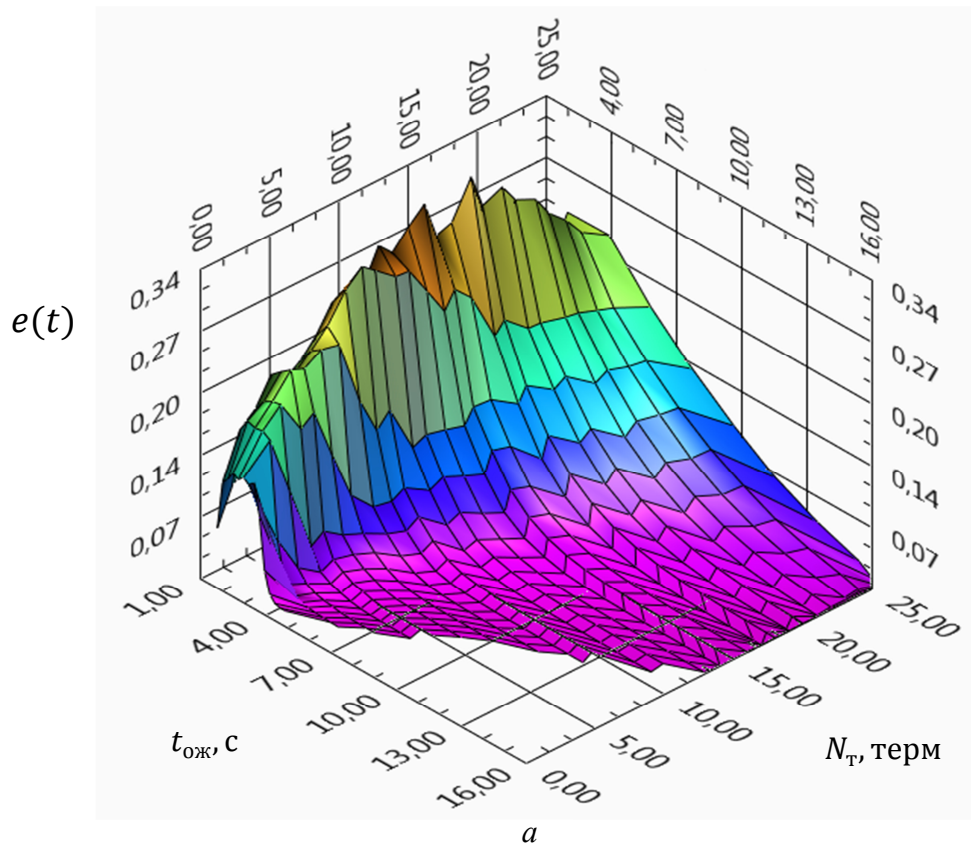


Рисунок 3.4.10 – Графики функции плотности вероятности (а) и функции распределения (б) времени ожидания результатов выполнения заданий от числа терминалов пользователей для МРИУС, функционирующей на основе сети Интернет 10 Мбит/с, полученные средствами имитационного моделирования

статистических закономерностях для входящего потока заданий и времени их обслуживания на основе заданного алгоритма диспетчеризации. Обобщенная схема взаимосвязей предложенного набора базовых структур аппаратного построения (п. 3.1) и применяемых математических моделей динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания приведена на рисунке 3.4.11.

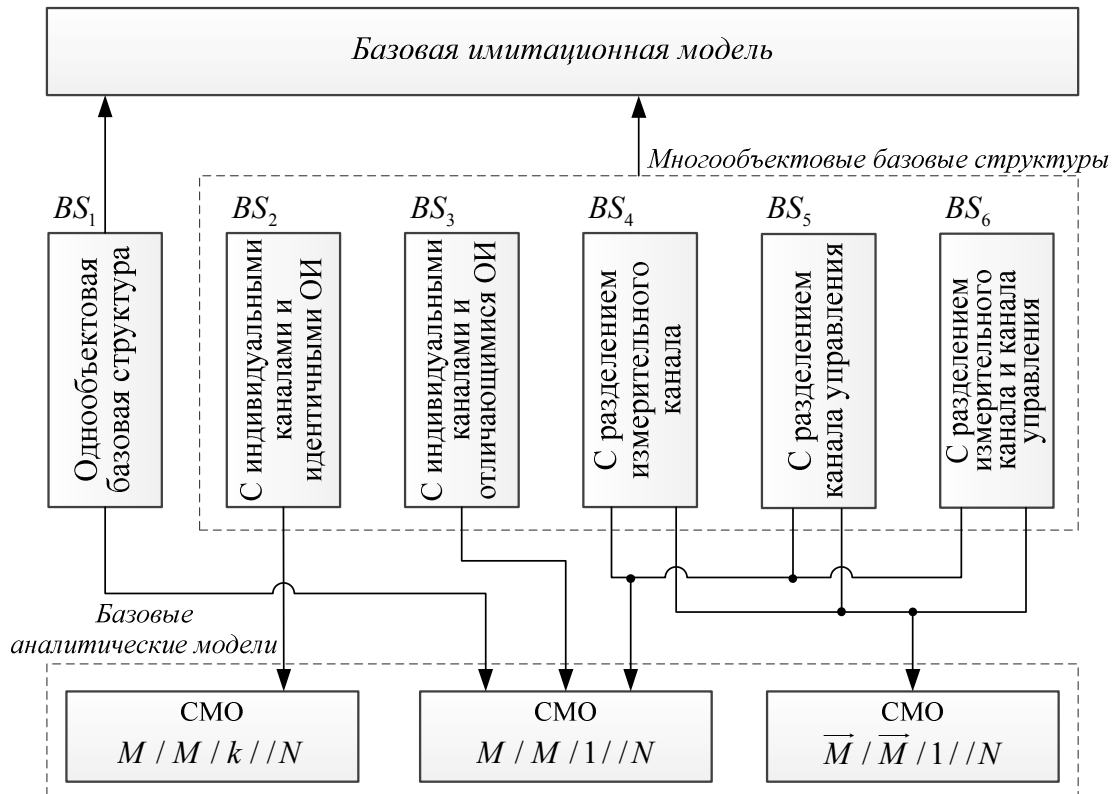


Рисунок 3.4.11 – Схема взаимосвязей базовых структур аппаратного построения МРИУС и базовых математических моделей

Применяемые в процессе создания МРИУС аналитические и имитационная модели, рассмотренные в пунктах 3.4.2, 3.4.3, реализованы в среде графического программирования *LabVIEW* в виде адаптируемых программных модулей, функциональные возможности которых описаны в работах [160, 255, 316–321].

Результаты исследования разработанных методов повышения оперативности функционирования МРИУС средствами математического моделирования на основе предложенной имитационной модели (см. рисунок 3.4.8, 3.4.9) приведены в главе 4. Методика и результаты экспериментальных исследований параметров входящего потока заданий с терминалов пользователей, параметров распределений времени обслуживания и времени ожидания результатов выполнения заданий для ряда разработанных и

созданных промышленных образцов МРИУС рассматриваются в главе 6. Методика формирования граничных значений параметров сценария диалога на основе применяемых математических моделей представлена в следующем параграфе.

3.5 Разработка методики формирования граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС

В рамках разработанной в главе 2 методологии селекция множества альтернативных вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения базовых структур построения МРИУС выполняется на основе сформированных граничных значений параметров сценария диалога. Согласно данному подходу посредством реализации *методики формирования граничных параметров сценария диалога* на основе разработанных базовых моделей динамики функционирования для каждой r -й базовой структуры формируются возможные значения пар параметров $\langle \lambda, \mu \rangle$, соответствующие значению заданного параметра оперативности функционирования МРИУС $p_q^{оп}$. Блок-схема алгоритма разработанной методики представлена на рисунке 3.5.1.

Блок 1. На данном шаге алгоритма осуществляется ввод множества базовых структур аппаратного построения МРИУС, реализуемого алгоритма диспетчеризации, требований к оперативности функционирования МРИУС (выражение 1.2.10), числа терминалов пользователей.

Блок 2. На этом этапе осуществляется перебор вариантов базовых структур МРИУС.

Блок 3. Для текущей анализируемой базовой структуры выполняется выбор и конфигурация соответствующей математической модели динамики функционирования (см. рисунок 3.4.11). Параметры модели устанавливаются на основе выявленных эмпирических видов зависимостей функций распределения случайных величин $\tilde{t}_{св}$ (см. рисунок 3.4.2) и $\tilde{t}_{обсл}$ (п. 3.3) или на основе принятых соответствующих статистических гипотез [151, 181, 186, 293].

Блок 4. На данном шаге рассчитываются графики функциональных зависимостей заданного в исходных данных параметра оперативности $p_q^{оп}$ от переменных λ и μ , для числа терминалов пользователей N_T .

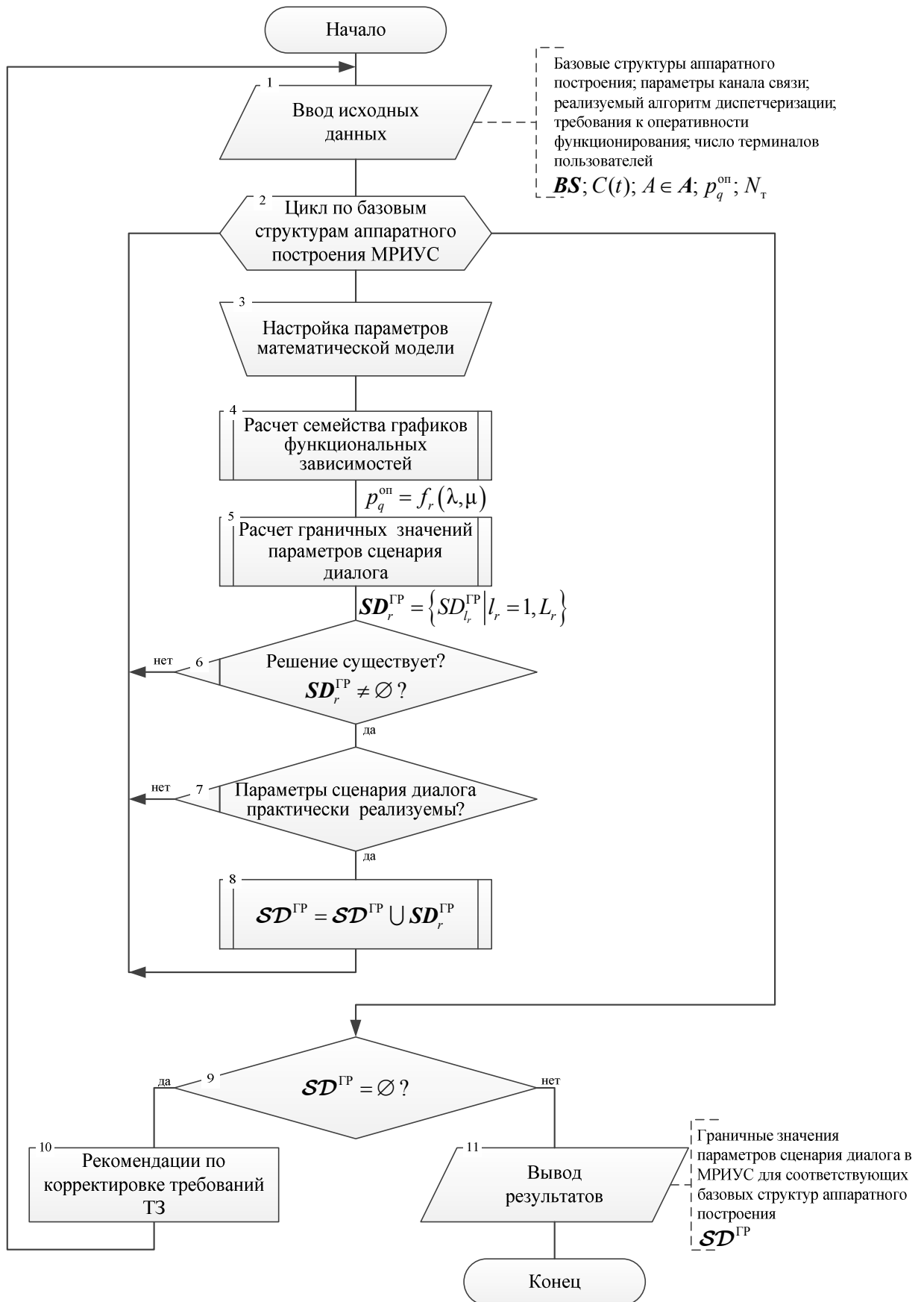


Рисунок 3.5.1 – Блок-схема алгоритма методики формирования граничных значений параметров сценария диалога

Блок 5. На основе полученных средствами математического моделирования зависимостей $p_q^{оп} = f(\lambda, \mu)$ с использованием вычислительных методов [244] выполняется в необходимых пределах расчет значений пар параметров сценария диалога $SD_{l_r}^{ГР} = \langle \lambda, \mu \rangle_{l_r}^{ГР}$, $l_r = 1, L_r^{ГР}$ (см. выражение (2.2.21)), соответствующих значению заданного параметра оперативности.

Блок 6. На данном шаге алгоритма проводится проверка существования значений $SD_{l_r}^{ГР} = \langle \lambda, \mu \rangle_{l_r}^{ГР}$, для которых выполняются заданные требования к оперативности функционирования.

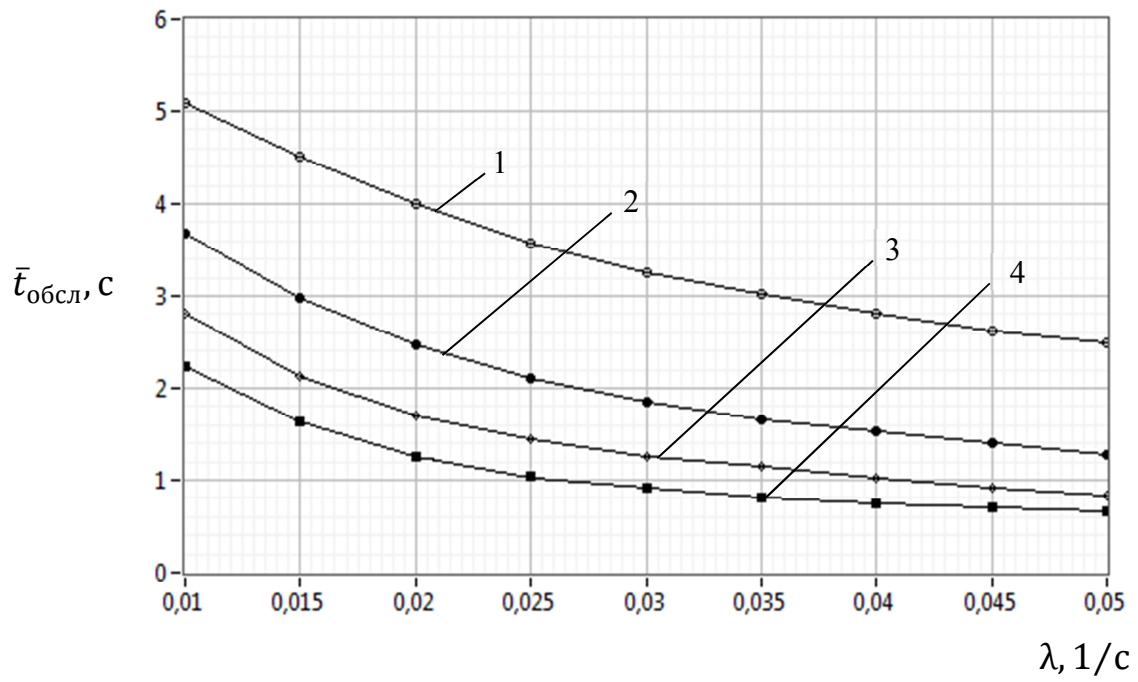
Блок 7. Для существующих значений $SD_r^{ГР} = \{SD_{l_r}^{ГР}\}$, осуществляется их селекция посредством оценки возможности их практической реализуемости на основе анализа имеющейся эмпирической информации (основные характеристики монопольного функционирования аналогов и/или прототипов разрабатываемой МРИУС, сведения о длительностях функциональных операций измерения и пр.) [283, 287, 288 и пр.].

Блок 8. На данном этапе выполняется накопление множеств соответствующих граничных значений параметров сценария диалога в виде общего множества $SD^{ГР}$.

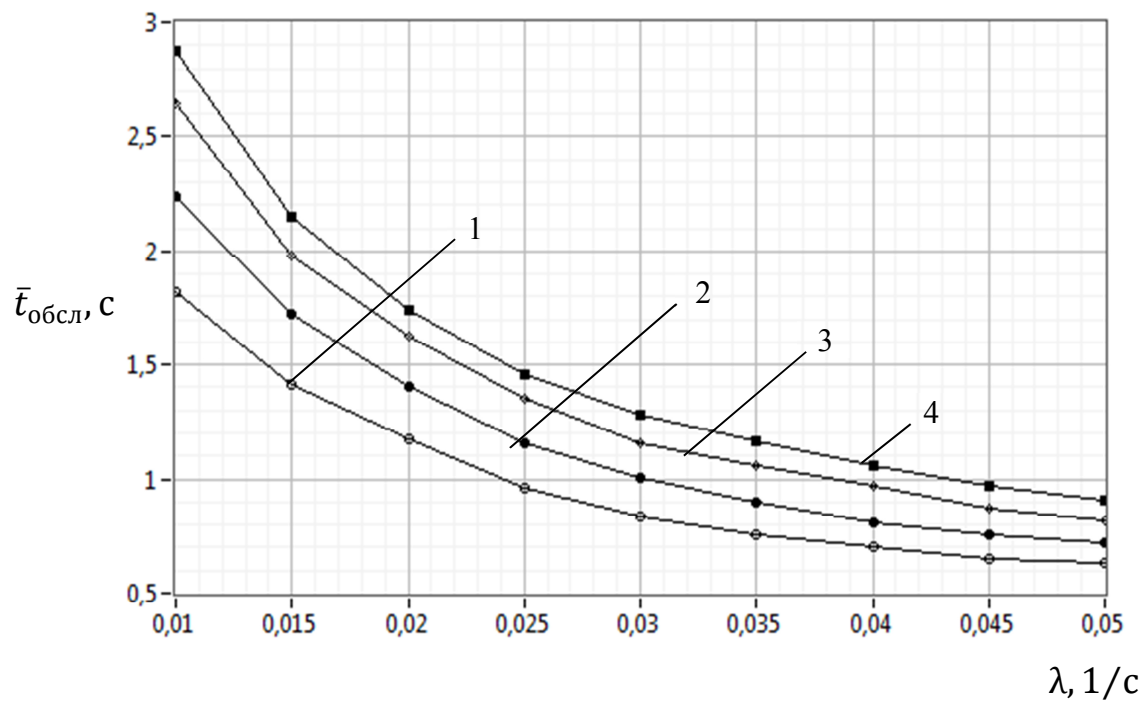
Блок 9. На этом этапе методики осуществляется проверка существования соответствующих граничных значений пар параметров диалога для рассмотренного набора базовых структур **BS** (см. п. 3.1). При отсутствии таковых на шаге 10 алгоритма выполняется выработка рекомендаций по корректировке требований технического задания (снижение требований к оперативности функционирования, сокращение объема решаемых измерительных задач, снижение числа терминалов пользователей и пр.).

Блок 11. На данном шаге алгоритма выполняется вывод сформированных граничных значений параметров сценария диалога для соответствующих базовых структур аппаратного построения МРИУС.

На рисунке 3.5.2 приведены примеры сводных зависимостей требуемого значения среднего времени обслуживания заданий от интенсивности их поступления с каждого терминала пользователя при заданном пороговом значении среднего времени ожидания ($\bar{t}_{ож_пор} = 7$ с) для разных значений числа терминалов пользователей N_T (рисунок 3.5.2, а) и при заданном значении вероятности непревышения порогового значения времени ожидания $P(t_{ож} > t_{ож_пор}) = 0,9$ для различных значений $t_{ож_пор}$ и $N_T = 30$ (рисунок 3.5.2, б).



a



б

Рисунок 3.5.2 – Графики сводных зависимостей $\bar{t}_{\text{обсл}} = f(\lambda)$ для:
 а – $\bar{t}_{\text{ож_пор}} = 7$ с, при: 1 – $N_T = 10$; 2 – $N_T = 20$; 3 – $N_T = 30$; 4 – $N_T = 40$;
 б – $P(t_{\text{ож}} > t_{\text{ож_пор}}) = 0,9$, при: 1 – $t_{\text{ож_пор}} = 5$ с; 2 – $t_{\text{ож_пор}} = 7$ с;
 3 – $t_{\text{ож_пор}} = 10$ с; 4 – $t_{\text{ож_пор}} = 15$ с

Графики, представленные на рисунке 3.5.2, построены на примере гипотез о показательном распределении времени размышления пользователей, логнормальном распределении времени обслуживания с дисперсией $D(\tilde{t}_{\text{обсл}}) = 1$ и получены средствами математического моделирования на основе разработанной в диссертации имитационной модели (см. п. 3.4.3) для МРИУС, функционирующей в ЛВС с пропускной способностью 10 Мбит/с.

Приведенные зависимости формируют требования к граничным параметрам сценария диалога в соответствии с параметрами оперативности МРИУС $\bar{t}_{\text{ож_пор}} = 7$ с (рисунок 3.5.2, а) и $P(t_{\text{ож}} > t_{\text{ож_пор}}) = 0,9$ (рисунок 3.5.2, б). Требования к оперативности функционирования МРИУС, заданные на основе вероятностного критерия определяют более жесткие требования к необходимой длительности функциональных операций, выполняемых компонентами аппаратно-программного обеспечения МРИУС в соответствии с поступающими заданиями.

Применение методики оценки граничных параметров сценария диалога в рамках методики проектирования МРИУС осуществляется итерационно. На первой итерации на основе упрощающих статистических гипотез выполняется оценка достижимости требуемой оперативности функционирования МРИУС для заданного числа терминалов пользователей. Данный подход позволяет исключить из процесса проектирования базовые структуры, для которых заданные требования по оперативности функционирования являются невыполнимыми.

На втором этапе на основе выявленных видов распределения времени обслуживания формируются граничные параметры сценария диалога для селекции альтернативных вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС. Подробно методика проектирования МРИУС рассматривается в главе 5.

3.6 Разработка методики оценки технических характеристик МРИУС

Оценка технических характеристик МРИУС, описываемой ее проектным решением, выполняется на основе разработанных и рассмотренных в параграфе 3.4 математических моделей в комплексе с соответствующими системами автоматизированного проектирования [269].

К техническим характеристикам МРИУС отнесены следующие группы показателей, параметров и характеристик:

- метрологические характеристики каналов;
- параметры оперативности, рассмотренные в пункте 1.2.3;
- показатели использования разделяемого ресурса;
- характеристики конструктивно-технологической реализации;
- показатели надежности.

Метрологические характеристики каналов рассчитываются на основе типовых подходов в рамках методики проектирования аппаратно-программного обеспечения (п. 3.2) при оценке соответствия качественных характеристик решения заданного множества измерительных задач их требуемым значениям (рисунок 3.2.1, блок б). Представленная на рисунке 3.6.1 блок-схема алгоритма методики формализует подход к применению *CAD/CAE*-систем для оценки численных значений технических характеристик МРИУС на основе ее проектного решения, информационная модель которого рассмотрена в параграфе 2.1.

Блок 1. На данном шаге осуществляется ввод описания проектного решения МРИУС $mrius_g$, параметры реализуемого на его основе сценария диалога SD_g и число одновременно работающих терминалов пользователей N_T (см. выражения (2.2.10), (2.2.16), п. 3.3).

Блок 2. С использованием математических моделей динамики функционирования МРИУС (п. 3.4) для заданного числа терминалов пользователей, параметров канала связи и параметров реализуемого сценария диалога осуществляется расчет соответствующих параметров оперативности функционирования МРИУС (см. выражения (3.4.6), (3.4.7), (3.4.9)).

Блок 3. На основе рассчитанного в блоке 2 среднего времени ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{ож}$ на данном этапе методики выполняется оценка основных показателей использования разделяемого ресурса МРИУС, к которым отнесены следующие [28, 162, 167]:

- γ^C – пропускная способность МРИУС. Данный параметр характеризует среднее число заданий, выполняемых в единицу времени, и определяется в соответствии с выражением:

$$\gamma^C = \frac{N_T}{\bar{t}_{разм} + \bar{t}_{ож}}; \quad (3.6.1)$$

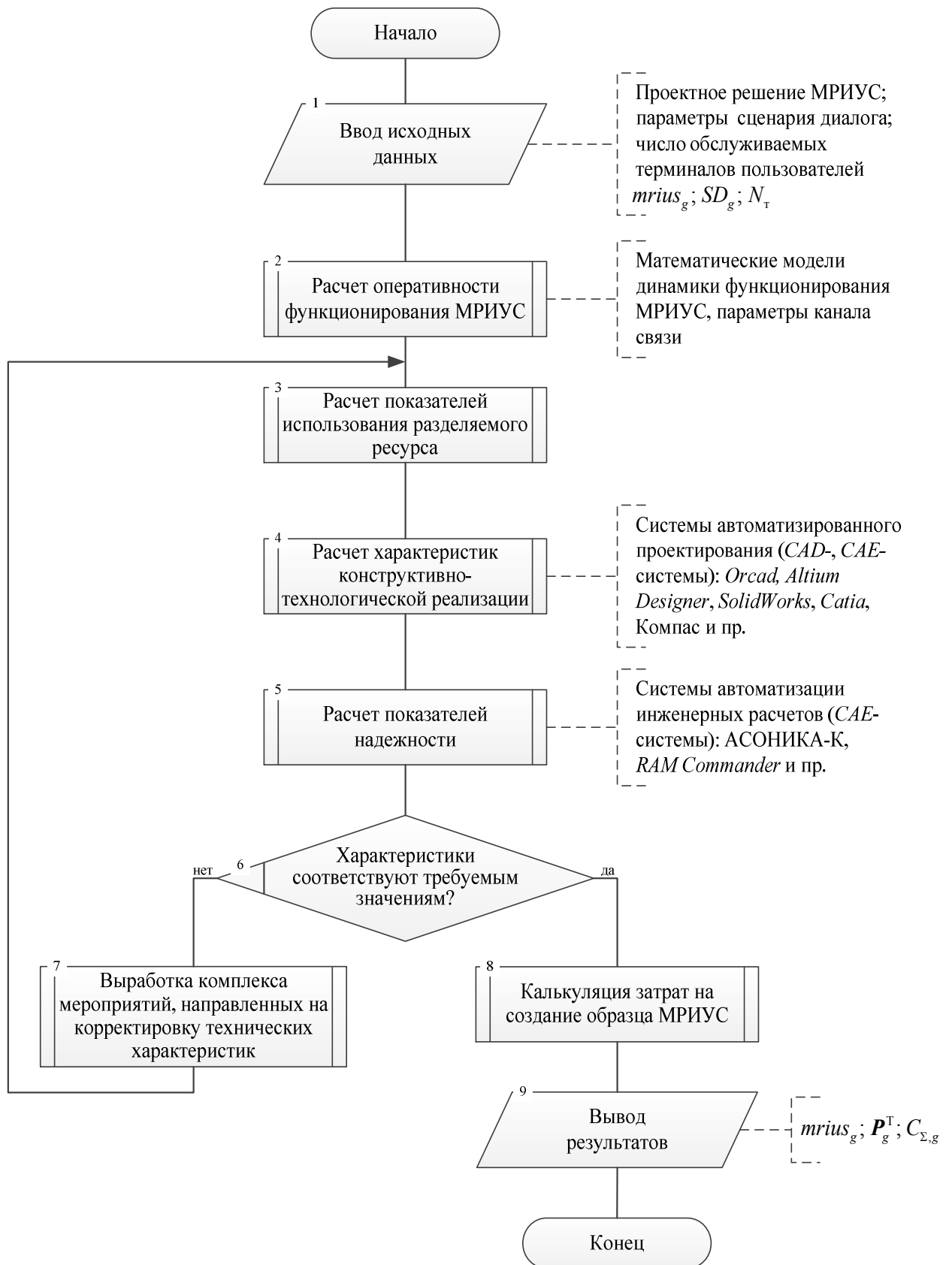


Рисунок 3.6.1 – Укрупненная блок-схема алгоритма методики оценки технических характеристик МРИУС

- U^C – коэффициент использования разделяемого ресурса МРИУС. Определяет долю времени, в течение которого *обслуживающие приборы* (см. рисунки 3.4.3, 3.4.4), входящие в состав МРИУС, заняты выполнением заданий:

$$U^C = \frac{\gamma^C \cdot \bar{t}_{\text{обсл.}}}{k}. \quad (3.6.2)$$

Блок 4. На данном этапе для рассматриваемого проектного решения на основе систем автоматизированного проектирования (*CAD*-, *CAE*-систем) прорабатываются варианты конструктивно-технологической реализации компонентов МРИУС и выполняется оценка их параметров. Проработка вариантов исполнения ведется в том числе с учетом специфики обеспечения ремонтпригодности при круглосуточном непрерывном функционировании МРИУС. На основе геометрических моделей компонентов системы, созданных с использованием *CAD*-систем, определяются массогабаритные характеристики конструктивных блоков системы. В качестве энергетического параметра МРИУС, используется значение потребляемой мощности $P_{\text{потр}}$ которую рассчитывают на основе анализа потребления составных компонентов системы с учетом коэффициента использования *обслуживающих приборов* разделяемого ресурса МРИУС, характеризуемого параметром U^C (выражение (3.6.1)).

Блок 5. На данном шаге алгоритма на основе сведений о надежности составных компонентов и компонентов ПО для рассматриваемого проектного решения МРИУС выполняется расчет надежности в соответствии с известными методами и подходами, рассмотренными, например, в работах [250, 322, 323].

Эксплуатация МРИУС, в соответствии со спецификой выполнения конфигурационных и измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме характеризуется наличием двух чередующихся режимов работы (см. п. 1.2.1):

- *дежурный режим* – ожидание заданий;
- *рабочий режим* – непосредственное выполнение заданий.

В рамках диссертационной работы МРИУС рассматривается как восстанавливаемая система [250]. С учетом эксплуатации МРИУС в круглосуточном непрерывном режиме в качестве показателей надежности используются следующие:

- средняя наработка на отказ:

$$\bar{T}_0 = \frac{1}{\Lambda_{\text{сист}}}, \quad (3.6.3)$$

где $\Lambda_{\text{сист}}$ – суммарная интенсивность отказов системы с учетом условий эксплуатации, режимов работы, резервирования;

- коэффициент готовности – вероятность того, что в произвольный момент времени МРИУС находится в работоспособном состоянии:

$$K_r = \frac{\bar{T}_0}{\bar{T}_0 + \bar{T}_в}, \quad (3.6.4)$$

где $\bar{T}_в$ – среднее время восстановления работоспособности системы (устранения последствий отказа).

Расчет надежности составных компонентов МРИУС выполняется с учетом рассчитанных ранее показателей использования разделяемого ресурса (выражения (3.6.1)–(3.6.2)). Например, через пропускную способность системы γ^c определяется число коммутационных циклов элементов на анализируемом временном интервале функционирования, коэффициент использования разделяемого ресурса U^c характеризует соотношение «дежурного» и «рабочего» режимов в МРИУС [250, 323].

Блок 6. На данном этапе методики выполняется проверка соответствия рассчитанных на предыдущих шагах характеристик конструктивно-технологической реализации и показателей надежности накладываемым на них ограничениям. При несоответствии характеристик разрабатывается комплекс мероприятий, направленных на их повышение (блок 7) [322]:

- замена аппаратных компонентов на компоненты с более высокими показателями надежности;
- введение резервирования компонентов или системы в целом;
- реализация варианта конструктивного исполнения, обеспечивающего возможность оперативной замены вышедшего из строя узла, модуля, устройства в процессе эксплуатации;
- обеспечение рационального состава запасных компонентов (модулей, узлов устройств).

На рисунке 3.6.2 представлен пример проработки конструктивного исполнения опытного образца МРИУС – аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом

«Устройства приема и обработки сигналов» в виде 3D-модели в системе конструкторов стандарта «Евромеханика», обеспечивающий возможность оперативной замены вышедшего из строя аппаратного компонента (модуля).

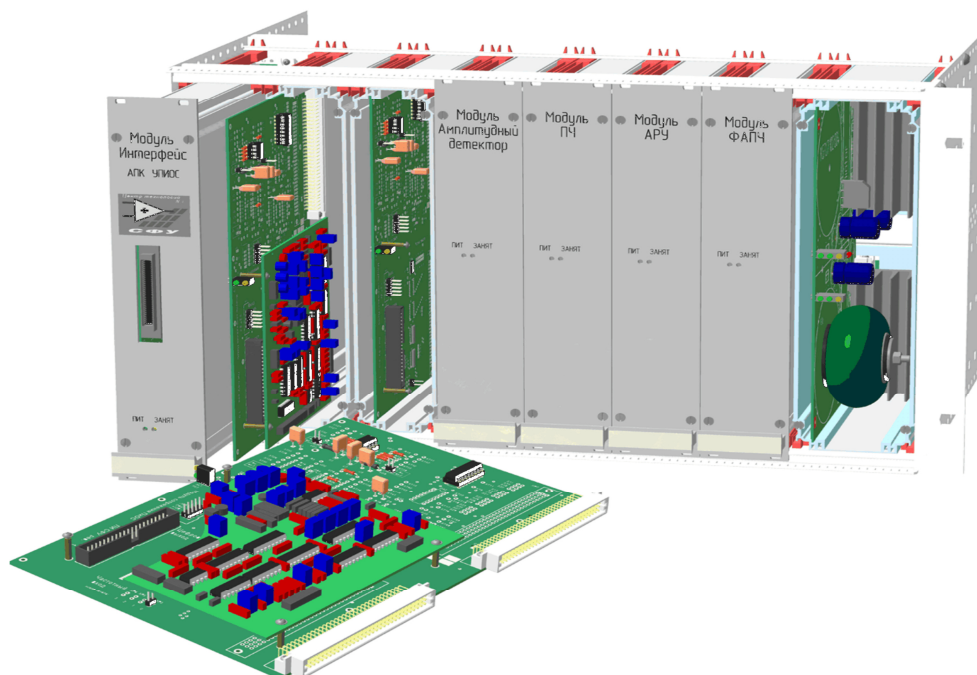


Рисунок 3.6.2 – 3D-модель конструктивного исполнения аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Устройства приема и обработки сигналов»

Блок 8. При соответствии расчетных значений заданным (см. выражения (1.3.5)–(1.3.10)) на данном шаге алгоритма для анализируемого проектного решения $mrius_g$ выполняется калькуляция затрат C_{Σ} на создание образца МРИУС (см. п. 2.3) согласно информационной модели (см. (2.1.29), (2.2.10)).

Блок 9. На данном этапе методики выполняется вывод результатов в виде проектного решения $mrius_g$, массива технических характеристик P_g^T для характеризуемого им образца МРИУС (см. выражение (1.3.5)) и оценки соответствующих затрат $C_{\Sigma,g}$ на реализацию.

3.7 Разработка методики расчета функций параметрической чувствительности

Для оценки степени влияния параметров составных компонентов МРИУС на оперативность ее функционирования в рамках исследований использованы относительные функции параметрической чувствительности (ФПЧ) [250]. Как показано

в параграфе 3.4, в зависимости от используемой базовой структуры построения, алгоритма диспетчеризации, параметров сценария реализуемого диалога и числа терминалов пользователей параметры оперативности МРИУС имеют сложный характер зависимости. В соответствии с этим расчет функций параметрической чувствительности для каждого варианта проектного решения осуществляется методом приращений на основе рассмотренных в параграфе 3.4. математических моделей. Блок-схема алгоритма соответствующей методики приведена на рисунке 3.7.1.

Блок 1. На данном шаге алгоритма осуществляется ввод описания анализируемого проектного решения МРИУС, параметров сценария реализуемого диалога, числа терминалов пользователей, параметра оперативности $p_q^{оп}$, рассматриваемого в качестве выходной характеристики.

Блок 2. На данном шаге на основе исходных данных формируется перечень варьируемых параметров системы, например:

$$\vec{C} = [\bar{t}_{св}, \bar{t}_{рек}, \bar{t}_{изм}, \bar{t}_{разм}, N_T], \quad (3.7.1)$$

и массив их номинальных значений:

$$C = [c_j], j = 1 \dots J, \quad (3.7.2)$$

где J – число варьируемых параметров МРИУС как СМО.

Блок 3. На данном этапе выполняется перебор варьируемых параметров МРИУС.

Блок 4. На текущем шаге алгоритма методики выполняется расчет значений j -го варьируемого параметра системы при отклонении $\pm 5\%$ от номинального [324], для которых впоследствии регистрируются соответствующие вариации параметра оперативности $p_q^{оп}$.

Блок 5. В цикле, определяемом блоком 5, выполняется поочередный расчет выходного параметра оперативности для массива номинальных значений C_i^* , в котором текущий j -й варьируемый параметр принимает одно из значений x_i , рассчитанных в блоке 4 (блок 6).

Блок 7. На этом шаге выполняется расчет значений параметра оперативности МРИУС $p_q^{оп}$ на основе одной из приведенных в параграфе 3.4 математических моделей, соответствующей базовой структуре рассматриваемого проектного решения (см. рисунок 3.4.11).

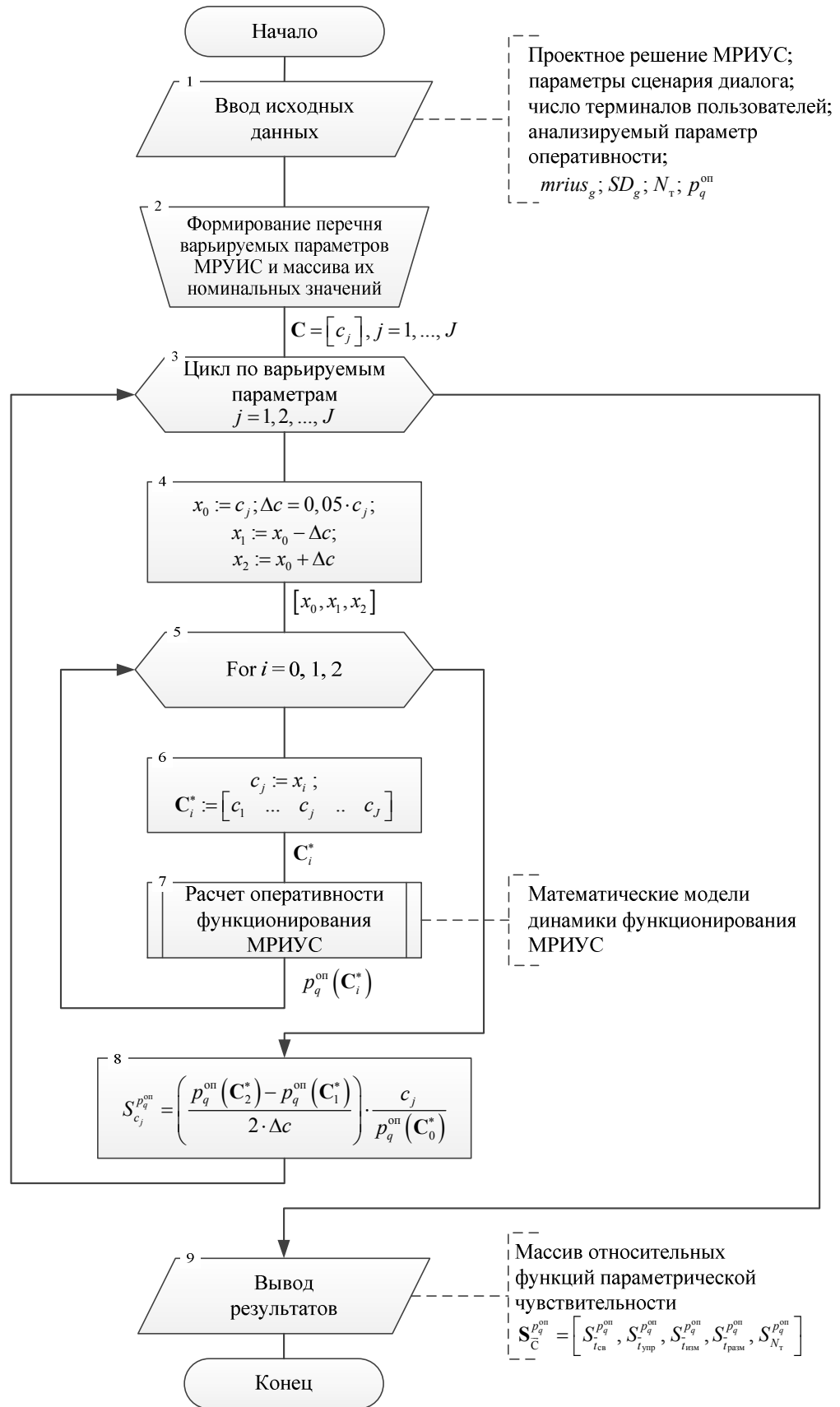


Рисунок 3.7.1 – Блок-схема алгоритма методики расчета относительных функций параметрической чувствительности параметров оперативности функционирования МРУИС

Блок 8. На данном этапе осуществляется расчет численного значения относительной функции параметрической чувствительности для анализируемого параметра оперативности МРИУС $p_q^{\text{оп}}$ от текущего j -го варьируемого параметра.

Блок 9. На заключительном шаге выполняется вывод рассчитанных значений относительных ФПЧ для заданного перечня варьируемых параметров (выражение (3.7.1)):

$$\mathbf{S}_{\vec{c}}^{p_q^{\text{оп}}} = [S_{\bar{t}_{\text{св}}}^{p_q^{\text{оп}}}, S_{\bar{t}_{\text{рек}}}^{p_q^{\text{оп}}}, S_{\bar{t}_{\text{изм}}}^{p_q^{\text{оп}}}, S_{\lambda}^{p_q^{\text{оп}}}, S_{N_T}^{p_q^{\text{оп}}}] \quad (3.7.3)$$

Для выделенных параметров оперативности функционирования (выражения (3.4.6), (3.4.7), (3.4.9)) рассмотренные относительные ФПЧ $\mathbf{S}_{\vec{c}}^{p_q^{\text{оп}}}$ используются в процессе разработки в качестве критериев принятия решения о результативности применения в том числе разработанных в диссертации методов повышения оперативности МРИУС, которые рассматриваются в следующей главе.

3.8 Выводы по главе 3

1. На основе исследования, анализа, обобщения и систематизации существующего опыта создания МРИУС предложена классификация применяемых структур их аппаратного построения, учитывающая количество и номенклатуру входящих в состав объектов управления и контроля, а также применение внутреннего разделения каналов. Разработан набор базовых структур аппаратного построения МРИУС, для каждой из выделенных структур рассмотрены ее функциональные особенности.

2. Предложенный набор вошел в состав разработанной методологии в качестве вариантов технических решений для задачи структурного синтеза аппаратного обеспечения. Критерии выбора соответствующей базовой структуры представлены в виде укрупнённого дерева принятия решений.

3. Разработаны и реализованы в виде адаптируемых программных модулей математические модели динамики функционирования МРИУС как СМО. Разработана базовая имитационная модель, которая представлена ее обобщенной структурной схемой, блок-схемой алгоритма моделирования.

4. Предложенная имитационная модель характеризуется дополнительными исследовательскими возможностями и отличается от известных тем, что дополнительно

учитывает структуру аппаратного построения, длительности операций, выполняемых основными функциональными узлами, и их зависимость от параметрического и функционального содержания выполняемых заданий, задержку прохождения заданий по сети, вариативность реализуемых алгоритмов диспетчеризации, а также гетерогенность поведения и обслуживания пользователей.

5. Представлены в виде обобщенной схемы логические взаимосвязи между соответствующими базовыми структурами аппаратного построения и применяемыми в рамках исследований математическими моделями.

6. Разработано методическое обеспечение для ряда этапов процесса разработки МРИУС: методика проектирования аппаратно-программного обеспечения, методика оценки параметров сценария диалога, методика формирования граничных значений параметров сценария диалога, методика оценки технических характеристик и методика расчета функций параметрической чувствительности для параметров оперативности функционирования. Данные частные методики, представленные блок-схемами их алгоритмов, обобщают и систематизируют применяемые при разработке МРИУС подходы, ориентированы на выделенную специфику процесса их функционирования.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ОПЕРАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МРИУС

В целях решения задачи повышения технического уровня синтезируемых проектных решений МРИУС в состав предложенной методологии проектирования (см. рисунок 2.5.1) вошел ряд новых методов, разработанных в рамках диссертационной работы. Разработанные методы базируются в том числе на подходах применяемых в смежных областях [25, 164], и обеспечивают повышение технического уровня МРИУС (см. выражение (2.3.10)) посредством улучшения оперативности функционирования и, как следствие, обеспечения возможности увеличения числа обслуживаемых терминалов пользователей.

Разработанные в диссертации методы при формировании последовательности обработки заданий в качестве исходных данных используют информацию о длительностях соответствующих функциональных операций управления и измерения. Метод накопления апостериорной информации о соответствии длительностей функциональных операций установленным значениям параметров в заданиях, которые формируются на терминалах пользователей (см. рисунок 1.2.1), рассматривается в параграфе 4.1. Соответствующие методы повышения оперативности и примеры реализующих их алгоритмов диспетчеризации представлены в параграфах 4.2–4.4. В параграфе 4.5 предложен обобщенный подход анализа эффективности применения разработанных методов с точки зрения их влияния на технический уровень МРИУС.

4.1 Метод накопления апостериорной информации о длительностях функциональных операций

Рассматриваемые в последующих параграфах методы повышения оперативности функционирования МРИУС базируются на сведениях о длительностях выполняемых функциональных операций и их зависимостях от значений соответствующих параметров управления (S) и измерения (X), установленных в формируемых пользователями заданиях REQ (см. выражения (3.2.1)–(3.2.4)). Обобщенные оценки длительностей соответствующих функциональных операций могут быть получены на основе методики оценки параметров сценария диалога, приведенной в параграфе 3.3. Однако в ряде случаев формирование полного массива информации о соответствующих

длительностях на этапе разработки проектных решений МРИУС связано с высокой трудоемкостью и большим объемом обрабатываемых данных. Например, в рамках решения одной измерительной задачи (см. выражение (3.3.1)) для трех управляемых параметров, каждый из которых может принимать по 8 возможных значений ($x_h = 8$, $h = \overline{1,3}$), число возможных заданий $X_{\text{доп}}$ и соответствующих им длительностей функциональных операций равно [260]

$$X_{\text{доп}} = \prod_{i=1}^h x_i = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = 512. \quad (4.1.1)$$

При этом для функциональных операций, длительность выполнения которых зависит, например, от текущего состояния соответствующих каналов, состояния объекта управления и контроля (см. рисунок 3.3.2), число вариантов длительностей функциональных операций (выражение (4.1.1)), дополнительно увеличивается в $(X_{\text{доп}} - 1)$ раз.

Для решения обозначенной проблемы в рамках исследований разработан подход сбора необходимой информации в процессе функционирования системы на основе дополнения программного комплекса измерения и управления МРИУС (см. рисунок 1.2.1) специализированным *программным модулем измерения и накопления данных* о длительностях выполняемых функциональных операций. Данный метод применяется в МРИУС, для которых на этапе их разработки в рамках методики оценки параметров реализуемого сценария диалога (п. 3.3) выявление полного объема соответствующих данных было технически затруднено и/или нецелесообразно. Обобщенная структурная схема МРИУС, реализующей предложенный подход, приведена на рисунке 4.1.1.

Дополнительно введенный специализированный программный модуль обеспечивает измерение длительностей соответствующих функциональных операций (см. выражение (3.4.1)) на основе фиксации моментов времени начала и конца их выполнения в рамках текущего обрабатываемого задания пользователя (см. рисунок 3.4.1). Для ранее не обрабатываемых заданий установленные значения параметров управления (\mathbf{S}), параметров измерения (\mathbf{X}) и соответствующие им измеренные длительности функциональных операций вносятся в массив данных (рисунок 4.1.1).

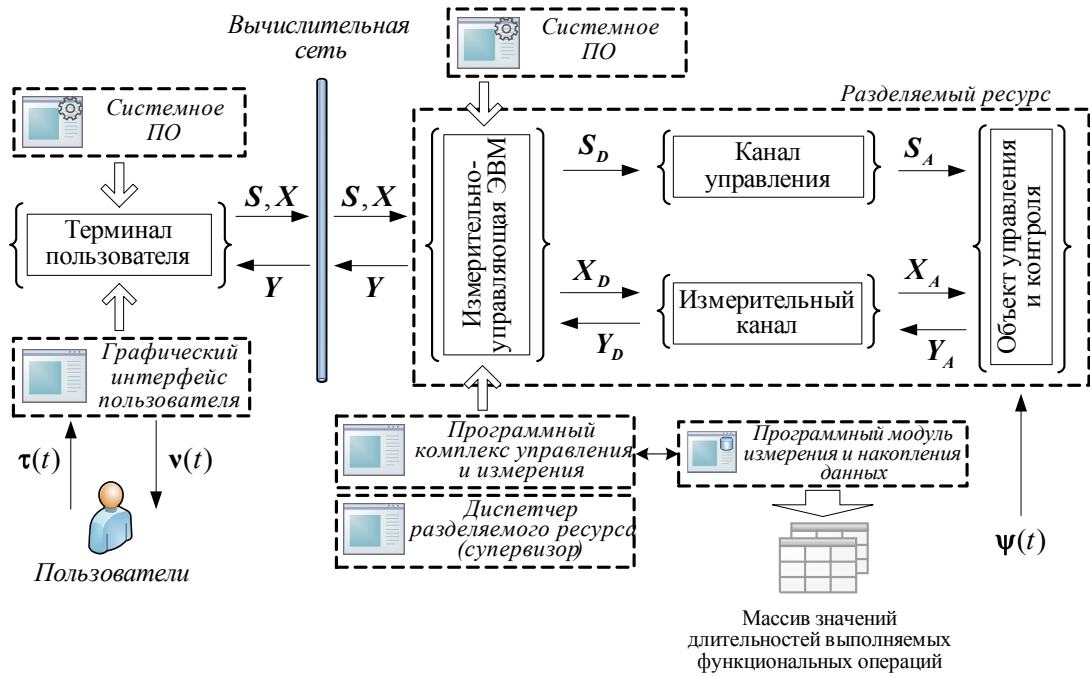


Рисунок 4.1.1 – Обобщенная структурная схема МРИУС, реализующей сбор и накопление апостериорной информации о длительностях функциональных операций, выполняемых в соответствии с поступающими заданиями пользователей

Таким образом, в процессе эксплуатации МРИУС по ее целевому назначению выполняется постепенное фоновое накопление необходимого объема данных о длительностях функциональных операций и их соответствии параметрам, установленным в заданиях [325].

4.2 Метод оптимизации операций управления

4.2.1 Описание метода оптимизации операций управления

Рассмотрим МРИУС, реализованную на основе однообъектовой базовой структуры (рисунок 3.1.2). Каждое задание, формируемое на терминалах пользователя содержит в своем составе множество параметров конфигурации ОУиК – S и множество измеряемых параметров и характеристик ОУиК – X (см. рисунок 1.2.1). В рамках рассмотрения метода предположим, что выполняется соотношение $\bar{t}_{св} \ll \bar{t}_{обсл}$. Таким образом, среднее время ожидания результатов выполнения заданий в МРИУС (выражение (3.4.3)), без учета транспортной задержки может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{t}_{\text{ож}} &= \bar{t}_{\text{оч}} + \bar{t}_{\text{обсл}} = q \cdot \bar{t}_{\text{обсл}} + \bar{t}_{\text{обсл}} = \bar{t}_{\text{обсл}} \cdot (q + 1) = \\ &= \bar{t}_{\text{упр}} \cdot (q + 1) + \bar{t}_{\text{изм}} \cdot (q + 1),\end{aligned}\quad (4.2.1)$$

где $\bar{t}_{\text{оч}}$ – среднее время пребывания заданий в очереди, организуемой диспетчером разделяемого ресурса; $\bar{t}_{\text{обсл}}$ – среднее время выполнения заданий; q – среднее число заданий в очереди в произвольный момент времени; $\bar{t}_{\text{упр}}$ – среднее время выполнения операции управления (изменения конфигурации и/или состояния ОУиК в МРИУС); $\bar{t}_{\text{изм}}$ – среднее время измерения параметров и характеристик ОУиК.

Предположим, что на ОУиК подается одно управляемое воздействие \vec{S} . Максимально возможное число устанавливаемых значений управляемого воздействия \vec{S} зависит от варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС и реализуемого на его основе сценария диалога (см. п. 3.2, 3.3).

Для каждого из q заданий, находящихся в произвольный момент времени в очереди на измерительно-управляющей ЭВМ, обозначим переменной ST_i состояние ОУиК, определяемое соответствующим значением управляющего воздействия \vec{S} , где i – порядковый номер поступления задания в очередь, $i = 1, 2, \dots, q$. Переменной ST_0 обозначим состояние ОУиК на начало обработки имеющихся заданий в очереди, формируемой диспетчером разделяемого ресурса (см. рисунок 1.2.1).

Длительность операции управления, необходимой для перестройки ОУиК из состояния ST_i в состояние ST_j , обозначим переменной $t_{i,j}$, где $j = 1, 2, \dots, q$.

Рассмотрим матрицу $\mathbf{T}^{\text{УПР}}$ длительностей функциональных операций управления, необходимых для перестройки объекта управления и контроля в МРИУС по состояниям ST_i для q имеющихся в очереди заданий, в ячейках которой расположим времена $t_{i,j}$.

Соответствующая матрица, дополненная длительностями операций управления из текущего состояния ST_0 , приведена на рисунке 4.2.1.

В общем случае для функциональных операций управления, длительность которых зависит от текущего состояния ОУиК на начало выполнения нового задания, их длительности для «перевода» ОУиК из состояния ST_i в ST_j и из ST_j в ST_i отличаются. Данный факт может быть обусловлен, например, аппаратными особенностями реализации процесса нагрева и охлаждения ЭРИ, установленного на радиаторе, особенностями процесса управления коммутацией электронных/электромеханических

	ST_0	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	...	ST_q
ST_0	0	$t_{0,1}$	$t_{0,2}$	$t_{0,3}$	$t_{0,4}$	...	$t_{0,q}$
ST_1	$t_{1,0}$	0	$t_{1,2}$	$t_{1,3}$	$t_{1,4}$	...	$t_{1,q}$
ST_2	$t_{2,0}$	$t_{2,1}$	0	$t_{2,3}$	$t_{2,4}$	...	$t_{2,q}$
ST_3	$t_{3,0}$	$t_{3,1}$	$t_{3,2}$	0	$t_{3,4}$	...	$t_{3,q}$
ST_4	$t_{4,0}$	$t_{4,1}$	$t_{4,2}$	$t_{4,3}$	0	...	$t_{4,q}$
...	...	...	...	...	...	0	...
ST_q	$t_{q,0}$	$t_{q,1}$	$t_{q,2}$	$t_{q,3}$	$t_{q,4}$	...	0

Рисунок 4.2.1 – Матрица длительностей функциональных операций управления, выполняемых в целях «перевода» ОУиК по состояниям ST_i

	ST_0	ST_1	ST_2	ST_3	ST_4	ST_5
ST_0	0	$t_{0,1}$	$t_{0,2}$	$t_{0,3}$	$t_{0,4}$	$t_{0,5}$
ST_1	$t_{1,0}$	0	$t_{1,2}$	$t_{1,3}$	$t_{1,4}$	$t_{1,5}$
ST_2	$t_{2,0}$	$t_{2,1}$	0	$t_{2,3}$	$t_{2,4}$	$t_{2,5}$
ST_3	$t_{3,0}$	$t_{3,1}$	$t_{3,2}$	0	$t_{3,4}$	$t_{3,5}$
ST_4	$t_{4,0}$	$t_{4,1}$	$t_{4,2}$	$t_{4,3}$	0	$t_{4,5}$
ST_5	$t_{5,0}$	$t_{5,1}$	$t_{5,2}$	$t_{5,3}$	$t_{5,4}$	0

Рисунок 4.2.2 – Некоторые варианты маршрутов перевода ОУиК по состояниям, определяемых текущими заданиями в очереди ($q = 5$), которые соответствуют последовательностям обработки заданий, отличным от *FIFO*:

— — маршрут $ST_0, ST_1, ST_3, ST_2, ST_4, ST_5$

(последовательность обработки заданий $i^* = 1,3,2,4,5$);

---- маршрут $ST_0, ST_5, ST_4, ST_1, ST_2, ST_3$

(последовательность обработки заданий $i^{**} = 5,4,1,2,3$)

ключей и т.п. Таким образом, приведенная на рисунке 4.2.1 матрица является *несимметричной*.

На рисунке 4.2.1 в виде стрелок, связывающих соответствующие времена управления, представлена последовательность выполнения операций управления ОУиК для базового алгоритма диспетчеризации *FIFO* (см. п. 1.2.1). Общее время, затрачиваемое на выполнение операций управления для имеющихся заданий в очереди при их обслуживании в порядке поступления, определяется согласно следующему выражению:

$$t_{\Sigma\text{упр}} = \sum_{i=0}^{q-1} t_{i,i+1}. \quad (4.2.2)$$

Однако обязательному условию начала «перевода» ОУиК из состояния ST_0 по всем состояниям ST_i , определяемых находящимися в очереди заданиями, соответствует $q!$ возможных вариантов последовательностей обработки заданий. На рисунке 4.2.2 в качестве примера приведены некоторые варианты *маршрутов перевода* ОУиК по состояниям ST_i , соответствующих последовательностям обработки заданий в очереди, отличных от *FIFO*, для $q = 5$.

В общем виде выражение для суммарного времени, затрачиваемого на выполнение операций управления в соответствии с q имеющимися заданиями в очереди, в соответствии с представленной на рисунке 4.2.1 матрицей длительностей, может быть записано следующим образом:

$$\begin{cases} t_{\Sigma\text{упр}} = \sum_{i=0}^{q-1} \sum_{j=1}^q t_{i,j} \cdot x_{i,j}, \\ i \neq j \end{cases} \quad (4.2.3)$$

где $x_{i,j}$ – переменная, ассоциированная с переводом ОУиК из состояния ST_i в состояние ST_j , при этом $x_{i,j} = 1$, если при текущей последовательности обработки заданий данный переход между состояниями ОУиК выполняется, и $x_{i,j} = 0$, если нет. При следующем ограничении [326]:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^q x_{i,j} = 1, i = 1, 2, \dots, q; \\ \sum_{j=0}^q x_{i,j} = 1, j = 1, 2, \dots, q. \end{cases} \quad (4.2.4)$$

Предлагаемый метод заключается в поиске такой последовательности обработки заданий, реализуемой диспетчером разделяемого ресурса, при которой суммарное время, затрачиваемое на выполнение операций управления для заданий в очереди, является минимальным [327, 328]:

$$t_{\Sigma \text{упр}} \rightarrow \min, \quad (4.2.5)$$

при этом искомая последовательность является *гамильтоновым путем* для графа с вершинами в виде состояний ST_i [329].

При выполнении очереди заданий в соответствии с порядком, удовлетворяющим критерию (4.2.5), достигается минимизация перекрестных дублирующих функциональных операций управления состоянием объекта управления и контроля и, как следствие, сокращение времени обслуживания заданий (выражение (4.2.1)). Сокращение времени обслуживания заданий при реализации предлагаемого метода объясняется тем, что промежуточные состояния, получающиеся в процессе изменения состояния ОУиК при выполнении заданий в порядке их поступления, могут соответствовать или быть близкими к состояниям, определяемым другими заданиями, находящимися в очереди: например, управление изменением теплового режима работы объекта или его функциональных узлов (элементов), управление движением двухкоординатного столика электронного микроскопа, коммутация реле и пр. (см. рисунки 1.1.10, 3.3.2).

Задачу поиска последовательности обработки заданий в очереди в соответствии с критерием, заданным выражением (4.2.5), необходимо выполнять при каждом поступлении в очередь диспетчера разделяемого ресурса нового задания. Это обусловлено тем, что значения s_m , описывающие управляемое воздействие \vec{S} для заданий, поступающих на измерительно-управляющую ЭВМ, и текущее состояние ОУиК – ST_0 , в произвольный момент времени в общем случае являются случайными величинами.

В рамках рассмотренного подхода сформулированная задача поиска последовательности обработки заданий, находящихся в очереди диспетчера разделяемого ресурса на основе соответствующей матрицы длительной функциональных операций управления (выражения (4.2.3)–(4.2.5)), фактически приведена к незамкнутому варианту несимметричной задачи бродячего торговца (*asymmetric traveling salesman problem – aTSP*) [326–330]. Применительно к МРИУС в рамках решения данной задачи диспетчеру разделяемого ресурса необходимо «обойти» все состояния объекта управления и контроля, определяемые содержанием находящихся в очереди заданий, по кратчайшему пути с обязательным условием начала из текущего состояния ST_0 без возврата в него. При этом под путем подразумевается суммарное время, затрачиваемое на выполнение функциональных операций управления (выражение (4.2.3)), а «расстояния» между состояниями объекта управления и контроля определяются соответствующей матрицей длительностей (см. рисунок 4.2.1).

Для МРИУС, реализованной на основе многообъектовой базовой структуры с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК (см. рисунок 3.1.3), поиск последовательности обработки заданий в соответствии с предложенным методом обобщается как задача нескольких бродячих торговцев (*multiple traveling salesman problem – mTSP*), для решения которой также существует множество известных алгоритмов, например рассмотренные в [332, 333].

Для решения сформулированной задачи поиска последовательности обработки заданий (выражения (4.2.3)–(4.2.5)) в соответствии со сформулированным критерием (выражение (4.2.5)) данные о длительностях соответствующих операций управления могут быть получены в процессе функционирования МРИУС посредством применения подхода, описанного в параграфе 4.1.

Алгоритм диспетчеризации, реализующий предложенный метод на примере «жадного» алгоритма решения задачи минимизации операций управления совместно с фоновым накоплением апостериорной информации о длительностях функциональных операций на основе рассмотренного в параграфе 4.1 подхода, приведен на рисунке 4.2.3.

Блок 1. На первоначальном этапе вводится имеющаяся в наличии информация о длительностях функциональных операций управления в виде элементов массива $\mathbf{T}^c = [t_{k,l}^c]$; $k, l = 1, 2, \dots, M^c$, где M^c – число возможных сочетаний устанавливаемых

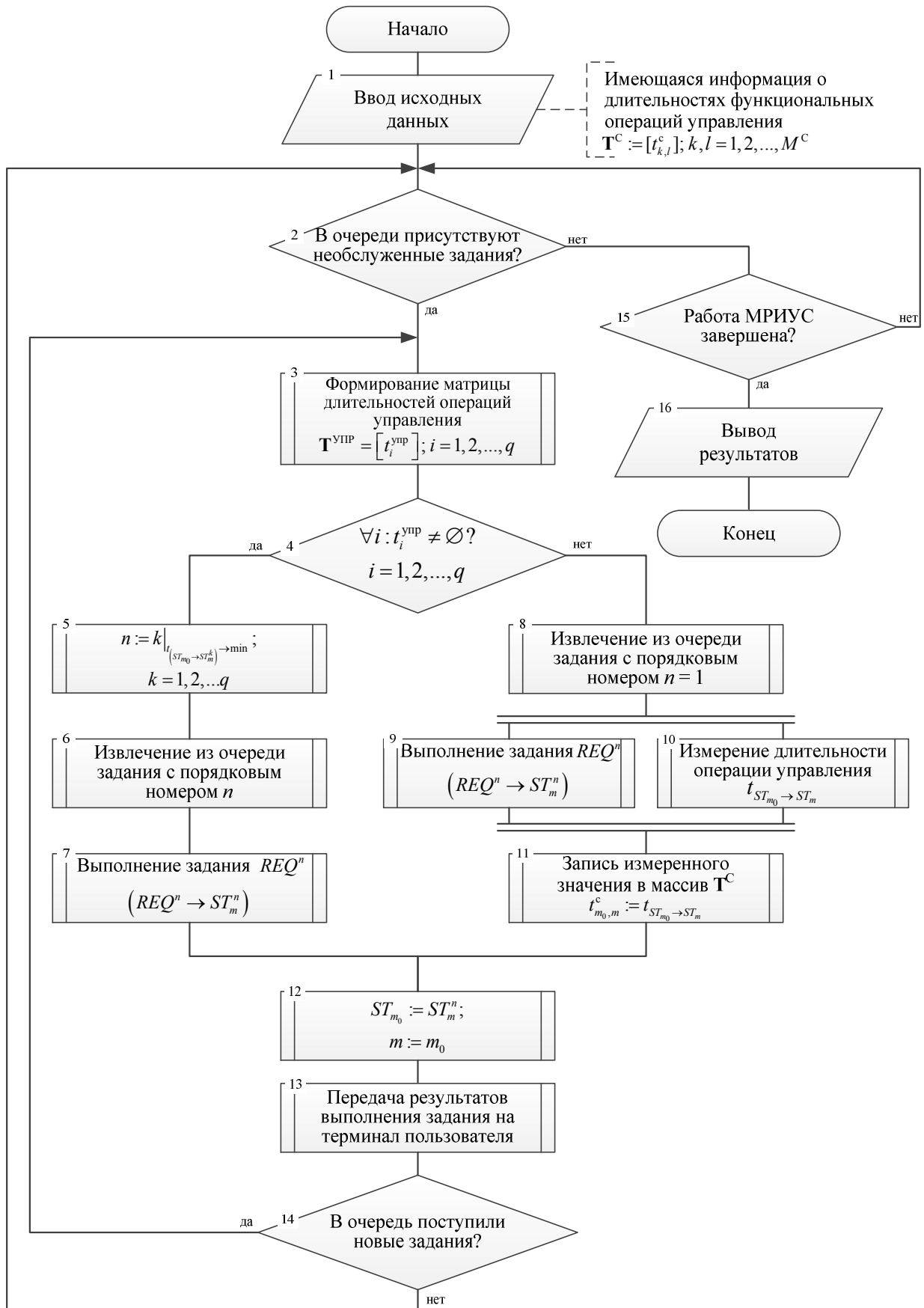


Рисунок 4.2.3 – Блок-схема алгоритма работы диспетчера разделяемого ресурса, реализующего метод оптимизации операций управления

значений параметров конфигурации на терминалах пользователей (см. выражение (4.1.1)), определяющее число возможных состояний ОУиК. Данная информация может быть получена на основе разработанных методики (см. п. 3.3) или метода (см. рисунок 4.1.1). Незвестным элементам массива, например, присваивается значение " \emptyset ".

В рамках рассматриваемого алгоритма обозначим переменной ST_m состояние объекта управления и контроля, где m – индекс возможного состояния ОУиК, определяемого соответствующими сочетаниями значений параметров управления. В начале работы объект управления и контроля МРИУС находится в исходном состоянии ST_{m_0} , при этом $1 \leq m_0 \leq M^C$.

Блок 2. На данном этапе выполняется опрос текущего состояния очереди заданий.

Блок 3. При наличии в очереди диспетчера разделяемого ресурса заданий (например, $REQ^1, REQ^2, \dots, REQ^q$, где q – число заданий в очереди) в блоке 3 выполняется формирование соответствующего массива длительностей функциональных операций управления $\mathbf{T}^{УПР}$ на основе элементов массива \mathbf{T}^C .

Каждое находящееся в очереди задание определяет m -е состояние ОУиК ($REQ^q \rightarrow ST_m^q$), в соответствии с которым для текущего состояния ST_{m_0} формируется массив $\mathbf{T}^{УПР} = [t_i^{УПР}]$ на основе подхода, рассмотренного ранее (см. рисунок 4.2.1). При этом $t_i^{УПР} := t_{m_0, m_i}^c$, $i = 1, 2, \dots, q$, где m_i – индекс состояния ОУиК, определяемый i -м заданием в очереди.

Блок 4. На данном этапе выполняется проверка наличия в сформированном массиве $\mathbf{T}^{УПР}$ соответствующих данных о длительностях операций управления для перевода ОУиК из текущего состояния ST_{m_0} в состояния ST_m^q , определяемые имеющимися заданиями в очереди.

Блок 5. При наличии полной информации о длительностях операций управления на основе сформированного массива $\mathbf{T}^{УПР}$ осуществляется поиск номера задания в очереди n , для которого время выполнения функциональной операции управления из текущего состояния ST_{m_0} является минимальным.

Далее диспетчером разделяемого ресурса производится извлечение задания с номером n из очереди и его выполнение (блоки 6 и 7).

В случае, если в сформированном массиве длительностей $T^{\text{УПР}}$ отсутствуют данные хотя бы об одной длительности операции управления, диспетчер разделяемого ресурса выполняет задания в порядке их поступления в очередь с измерением длительностей соответствующих операций и внесением их значений в массив T^C (блоки 8–11).

Блок 12. На данном этапе выполняется присвоение переменным ST_{m_0} и m_0 , описывающим текущее состояние объекта управления и контроля, значений, соответствующих выполненному заданию.

Блок 13. Результаты выполнения задания передаются на терминал пользователя.

В блоке 14 проверяется поступление нового задания в очередь диспетчера разделяемого ресурса, по результатам чего происходит повторение соответствующих шагов алгоритма (см. рисунок 4.2.3).

При завершении работы МРИУС (блоки 15 и 16) выполняется вывод результатов в виде накопленного массива значений T^C и его сохранение для последующего использования в качестве исходных данных в процессе функционирования текущего образца МРИУС (см. рисунок 4.2.3, блок 1), а также размещения *в базе данных инженерных решений*.

Диспетчер разделяемого ресурса, реализующий рассмотренный алгоритм (рисунок 4.2.3), в процессе функционирования МРИУС накапливает данные о соответствующих длительностях операций управления и по мере их постепенного накопления использует для определения последовательности извлечения заданий из очереди с учетом разработанного метода.

Для МРИУС, реализованной на основе многообъектовой базовой структуры с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК (см. рисунок 3.1.3), поиск задания с «ближайшим» состоянием (блок 5, рисунок 4.2.3) выполняется для каждого объекта управления и контроля из числа входящих в состав аппаратного обеспечения. Результаты исследования эффективности рассмотренного метода приведены в следующем пункте.

4.2.2 Исследование эффективности метода оптимизации операций управления

Эффективность применения рассмотренного в пункте 4.2.1 метода зависит от числа возможных состояний объекта управления и контроля (M^C), плотности вероятности распределения их среди заданий, соотношения длительностей функциональных операций измерения и управления (выражение (3.4.1)), среднего числа заданий в очереди диспетчера разделяемого ресурса МРИУС (см. рисунок 4.2.2). В соответствии с этим оценка эффективности применения предложенного метода выполнена средствами математического моделирования с использованием имитационной модели, приведенной в пункте 3.4.3, на примере заданных значений элементов матрицы \mathbf{T}^C .

Исследование средствами математического моделирования выполнено для «жадного» алгоритма решения задачи минимизации (см. рисунок 4.2.3, блок 5), в качестве рабочей гипотезы использованы следующие данные:

- число управляемых воздействий $k = 1$;
- число значений параметра управления $M^C = 20$;
- равномерный закон распределения значений параметра управления для заданий, формируемых на терминалах пользователя;
- длительность функциональной операции управления, необходимой для перевода ОУиК из состояния ST_m в состояние ST_{m+1} и из состояния ST_{m+1} в состояние ST_m принята равной 0,3 с, то есть

$$\mathbf{T}^C = \begin{cases} 0,3; & \text{при } k, l = 1, 2, \dots, M^C, \\ 0; & k = l, \end{cases} \quad (4.2.6)$$

при этом среднее значение времени управления $\bar{t}_{\text{упр}} = 2$ с;

- длительность функциональной операции измерения принята экспоненциально распределенной со средним значением $\bar{t}_{\text{изм}}$;
- время «размышления» пользователей распределено по экспоненциальному закону со средним значением $1/\lambda$;

На рисунке 4.2.4 приведены графики зависимостей среднего времени ожидания результатов измерения в МРИУС с базовым алгоритмом диспетчеризации *FIFO* и МРИУС с алгоритмом диспетчеризации, реализующим предложенный метод (см.

рисунок 4.2.3), от числа одновременно работающих терминалов пользователей N_T для двух значений времени измерения.

Обозначим через ξ относительное увеличение числа терминалов пользователей в МРИУС. При использовании рассмотренного метода величина ξ характеризует его эффективность и определяется в соответствии с выражением

$$\xi = \frac{N'_{pq^{оп}} - N_{pq^{оп}}}{N_{pq^{оп}}}, \quad (4.2.7)$$

где $N_{pq^{оп}}$ – максимальное число терминалов в МРИУС с базовым алгоритмом диспетчеризации; $N'_{pq^{оп}}$ – максимальное число терминалов в МРИУС, функционирующей на основе рассмотренного метода, при сохранении заданных требований к оперативности (см. выражение (2.3.8)).

На рисунке 4.2.5 приведены графики зависимостей ξ , выраженные в процентах, от средней длительности операции измерения ($\bar{t}_{изм}$) при различных заданных пороговых значениях среднего времени ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{ож_пор}$, полученные средствами имитационного моделирования для рассмотренных выше исходных данных.

Представленные на рисунке 4.2.4 зависимости демонстрируют эффективность предложенного метода. В частности для рассмотренного примера при заданном пороговом значении времени ожидания $\bar{t}_{ож_пор} \approx 7,5$ с и $t_{изм1} = 0,5$ с обеспечивается возможность увеличения числа терминалов пользователей приблизительно на 60 % (рисунок 4.2.4, а), а при $t_{изм1} = 2$ с – на 20 %.

Приведенные на рисунке 4.2.5 графики сводных зависимостей $\xi = f(t_{изм})$ показывают, что при уменьшении отношения средних длительностей функциональных операций управления и измерения ($\bar{t}_{упр}/\bar{t}_{изм}$) в МРИУС эффективность применения метода оптимизации операций управления снижается, а при увеличении заданного значения $\bar{t}_{ож_пор}$ – нелинейно возрастает. При этом для рассмотренного примера МРИУС при $\bar{t}_{ож_пор} = 5$ с и $\frac{\bar{t}_{упр}}{\bar{t}_{изм}} \leq 1$ эффективность предложенного метода составляет менее 8 %.

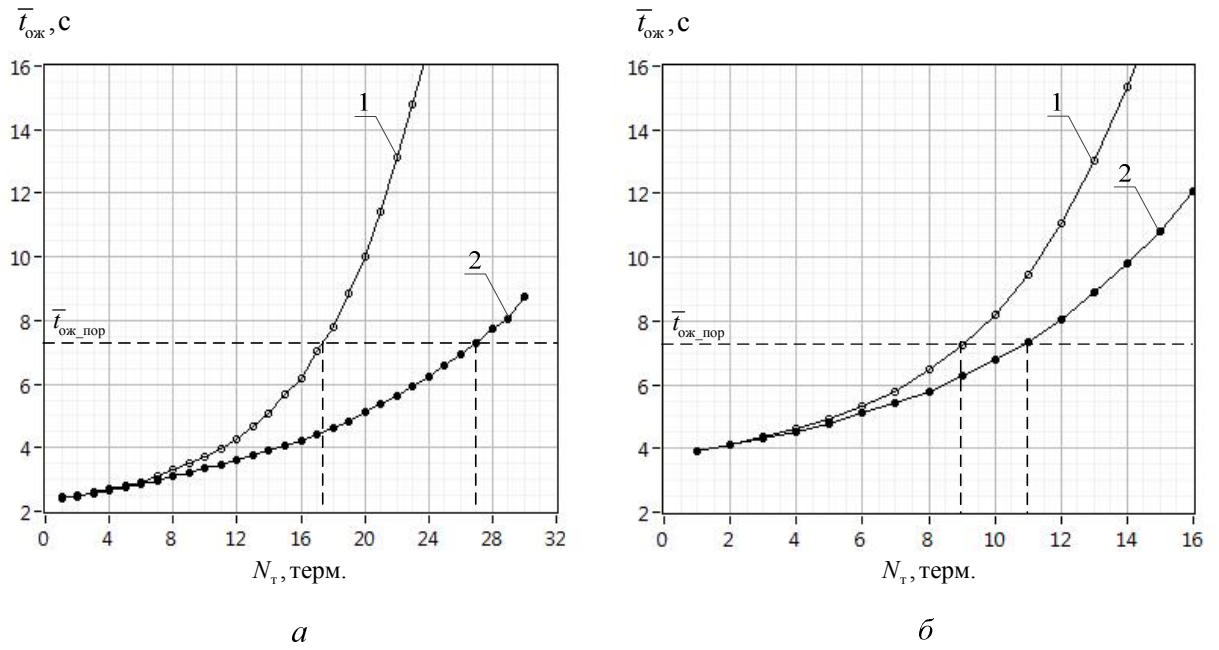


Рисунок 4.2.4 – Графики зависимости $\bar{t}_{ож} = f(N_T)$ при $\lambda = 0,025$: 1 – алгоритм диспетчеризации *FIFO*; 2 – реализация метода оптимизации операций управления;
 $a - \bar{t}_{изм1} = 0,5$ с; $b - \bar{t}_{изм2} = 2$ с

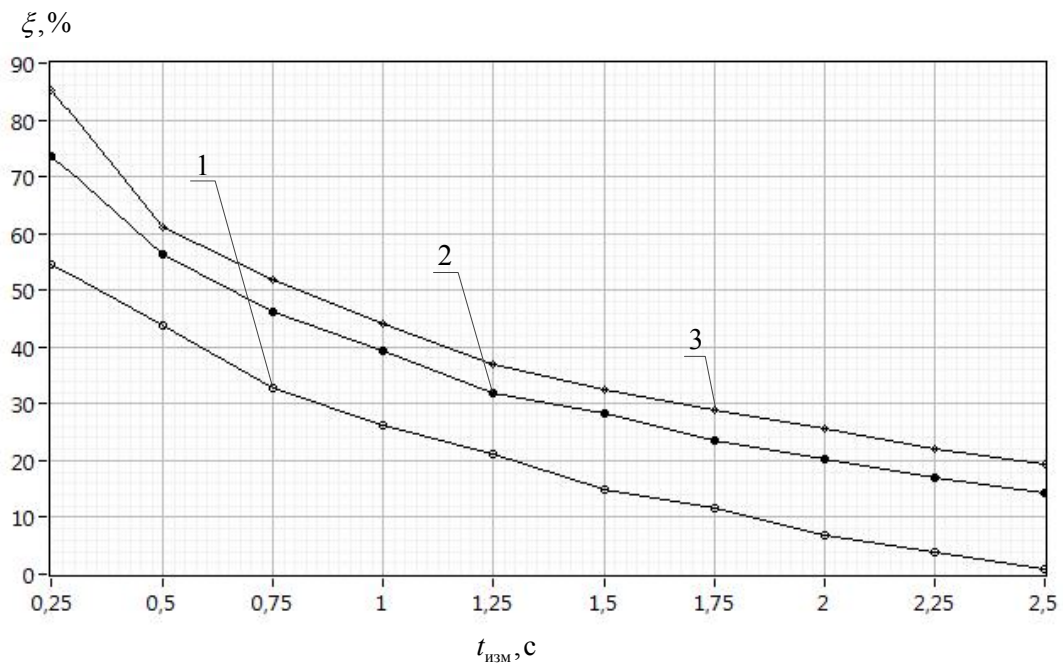


Рисунок 4.2.5 – График зависимости $\xi = f(\bar{t}_{изм})|_{\bar{t}_{ож}=\bar{t}_{ож_пор}}$ при $\lambda = 0,025$:
 $1 - \bar{t}_{ож_пор} = 5$ с; $2 - \bar{t}_{ож_пор} = 7,5$ с; $3 - \bar{t}_{ож_пор} = 10$ с

Сокращение времени обслуживания при реализации метода оптимизации операций управления приводит к повышению оперативности функционирования МРИУС (см. выражение (3.4.1), рисунок 4.2.4), что позволяет увеличить число обслуживаемых терминалов пользователей (см. п. 3.4) и, как следствие, обеспечивает повышение технического уровня МРИУС (выражение (2.3.1), рисунок 2.3.1) [327].

В целом величина ξ зависит от числа управляемых воздействий, значений элементов матрицы длительностей функциональных операций управления \mathbf{T}^C , числа терминалов пользователей системы N_T , интенсивности поступления заданий с каждого терминала пользователя λ . В соответствии с этим оценка степени влияния относительного сокращения среднего значения длительностей операций управления, обусловленного применением рассмотренного метода, на соответствующий параметр оперативности функционирования МРИУС и допустимое число терминалов пользователей выполняется на основе вошедшей в состав методологии методики расчета функций параметрической чувствительности, рассмотренной в параграфе 3.7.

4.3 Метод временного разделения многократных измерений

4.3.1 Описание метода временного разделения многократных измерений

Как известно, в целях повышения точности измерения параметров и характеристик объектов управления и контроля широкое распространение получило усреднение результатов многократных измерений, выполняемое как для «точечных» измерений, так и для измеряемых зависимостей, описываемых совокупностью «точечных» измерений [125]. Данный вид измерений является актуальным для МРИУС, работающих с сигналами малого уровня, при оценке параметров сигналов в шумах и т.д.

Как было показано в пунктах 1.2.1, 3.4.1, выполнение каждого задания состоит из двух основных функциональных операций: операции управления и операции измерения. При многократных измерениях среднее время выполнения каждого соответствующего задания возрастает пропорционально числу циклов измерения и усреднения:

$$\bar{t}'_{\text{обсл}} = \bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}'_{\text{изм}} = \bar{t}_{\text{упр}} + n_y \cdot \bar{t}_{\text{изм}}, \quad (4.3.1)$$

где $\bar{t}'_{\text{обсл}}$ – среднее время выполнения заданий при реализации многократных измерений; $\bar{t}_{\text{изм}}$ – среднее время однократного измерения требуемых параметров или характеристик; n_y – число циклов измерения и усреднения.

Введем следующие обозначения: $l_m = \bar{t}_{\text{упр}}/\bar{t}_{\text{изм}}$, $k_m = \bar{t}'_{\text{обсл}}/\bar{t}_{\text{обсл}}$. Отношение среднего времени выполнения заданий в МРИУС с усреднением и в МРИУС с однократными измерениями (базовой МРИУС) определяется следующим выражением:

$$k_m = \frac{\bar{t}'_{\text{обсл}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}} = \frac{\bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}'_{\text{изм}}}{\bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}_{\text{изм}}} = \frac{\bar{t}_{\text{изм}} \cdot (l_m + n_y)}{\bar{t}_{\text{изм}} \cdot (l_m + 1)} = \frac{l_m + n_y}{l_m + 1}. \quad (4.3.2)$$

В соответствии с выражением (4.3.2) на рисунке 4.3.1 приведены графики зависимостей отношения среднего времени выполнения заданий в МРИУС с усреднением многократных измерений и в базовой МРИУС от отношения средних длительностей функциональных операций на примере различных значений числа циклов измерения и усреднения.

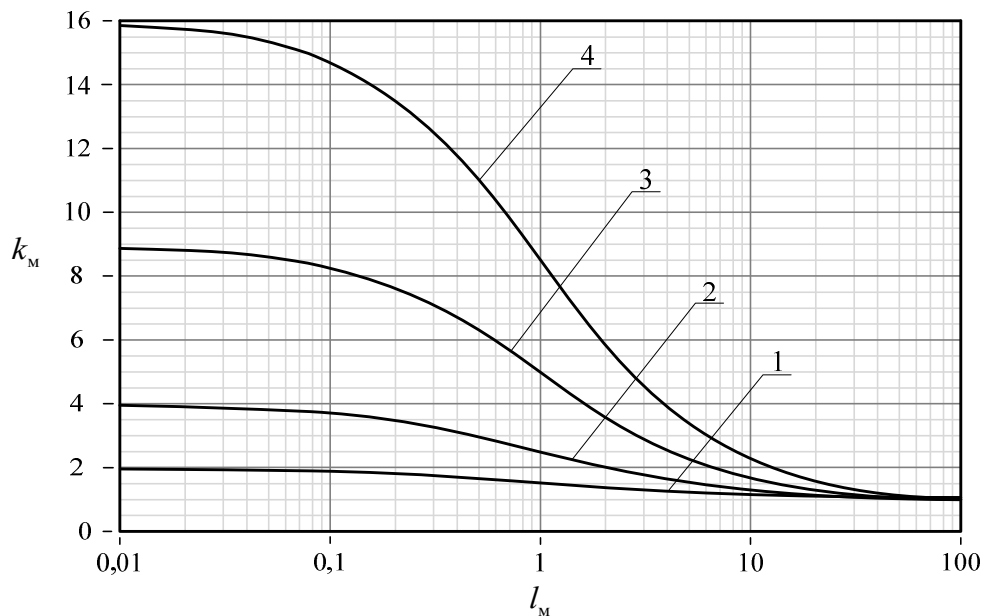


Рисунок 4.3.1 – Графики зависимости $k_m = f(l_m)$ при различном количестве числа циклов измерения усреднения: 1 – $n_y = 2$; 2 – $n_y = 4$; 3 – $n_y = 9$, 4 – $n_y = 16$

Увеличение среднего времени обслуживания в k_m раз приводит к снижению оперативности функционирования МРИУС и, как следствие, числа обслуживаемых терминалов пользователей, степень которого, в свою очередь, зависит от соотношения $\bar{t}_{\text{упр}}/\bar{t}_{\text{изм}}$, параметров реализуемого сценария диалога, числа терминалов пользователей (см. п. 3.4). Наиболее существенное влияние на увеличение среднего времени выполнения заданий при проведении многократных измерений оказывается при $\bar{t}_{\text{изм}} \gg \bar{t}_{\text{упр}}$, то есть при $l_m \rightarrow 0$ (см. рисунок 4.3.1).

Разработанный метод заключается в распределении функций обработки результатов многократных измерений между компонентами прикладного ПО МРИУС – *программным комплексом управления и измерения и интерфейсом пользователя* (см. рисунок 1.2.1), к которым относятся:

- усреднение результатов многократного измерения как величин с неизменным на интервале наблюдения математическим ожиданием (точечных измерений);
- усреднение совокупности результатов измерения циклически повторяющихся функциональных зависимостей – реализаций сигналов, осциллограмм, вольт-амперных характеристик и др.

Представим измеренные функциональные зависимости K -мерным массивом результатов однократных измерений $y_{i,j}$, $\mathbf{Y}_i = [y_{i,j}]$, где $i = \overline{1, n_y}$, $j = \overline{1, K}$, K – число точек, описывающих измеренную функциональную зависимость. Таким образом, массив значений функциональной зависимости, усредненной на измерительно-управляющей ЭВМ по заданному числу циклов измерений (n_y), определяется согласно выражению:

$$\bar{\mathbf{Y}}_{n_y} = \frac{1}{n_y} \sum_{i=1}^{n_y} \mathbf{Y}_i. \quad (4.3.3)$$

Усредненной функциональной зависимости $\bar{\mathbf{Y}}_{n_y}$ соответствует массив K усредненных значений $\bar{y}_{n_y,j} = \frac{1}{n_y} \sum_{i=1}^{n_y} y_{i,j}$, которые при выполнении многократных измерений передаются на терминал пользователя. При $K = 1$ (4.3.3) описывает усреднение результатов точечных измерений.

В соответствии с разработанным методом операция вычисления среднего арифметического точечных измерений и измеряемых однократно функциональных зависимостей осуществляется на основе компонента прикладного программного обеспечения МРИУС – *графического интерфейса пользователя* [334, 335]. При реализуемом подходе накопление результатов однократных измерений по мере поступления их на терминал пользователя выполняется рекуррентно, используя алгоритм вычисления среднего арифметического по его значению $\bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1}$ на предыдущем цикле усреднения:

$$\bar{\mathbf{Y}}_{n_y} = \bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1} + \frac{1}{n_y} \cdot (\mathbf{Y}_{n_y} - \bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1}), \quad (4.3.4)$$

где $\bar{\mathbf{Y}}_{n_y}$ – массив текущего среднего, $\bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1} = 0$ при $n_y = 1$, а элементы массива $\bar{y}_{n_y,j}$ рассчитываются на основе выражения

$$\bar{y}_{n_y,j} = \bar{y}_{(n_y-1),j} + \frac{1}{n_y} \cdot (y_{n_y,j} - \bar{y}_{(n_y-1),j}). \quad (4.3.5)$$

Среднеквадратическая оценка случайной погрешности усредненной функциональной зависимости, определяемой (4.3.3) и (4.3.4), находится как $\sigma_{\bar{\mathbf{Y}}_{n_y}} = \sigma_y / \sqrt{n_y}$, где σ_y – среднеквадратическое значение погрешности однократного измерения. При этом погрешность однократного измерения при реализации метода оценивается непосредственно в процессе накопления путем рекуррентного вычисления массива текущих средних квадратов результатов измерений $\overline{\mathbf{Y}}_{n_y}^2 = [\overline{y_{n_y,j}^2}]$ и массива текущей выборочной дисперсии погрешности результатов измерения $\mathbf{D}_{n_y} = [D_{n_y,j}^2]$ на основе следующих выражений:

$$\overline{\mathbf{Y}}_{n_y}^2 = \frac{n_y - 1}{n_y} \cdot \overline{\mathbf{Y}}_{n_y-1}^2 + \frac{1}{n_y} \cdot \mathbf{Y}_{n_y}^2; \quad (4.3.6)$$

$$\mathbf{D}_{n_y}^2 = \frac{n_y}{n_y - 1} \cdot \left[\overline{\mathbf{Y}}_{n_y}^2 - (\bar{\mathbf{Y}}_{n_y})^2 \right], \quad (4.3.7)$$

где $\overline{\mathbf{Y}}_{n_y-1}^2 \Big|_{n=1} = 0$, а элементы массивов $\overline{y_{n_y,j}^2}$ и $D_{n_y,j}^2$ определяются как

$$\overline{y_{n_y,j}^2} = \frac{n_y - 1}{n_y} \cdot \overline{y_{(n_y-1),j}^2} + \frac{1}{n_y} \cdot y_{n_y,j}^2; \quad (4.3.8)$$

$$D_{n_y,j}^2 = \frac{n_y}{n_y - 1} \cdot \left[\overline{y_{n_y,j}^2} - (\bar{y}_{n_y,j})^2 \right]. \quad (4.3.9)$$

При реализации равноточных измерений оценка дисперсии однократных измерений определяется посредством усреднения K элементов массива текущей дисперсии $\mathbf{D}_{n_y}^2$ на основе следующей формулы:

$$\sigma_{y,n_y}^2 = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K D_{n_y,j}^2 = \overline{\mathbf{D}_{n_y}^2}. \quad (4.3.10)$$

В соответствии с этим случайная погрешность текущих средних значений \bar{Y}_{n_y} рассчитывается как

$$\sigma_{\bar{Y}_{n_y}} = \frac{\sigma_{y,n_y}}{\sqrt{n_y}}. \quad (4.3.11)$$

Рассмотренный метод может быть реализован посредством включения в состав *графического интерфейса пользователя* (выражение (2.1.24)) программного модуля, реализующего рекуррентный алгоритм усреднения и вычисления соответствующих оценок (выражения (4.3.4), (4.3.11)). При этом выбор соответствующего режима выполнения заданий в МРИУС может осуществляться как непосредственно самим пользователем [286], так и автоматически посредством вычисления на измерительно-управляющей ЭВМ возможного числа усреднений с учетом заданного предельного значения времени выполнения задания или текущей загруженности МРИУС. В случае неудовлетворительной для пользователя текущей точности измерений он может произвести повторные измерения с накоплением и усреднением полученных результатов на основе программного обеспечения терминала пользователя.

На рисунке 4.3.2 представлен пример блок-схемы алгоритма диспетчеризации, реализующего метод временного разделения многократных измерений посредством ограничения числа циклов усреднения совместно с фоновым накоплением значений длительностей функциональных операций на основе рассмотренного в параграфе 4.1 подхода.

Блок 1. На первоначальном этапе вводится пороговое время обслуживания $t_{\text{обсл_пор}}$, значение которого определяется, например, на основе методики оценки граничных значений параметров сценария диалога (см. п. 3.5), вошедшей состав разработанной методологии (рисунок 2.5.1).

Блок 2. На данном этапе выполняется опрос текущего состояния очереди заданий.

Блок 3. При наличии заданий в очереди диспетчера разделяемого ресурса в блоке 3 выполняется извлечение первого имеющегося в очереди задания.

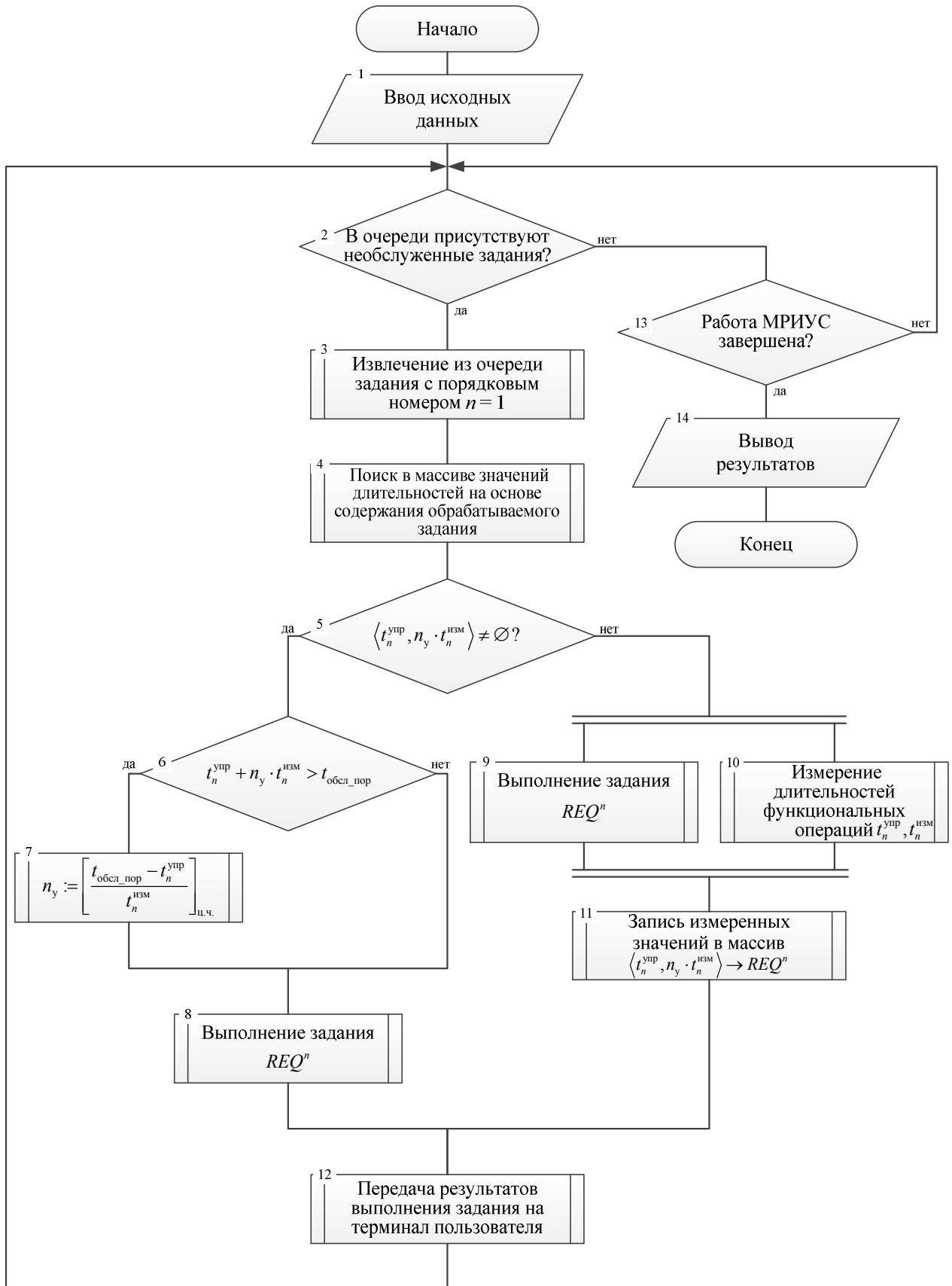


Рисунок 4.3.2 – Блок-схема алгоритма работы диспетчера разделяемого ресурса, реализующего метод временного разделения многократных измерений

Блок 4. На данном этапе в текущем массиве значений длительностей функциональных операций выполняется поиск значений длительностей, соответствующих текущему обрабатываемому заданию.

Блок 5. Проверяется факт наличия в массиве соответствующей информации.

Блок 6. При наличии необходимых сведений диспетчером разделяемого ресурса осуществляется сравнение длительности выполнения обрабатываемого задания с заданным пороговым значением. При превышении рассчитывается скорректированное число циклов измерения и усреднения в соответствии с заданной величиной $t_{\text{обсл_пор}}$ и значениями длительностей соответствующих функциональных операций (блок 7, где $[]_{\text{ц.ч.}}$ – означает операцию взятия целой части).

Блок 7. На данном шаге алгоритма выполняется обрабатываемое задание в соответствии с установленным или скорректированным (блок 6) значением n_y .

При выявлении отсутствия необходимой информации в результате проверки, проводимой в блоке 5, выполнение текущего задания осуществляется с измерением длительностей соответствующих функциональных операций и последующим их внесением в массив значений длительностей функциональных операций (блоки 9–11).

Блок 12. На данном этапе результаты выполнения задания передаются на терминал пользователя. Пользователь на основе полученной информации и результатов расчета соответствующих оценок случайной погрешности, выполняемых средствами графического интерфейса пользователя (см. выражения (4.3.6)–(4.3.9)), принимает решение о необходимости повторного проведения измерений с накоплением и усреднением полученных результатов.

При завершении работы МРИУС (блоки 13 и 14) выполняется вывод заполненного массива длительностей функциональных операций для его размещения в базе данных инженерных решений МРИУС, а также возможности использования в качестве исходных данных в рамках рассмотренного алгоритма (рисунок 4.3.2).

При реализации метода временного разделения многократных измерений и предельно возможном ограничении числа циклов усреднения – один цикл, среднее время измерения относительно МРИУС, реализующей усреднение на измерительно-управляющей ЭВМ, сокращается в n_y раз, а среднее время обслуживания задания $\bar{t}'_{\text{обсл}}$, соответственно, в k_m раз и соответствует его значению в системе без усреднения (см. выражения (4.3.1), (4.3.2)). В свою очередь, необходимость повторного проведения

измерений для осуществления накопления с усреднением на терминале пользователя, приводит к увеличению в n_y раз числа заданий, формируемых каждым пользователем, что отрицательно сказывается на оперативности функционирования МРИУС (см. п. 3.4) [334].

Соответствующие оценка эффективности рассмотренного метода и формирование в общем виде граничных условий эффективности его применения рассматриваются в следующем пункте.

4.3.2 Исследование эффективности метода временного разделения многократных измерений

При исследовании эффективности метода предположим, что увеличение в n_y раз числа заданий при повторных измерениях с накоплением и усреднением их результатов приводит к соответствующему пропорциональному сокращению среднего времени размышления пользователей. В качестве исходной рассмотрим МРИУС с экспоненциально распределенным временем «размышления» пользователей со средним значением $1/\lambda$, в которой в процессе выполнения заданий пользователей реализуются многократные измерения с фиксированным числом циклов усреднений $n_y = 3$, при этом длительности функциональных операций управления и измерения также распределены по экспоненциальному закону со средними значениями $\bar{t}_{упр_1}$ и $\bar{t}_{изм_1}$ соответственно. МРИУС функционирует на основе базового алгоритма диспетчеризации *FIFO* и описывается следующими значениями параметров: $\bar{t}_{упр_1} = 1$ с; $\bar{t}_{изм_1} = n_y \cdot \bar{t}_{изм_i} = 3$ с; $\bar{t}_{разм} = 1/\lambda = 90$ с, $\bar{t}_{изм_i}$ – время выполнения однократного измерения.

В соответствии со сформулированным предположением при реализации метода временного разделения многократных измерений и выполнении на измерительно-управляющей ЭВМ одного измерительного цикла исходная МРИУС «преобразуется» в МРИУС со следующими параметрами: $\bar{t}_{упр_2} = 1$ с; $\bar{t}_{изм_2} = \bar{t}_{изм_i} = 1$ с; $1/\lambda = 30$ с. На рисунке 4.3.3 приведены графики зависимостей среднего времени ожидания результатов измерения от числа терминалов пользователей N_T в исходной и МРИУС, реализующей исследуемый метод. Результаты получены средствами математического моделирования без учета транспортной задержки ($\bar{t}_{св} \ll \bar{t}_{обсл}$).

Рассчитанные графики зависимостей показывают эффективность применения метода временного разделения многократных измерений для данного примера МРИУС. В частности, при заданном пороговом значении времени ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{\text{ож_пор}} = 7$ с применение метода в рассматриваемой системе обеспечивает возможность увеличения числа терминалов пользователей с 12 до 15. Таким образом, эффективность метода, определяемая на основе выражения (4.2.7), составляет $\xi = 25\%$. Эффективность метода временного разделения многократных измерений зависит от соотношения длительностей функциональных операций управлений и измерения, числа выполняемых циклов усреднения (см. рисунок 4.3.1), а также реализуемых параметров сценария диалога. В соответствии с этим оценка граничных условий эффективности применения метода временного разделения многократных измерений в МРИУС выполнена на основе относительных функций параметрической чувствительности для среднего времени ожидания результатов измерения $\bar{t}_{\text{ож}}$.

На рисунке 4.3.4 на примере МРИУС, динамика функционирования которой описывается одноканальной Марковской системой массового обслуживания (см. п. 3.4.2) при $\bar{t}'_{\text{обсл}} = 4$ с и $\bar{t}_{\text{разм}} = 40$ с, приведены графики зависимостей отношения $S_{\bar{t}'_{\text{изм}}}^{\bar{t}_{\text{ож}}} / S_{\bar{t}_{\text{разм}}}^{\bar{t}_{\text{ож}}}$ от отношения $N_{\text{T}} / N_{\text{T}}^*$, полученные на основе рассмотренной в параграфе 3.7 методики в системе с выполнением усреднений многократных измерений на измерительно-управляющей ЭВМ для различных значений отношения $\bar{t}_{\text{упр}} / \bar{t}'_{\text{изм}}$. Величина N_{T}^* характеризует число терминалов пользователей, соответствующее насыщению МРИУС с выполнением усреднений многократных измерений на измерительно-управляющей ЭВМ (см. выражение (1.2.4)). На рисунке 4.3.5 приведены рассчитанные графики зависимостей эффективности исследуемого метода, выраженной в процентах, от отношения $\bar{t}_{\text{упр}} / \bar{t}'_{\text{изм}}$ при различной величине сокращения значения $\bar{t}'_{\text{изм}}$ и исходном значении $\bar{t}_{\text{обсл}} = 3$ с (см. выражение (4.3.1)) на примере $\bar{t}_{\text{разм}} = 30$ с.

В целом применение метода временного разделения многократных измерений в МРИУС является эффективным при выполнении следующего неравенства:

$$S_{\bar{t}'_{\text{изм}}}^{\bar{t}_{\text{ож}}} / S_{\bar{t}_{\text{разм}}}^{\bar{t}_{\text{ож}}} > 1. \quad (4.3.12)$$

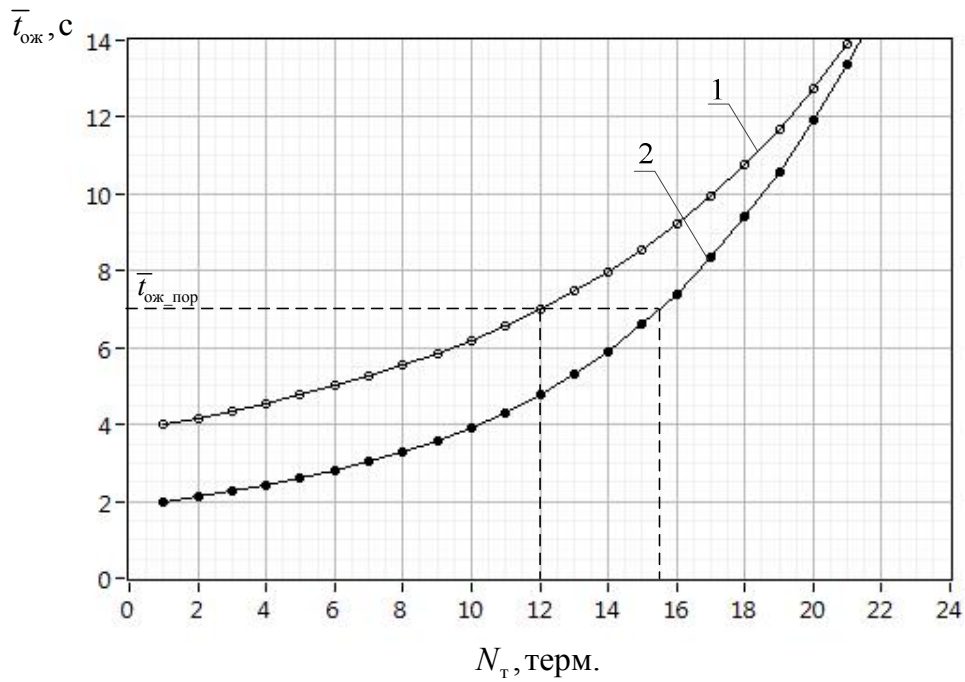


Рисунок 4.3.3 – Графики зависимости $\bar{t}_{ож} = f(N_T)$: 1 – усреднение результатов многократных измерений на измерительно-управляющей ЭВМ; 2 – усреднение результатов многократных измерений на терминалах пользователей

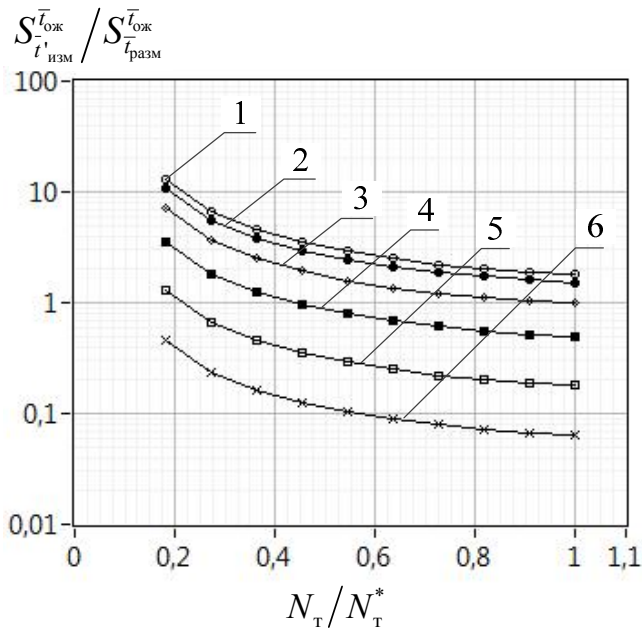


Рисунок 4.3.4 – Графики зависимости

$$S_{t'_{изм}}^{\bar{t}_{ож}} / S_{\bar{t}_{разм}}^{\bar{t}_{ож}} = f(N_T / N_T^*):$$

1 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 0,1$; 2 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 0,3$;

3 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 1$; 4 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 3$;

5 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 10$; 6 – $\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм} = 30$

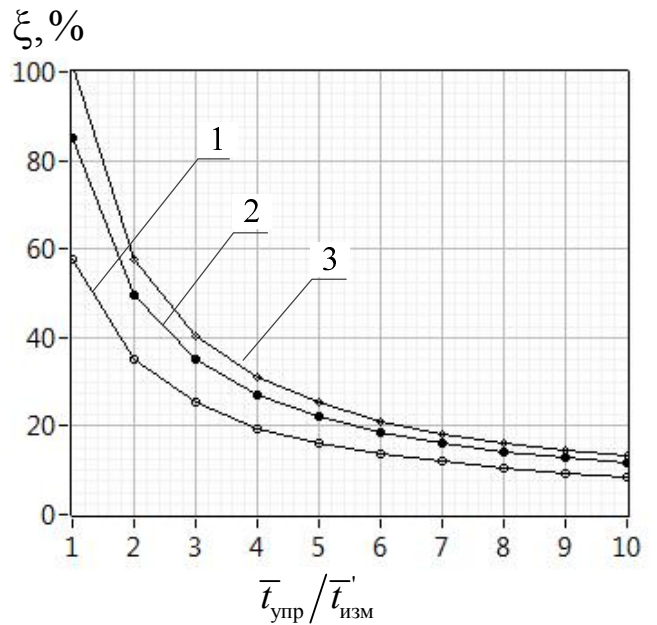


Рисунок 4.3.5 – Графики зависимости

$\xi = f(\bar{t}_{упр} / \bar{t}'_{изм})$ при сокращении $\bar{t}'_{изм}$:

1 – в 2 раза; 2 – в 3 раза; 3 – в 4 раза

($\bar{t}_{разм} = 30$ с, $\bar{t}_{обсл} = 3$ с)

В данном случае уменьшение среднего времени измерения и соответствующее пропорциональное снижение среднего времени размышления пользователей обеспечивает повышение оперативности функционирования МРИУС, что наглядно отображают представленные на рисунке 4.3.4 графики.

Также данный метод временного разделения можно рассматривать на этапе разработки аппаратно-программного обеспечения МРИУС (см. п. 3.2) в качестве решения, реализующего параметры сценария диалога, наиболее предпочтительные с точки зрения числа обслуживаемых терминалов пользователей, при котором обеспечивается заданная оперативность функционирования (см. п. 3.5). При этом следует отметить, что при изменении в МРИУС соотношения средних длительностей функциональных операций управления и измерения за счет реализации метода временного разделения многократных измерений в дальнейшем целесообразно рассмотреть возможности применения метода оптимизации операций управления, описанного в предыдущем параграфе (см. рисунок 4.2.5).

4.4 Метод распараллеливания функциональных операций

4.4.1 Описание метода распараллеливания функциональных операций

Рассмотрим семейство многообъектовых базовых структур аппаратного построения МРИУС с внутренним разделением каналов (см. рисунок 3.1.5). Как было показано в параграфе 3.1, применение данных структур обеспечивает возможность сокращения затрат на реализацию МРИУС для ряда объектов управления и контроля посредством возможности унификации и использования общих аппаратных компонентов. Однако при совместной работе нескольких функциональных групп терминалов пользователей на одном временном интервале происходит снижение оперативности ее функционирования по сравнению с МРИУС, в которых каждая группа терминалов обслуживается на основе однообъектовой базовой структуры (см. п. 3.1.1).

В процессе функционирования МРИУС на измерительно-управляющей ЭВМ в очереди диспетчера разделяемого ресурса в произвольный момент времени находится q заданий. В рамках рассмотрения метода введем следующие обозначения: $t_{упр}^i$ – длительность операций управления, а $t_{изм}^i$ – длительность операции измерения, определяемые i -м находящимся в очереди заданием, где $i = 1, 2, \dots, q$.

Временная диаграмма обработки заданий, имеющих в очереди, в соответствии с базовым алгоритмом диспетчеризации *FIFO*, реализуемым диспетчером разделяемого ресурса, представлена на рисунке 4.4.1, *а*. Как отмечено в пункте 3.4.1, в общем случае величины $\tilde{t}_{\text{упр}}$ и $\tilde{t}_{\text{изм}}$ являются случайно распределенными со средними значениями $\bar{t}_{\text{упр}}$ и $\bar{t}_{\text{изм}}$ соответственно. Таким образом, для базового алгоритма диспетчеризации среднее время обслуживания имеющих в очереди заданий определяется суммой величин $\bar{t}_{\text{упр}}$ и $\bar{t}_{\text{изм}}$ (см. выражение (3.4.3)).

Разработанный метод заключается в параллельном выполнении функциональных операций управления и измерения для заданий, имеющих принадлежность к различным объектам управления и контроля, входящих в состав аппаратного обеспечения МРИУС. В соответствии с данным методом в начале выполнения операции измерения текущего задания анализируется следующее задание в очереди на предмет его «принадлежности» к объекту управления и контроля. В случае несовпадения объектов управления и контроля в процессе выполнения операций измерения параметров ОУиК для текущего задания параллельно выполняется операция управления для другого ОУиК в соответствии со следующим заданием, имеющимся в очереди [336, 337].

Временная диаграмма обработки заданий при распараллеливании выполнения функциональных операций в МРИУС, для случая наличия в очереди чередующихся заданий с принадлежностью к разным объектам управления и контроля, представлена на рисунке 4.4.1, *б*. В соответствии с рисунком 4.4.1, *б* суммарное время обслуживания заданий, имеющих в очереди при реализации метода распараллеливания функциональных операций, определяется на основе выражения

$$\begin{aligned} t_{\text{обсл}\Sigma}^* &= t_{\text{упр}}^1 + \max(t_{\text{изм}}^1; t_{\text{упр}}^2) + \dots + \max(t_{\text{изм}}^i; t_{\text{упр}}^{i+1}) + \dots + t_{\text{изм}}^q = \\ &= t_{\text{упр}}^1 + t_{\text{изм}}^q + \sum_i^{q-1} \max(t_{\text{изм}}^i; t_{\text{упр}}^{i+1}). \end{aligned} \quad (4.4.1)$$

Для средних значений длительностей функциональных операций выражение (4.4.1) имеет следующий вид:

$$t_{\text{обсл}\Sigma}^* = \bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}_{\text{изм}} + \sum_{q-1} \max(\bar{t}_{\text{упр}}; \bar{t}_{\text{изм}}). \quad (4.4.2)$$

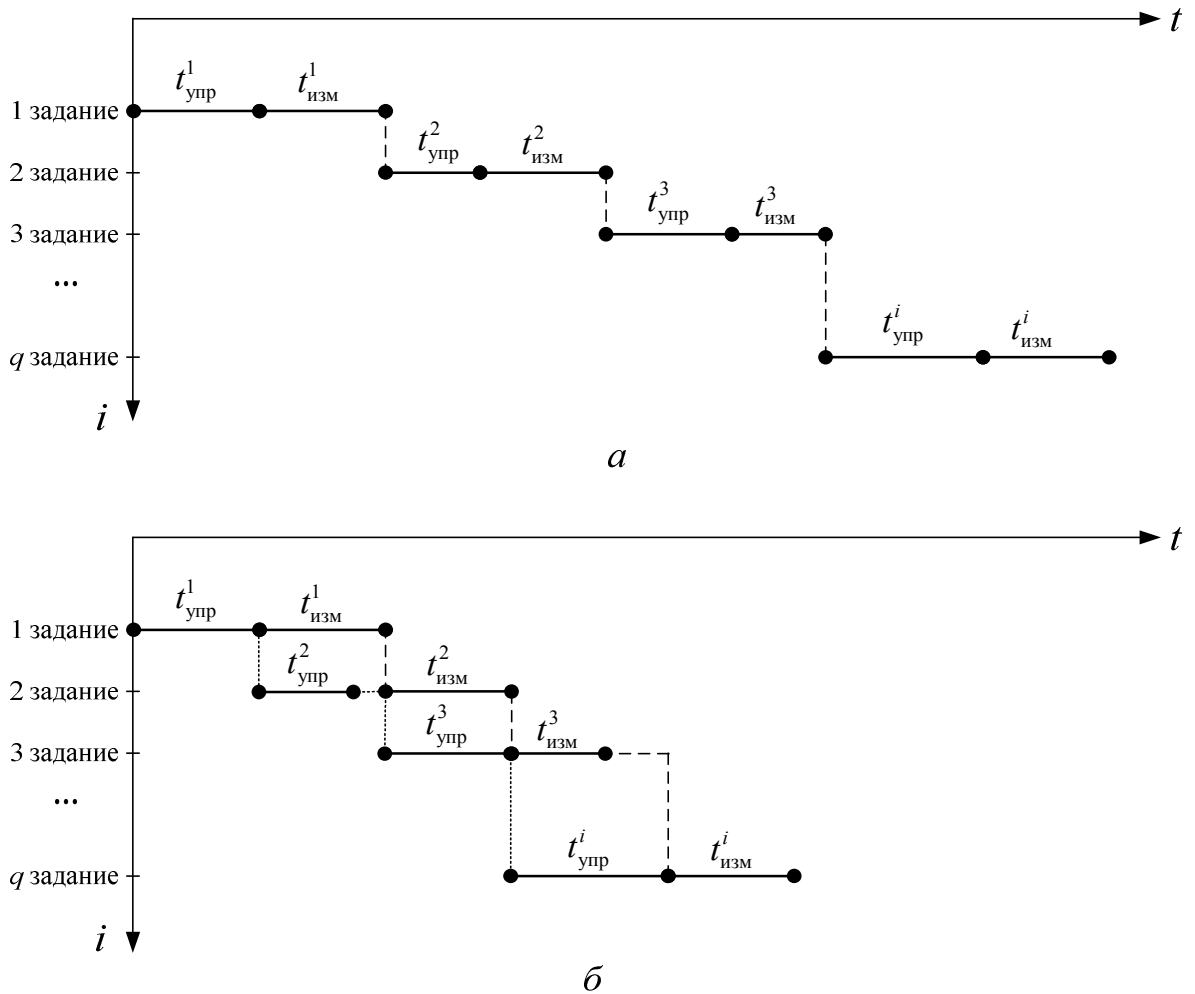


Рисунок 4.4.1 – Временная диаграмма выполнения очереди заданий:

a – выполнение в соответствии с алгоритмом диспетчеризации *FIFO*;

б – выполнение при реализации метода распараллеливания функциональных операций

Таким образом, приведенное среднее время выполнения q имеющихся в очереди заданий при распараллеливании функциональных операций находится в соответствии с выражением

$$\bar{t}_{обсл}^* = \frac{1}{q} \left[\bar{t}_{упр} + \bar{t}_{изм} + \sum_{q-1} \max(\bar{t}_{упр}; \bar{t}_{изм}) \right]. \quad (4.4.3)$$

В рамках рассмотрения метода также введем следующие обозначения: $l_m = \bar{t}_{упр} / \bar{t}_{изм}$, $m_m = \bar{t}_{обсл} / \bar{t}_{обсл}^*$. Отношение среднего времени обслуживания заданий в МРИУС с базовым алгоритмом диспетчеризации и приведенного среднего времени обслуживания в МРИУС, реализующей метод распараллеливания операций (выражение (4.4.3)), определяется следующим образом:

$$m_M = \frac{\bar{t}_{\text{обсл}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}^*} = \frac{q \cdot (l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}})}{l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}} + \sum_{q-1} \max(l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}}; \bar{t}_{\text{изм}})}. \quad (4.4.4)$$

В зависимости от возможных значений l_M выражение (4.4.4) принимает следующий вид:

$$m_M = \begin{cases} \frac{q \cdot (l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}})}{l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}} + (q-1) \cdot \bar{t}_{\text{изм}}}, & \text{при } l_M < 1; \\ \frac{q \cdot (l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}})}{l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}} + \bar{t}_{\text{изм}} + (q-1) \cdot l_M \cdot \bar{t}_{\text{изм}}}, & \text{при } l_M \geq 1. \end{cases} \quad (4.4.5)$$

В результате упрощения выражение (4.4.5) приводится к следующему:

$$m_M = \begin{cases} \frac{q \cdot (l_M + 1)}{l_M + q}, & \text{при } l_M < 1; \\ \frac{q \cdot (l_M + 1)}{l_M \cdot q + 1}, & \text{при } l_M \geq 1. \end{cases} \quad (4.4.6)$$

Полученное выражение (4.4.6) характеризует повышение скорости выполнения заданий в МРИУС от соотношения длительностей функциональных операций и реализуемого сценария диалога, характеризуемых в общем виде переменными l_M и q . Увеличение скорости выполнения заданий в m_M раз для имеющихся в очереди заданий обеспечивает повышение оперативности ее функционирования, позволяет увеличить число обслуживаемых терминалов пользователей и, как следствие, повысить технический уровень МРИУС (см. рисунок 2.4.1).

На рисунке 4.4.2 приведены примеры рассчитанных графиков зависимостей m_M от отношения средних значений длительностей выполняемых функциональных операций для различного числа q заданий в очереди *диспетчера разделяемого ресурса*. Приведенные на рисунке 4.4.2 зависимости показывают, что применение предложенного метода обеспечивает сокращение приведенного значения среднего времени обслуживания заданий в МРИУС, при этом, например, при $q = 3$ и $l_M = 2$ скорость обслуживания заданий увеличивается приблизительно в 1,3 раза относительно базового алгоритма диспетчеризации *FIFO*.

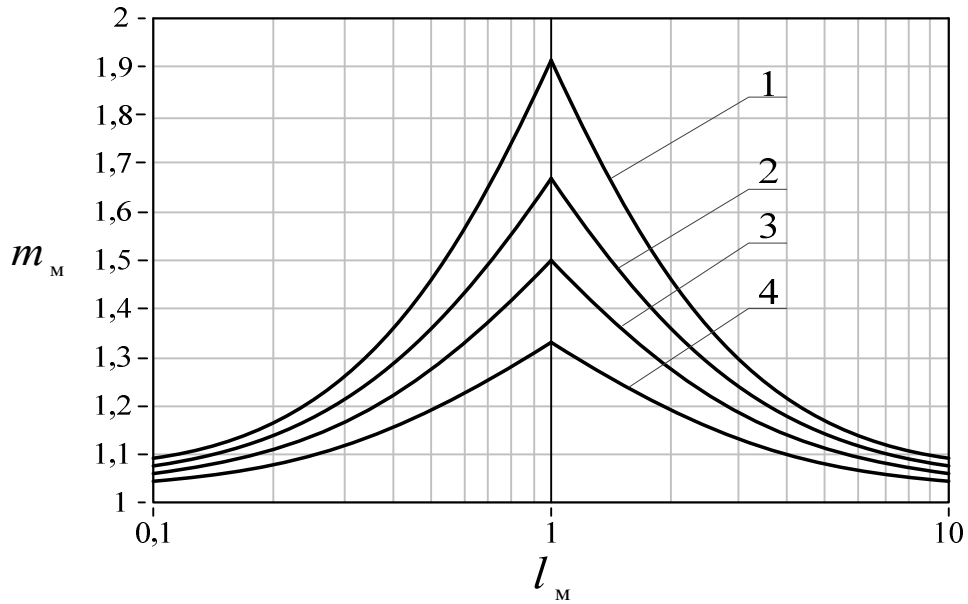


Рисунок 4.4.2 – Графики зависимостей $m_M = f(l_M)$ при различном числе заданий в очереди: 1 – $q = 10$; 2 – $q = 5$; 3 – $q = 3$; 4 – $q = 2$

Значение m_M является максимальным при $l_M = 1$ ($\bar{t}_{упр} = \bar{t}_{изм}$), в этом случае обеспечивается максимальное распараллеливание функциональных операций, то есть за один интервал времени осуществляется выполнение операций для двух заданий из очереди, имеющих разную принадлежность, и обеспечивается непрерывность последовательности их выполнения в рамках одного задания (см. рисунок 4.4.1, б). Максимальное возможное значение m_M определяется на основе выражения (4.4.6) при $l_M = 1$ и $q \rightarrow \infty$:

$$m_{M_{\max}} = \lim_{q \rightarrow \infty} \frac{q \cdot 2}{q + 1} = 2. \quad (4.4.7)$$

Выражения (4.4.6)–(4.4.7) не учитывают вероятностный характер поступления заданий на измерительно-управляющую ЭВМ, а также уровни дисперсии значений $\bar{t}_{упр}$ и $\bar{t}_{изм}$. Более подробно результаты исследований метода на основе предложенной имитационной модели рассмотрены в пункте 4.4.2. Метод реализуется на основе алгоритма диспетчеризации, представленного на рисунке 4.4.3. Рассмотрим шаги приведенного алгоритма.

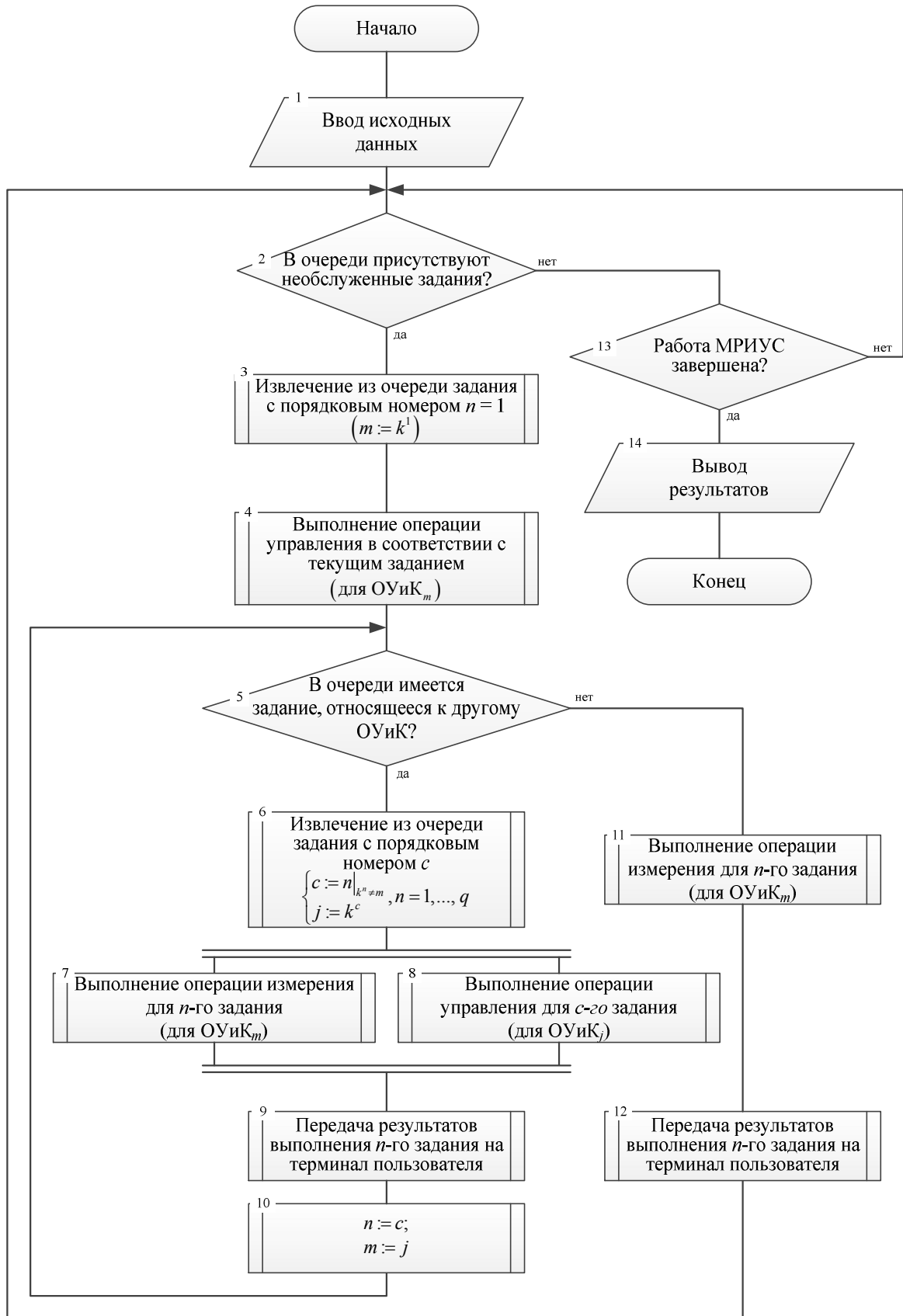


Рисунок 4.4.3 – Блок-схема алгоритма работы диспетчера разделяемого ресурса, реализующего метод распараллеливания функциональных операций

Блок 1. На первоначальном этапе выполняется инициализация внутренних переменных алгоритма, ввод перечня признаков и определение их соответствия объектам управления и контроля МРУИС.

Обозначим переменной k^n – номер объекта управления и контроля, определяемый n -м заданием в очереди диспетчера разделяемого ресурса, где $k = 1, 2, \dots, K^{\text{ВИД}}$, $n = 1, 2, \dots, q$, $K^{\text{ВИД}}$ – число видов объектов управления и контроля МРУИС (см. рисунок 3.1.5), q – число заданий в очереди.

Блок 2. На данном этапе выполняется опрос текущего состояния очереди заданий.

Блок 3. При наличии заданий в очереди диспетчера разделяемого ресурса в блоке 3 происходит извлечение первого имеющегося в очереди задания ($n = 1$).

Блок 4. На данном шаге осуществляется выполнение функциональной операции управления для объекта управления и контроля – ОУиК $_m$, соответствующего текущему обрабатываемому заданию.

Блок 5. После завершения операции управления для текущего задания проверяется наличие в очереди диспетчера разделяемого ресурса задания, относящегося к объектам управления и контроля, не совпадающим с ОУиК текущего задания. При наличии такого задания определятся его порядковый номер (c), и оно извлекается из очереди (блок 6). На следующих шагах алгоритма операция измерения текущего n -го задания выполняется параллельно с операцией управления c -го задания (блоки 7 и 8).

Блок 9. При завершении выполнения соответствующих функциональных операций результаты выполнения n -го задания передаются на терминал пользователя.

Блок 10. На данном шаге алгоритма c -е задание и соответствующий номер объекта управления и контроля (j) принимаются в качестве «текущих», для которых впоследствии проверяется наличие в очереди заданий, удовлетворяющих установленное условие (блок 5).

Блок 11. При отсутствии в очереди заданий, относящихся к объектам управления и контроля, не совпадающим с ОУиК текущего задания, производится операция измерения для текущего n -го задания, по завершению которой результаты выполнения задания передаются на соответствующий терминал пользователя (блок 12).

При завершении работы МРУИС (блоки 13 и 14) выполняется вывод накопленной информации, например о распределении числа заданий в очереди, относящихся к разным ОУиК, а также о длительностях соответствующих функциональных операций.

Необходимая информация о длительностях функциональных операций накапливается в процессе функционирования МРИУС на основе рассмотренного в параграфе 4.1 подхода и впоследствии интегрируется в базу данных инженерных решений МРИУС.

4.4.2 Исследование эффективности метода распараллеливания функциональных операций

Исследование эффективности метода распараллеливания функциональных операций выполнено средствами математического моделирования на основе рассмотренной в п. 3.4.3 имитационной модели динамики функционирования МРИУС. В качестве исходных данных при моделировании использованы следующие параметры:

- время «размышления» пользователей принято экспоненциально распределенным со средним значением $\bar{t}_{\text{разм}} = 1/\lambda = 40$ с;
- длительности функциональных операций управления и измерения распределены по логнормальному закону со средними значениями $\bar{t}_{\text{упр}} = 1$ с и $\bar{t}_{\text{изм}} = 1$ с ($l_m = 1$);
- число объектов управления и контроля, входящих в состав МРИУС, $K^{\text{вид}} = 6$.

Номера объектов управления и контроля в заданиях, поступающих в канал обслуживания, формировались на основе генератора случайных чисел, распределенных по равномерному закону.

На рисунке 4.4.4 приведены графики зависимостей среднего времени ожидания результатов измерения от числа терминалов пользователей N_T в МРИУС, реализующей метод распараллеливания функциональных операций без учета транспортной задержки ($\bar{t}_{\text{св}} \ll \bar{t}_{\text{обсл}}$), для различных значений дисперсии времени управления ($D_{t_{\text{упр}}}$) и времени измерения ($D_{t_{\text{изм}}}$) при $D_{t_{\text{упр}}} = D_{t_{\text{изм}}} = D$.

Полученные результаты математического моделирования подтверждают эффективность данного метода. В частности, для рассмотренного примера МРИУС при пороговом значении времени ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{\text{ож_пор}} = 6$ с применение метода обеспечивает возможность увеличения числа обслуживаемых терминалов пользователей с 23 до 35, таким образом, эффективность метода составляет $\approx 57\%$ (см. выражение (4.2.7)).

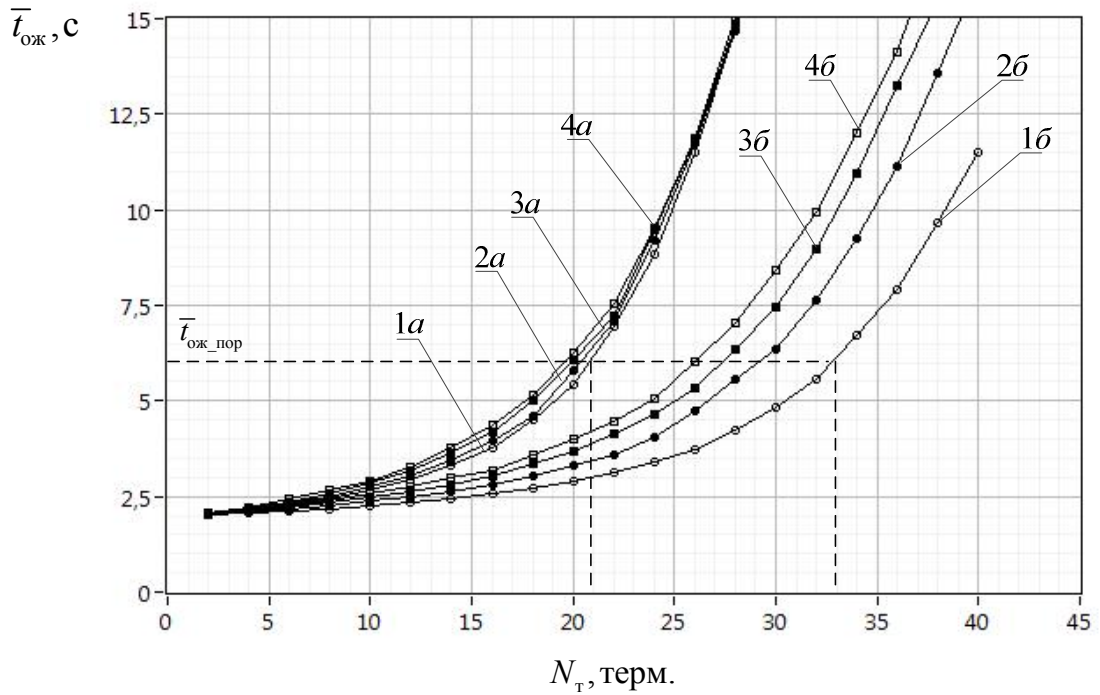


Рисунок 4.4.4 – Среднее время ожидания результатов измерения в МРИУС с алгоритмом диспетчеризации *FIFO* (а) и в системе с распараллеливанием функциональных операций (б) при: 1 – $D = 0,1$; 2 – $D = 0,4$; 3 – $D = 0,7$; 4 – $D = 1$

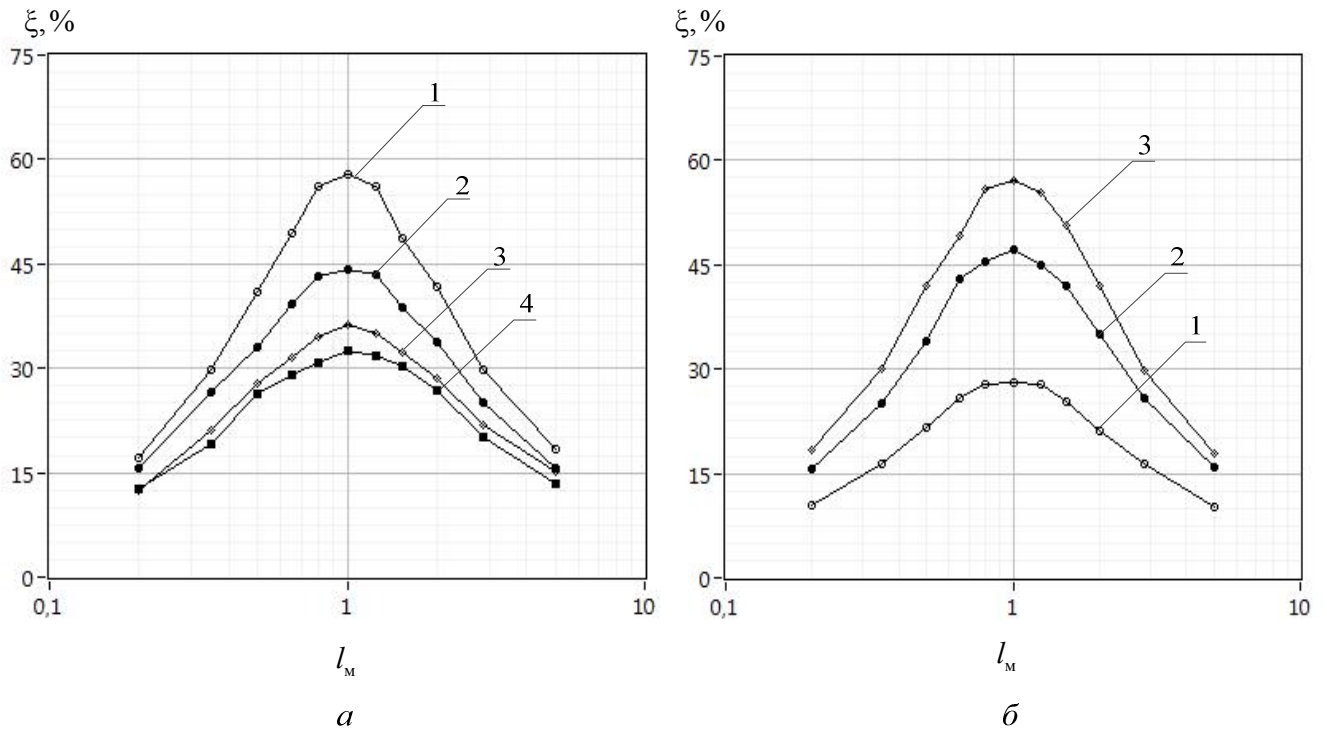


Рисунок 4.4.5 – График зависимости $\xi = f(l_M)|_{\bar{t}_{ож}=\bar{t}_{ож_пор}}$:
 а) 1 – $D = 0,1$; 2 – $D = 0,4$; 3 – $D = 0,7$; 4 – $D = 1$, при $K^{ВИД} = 6$;
 б) 1 – $K^{ВИД} = 2$; 2 – $K^{ВИД} = 4$; 3 – $K^{ВИД} = 6$, при $D = 0,1$

На рисунке 4.4.5 представлены рассчитанные графики зависимостей эффективности исследуемого метода, выраженной в процентах, от отношения средних длительностей функциональных операций управления и измерения для различных значений их дисперсии ($D_{t_{упр}} = D_{t_{изм}} = D$) при общем времени обслуживания $\bar{t}_{обсл} = 2$ с (рисунок 4.4.5, а) и различного числа объектов управления и контроля в МРИУС (рисунок 4.4.5, б).

Рост эффективности метода при снижении дисперсий длительностей функциональных операций (рисунок 4.4.5, а) объясняется повышением степени распараллеливания их выполнения (см. рисунок 4.4.1). В свою очередь, рост ξ при увеличении числа объектов управления и контроля в многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов (рисунок 4.4.5, б) обусловлен тем, что в очереди реже «встречаются» задания, имеющие одинаковую принадлежность к одному и тому же ОУиК из общего числа входящих в состав аппаратного обеспечения МРИУС.

Повышение эффективности предложенного метода распараллеливания функциональных операций в МРИУС также может быть обеспечено [337]:

- посредством его совместного применения с рассмотренными ранее в параграфах 4.2 и 4.3 методами, которые направлены на сокращение длительностей соответствующих функциональных операций;
- посредством выбора последовательности обработки имеющихся в очереди заданий в соответствии с минимумом суммарного времени простоя измерительного канала и канала управления МРИУС.

Рассмотренные в параграфах 4.2–4.4 методы являются базовыми и применимы для большинства МРИУС с учетом специфики выполняемых функциональных операций и соотношения их длительностей (см. рисунок 4.2.2, 4.3.1, 4.4.1). При этом следует отметить, что для ряда МРИУС с учетом их технических особенностей, обусловленных прикладной областью использования и решаемыми задачами, также разрабатываются и применяются индивидуальные методы повышения оперативности функционирования и технического уровня соответственно, такие как, например, подходы, рассмотренные в работах [338, 339].

Способы функционирования МРИУС, реализующие рассмотренные в параграфах 4.1–4.4 методы, защищены рядом патентов РФ на изобретение [325, 328, 335, 338]. В следующем параграфе рассматривается обобщенный анализ эффективности

применения разработанных методов в МРУИС на примере предложенных вариантов базовых структур аппаратного построения (см. п. 3.1).

4.5 Обобщенный анализ эффективности применения методов повышения оперативности функционирования

Принципиальная возможность применения приведенных в параграфах 4.2 и 4.3 методов повышения оперативности функционирования распространяется на все базовые структуры аппаратного построения МРУИС, описанные в параграфе 3.1. Метод распараллеливания функциональных операций (п. 4.4) применяется только в многообъектовых структурах с внутренним разделением каналов (см. рисунок 3.1.1).

Рассмотрим общие выражения для затрат на реализацию базовых структур аппаратного построения МРУИС в предположении их исполнения на основе одних и тех же унифицированных аппаратных компонентов. Затраты на аппаратное обеспечение однообъектовой базовой структуры МРУИС без учета терминалов пользователей определяются в соответствии с выражением

$$C_{BS_1} = C_{ЭВМ} + C_{КУ} + C_{КИ} + C_{ОУиК}, \quad (4.5.1)$$

где $C_{ЭВМ}$ – затраты на измерительно-управляющую ЭВМ; $C_{КИ}$, $C_{КУ}$ – затраты на реализацию измерительного канала и канала управления; $C_{ОУиК}$ – затраты на объект управления и контроля (см. рисунок 3.1.2).

Соответственно, для многообъектовой структуры с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК затраты на аппаратное обеспечение равны

$$C_{BS_2} = C_{ЭВМ} + (C_{КИ} + C_{КУ} + C_{ОУиК}) \cdot K^{ОБ}, \quad (4.5.2)$$

где $K^{ОБ}$ – число идентичных объектов управления и контроля (см. рисунок 3.1.3).

Для многообъектовых структур с внутренним разделением каналов затраты, приведенные на каждую «группу» терминалов пользователей, имеющих функциональную принадлежность к соответствующему объекту управления и контроля, определяются следующим образом:

- для многообъектовой МРУИС с разделением измерительного канала

$$C_{BS_4}^k = \frac{C_{ЭВМ} + C_{КИ}}{K^{ВИД}} + C_{КУ}^k + C_{ОУиК}^k; \quad (4.5.3)$$

- для многообъектовой МРИУС с разделением канала управления

$$C_{BS_5}^k = \frac{C_{ЭВМ} + C_{КУ}}{K^{ВИД}} + C_{КИ}^k + C_{ОУиК}^k; \quad (4.5.4)$$

- для многообъектовой МРИУС с разделением измерительного канала и канала управления

$$C_{BS_6}^k = \frac{C_{ЭВМ} + C_{КИ} + C_{КУ}}{K^{ВИД}} + C_{ОУиК}^k, \quad (4.5.5)$$

где $k = 1, 2, \dots, K^{ВИД}$; $K^{ВИД}$ – число видов объектов управления и контроля, входящих в состав аппаратного обеспечения МРИУС.

Рассмотрим обобщенные нормированные зависимости среднего времени ожидания результатов выполнения заданий в МРИУС, реализующих описанные ранее методы повышения оперативности, на примере идентичных параметров реализуемого сценария диалога в различных базовых структурах аппаратного построения.

На рисунке 4.5.1 схематично приведены графики нормированных зависимостей среднего времени ожидания результатов измерения для однообъектовой МРИУС и многообъектовой МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК ($K^{ОБ} = 2$). Рассмотрим на рисунке 4.5.1 точку $N_{\bar{t}_{ож_пор}}^{ТЗ}$ на оси X , соответствующую заданным в ТЗ требованиям к числу обслуживаемых терминалов пользователей с оперативностью, характеризуемой параметром $\bar{t}_{ож_пор}$. В соответствии с рассматриваемым примером при тех же реализуемых параметрах сценария диалога, сформулированным требованиям к числу терминалов пользователей удовлетворяет только многообъектовая базовая структура аппаратного построения МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК при ($K^{ОБ} \geq 2$).

Соответствующие затраты на аппаратную реализацию данной структуры при исполнении на основе одних и тех же аппаратных компонентов, приблизительно в $K^{ОБ}$ превышают затраты на аппаратную реализацию однообъектовой базовой структуры (см. выражения (4.5.1) и (4.5.2)), при этом число терминалов пользователей, соответствующих заданному параметру оперативности $N_{\bar{t}_{ож_пор}}^{BS_2}$, существенно превышает требуемое значение $N_{\bar{t}_{ож_пор}}^{ТЗ}$.

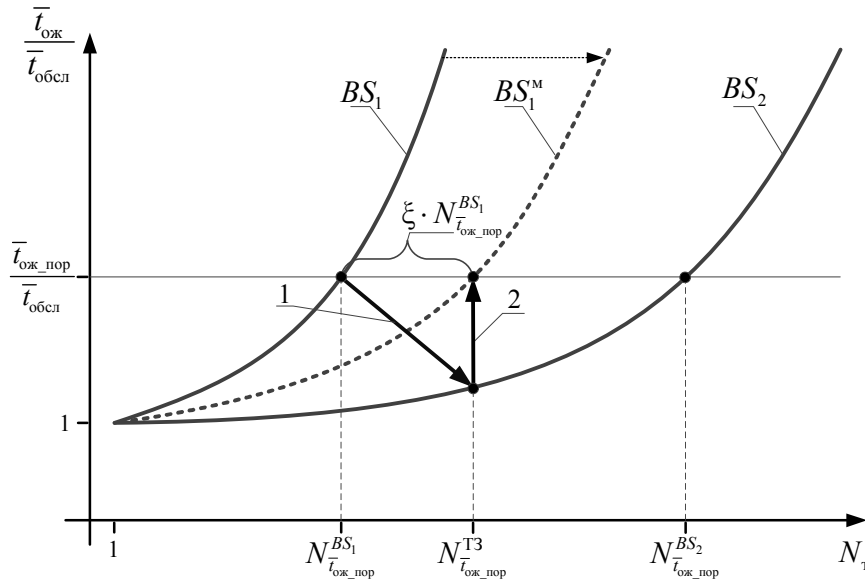


Рисунок 4.5.1 – Графики зависимостей $\frac{\bar{t}_{ож}}{\bar{t}_{обсл}} = f(N_T)$: BS_1 – однообъектовая МРИУС; BS_1^M – однообъектовая МРИУС, реализующая метод повышения оперативности; BS_2 – многообъектовая МРИУС с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК; 1 – реализация требований ТЗ посредством перехода на многообъектовую структуру с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК; 2 – переход к однообъектовой аппаратной структуре, реализующей метод повышения оперативности

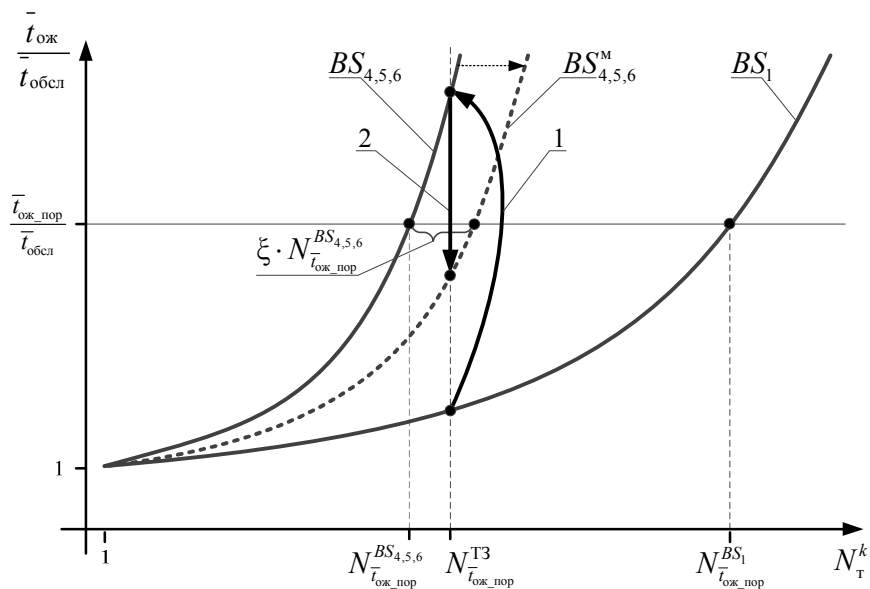


Рисунок 4.5.2 – Графики зависимостей $\frac{\bar{t}_{ож}}{\bar{t}_{обсл}} = f(N_T^k)$: BS_1 – однообъектовая МРИУС; $BS_{4,5,6}$ – многообъектовая МРИУС с внутренним разделением каналов; $BS_{4,5,6}^M$ – многообъектовая МРИУС, реализующая метод повышения оперативности; 1 – переход на многообъектовую структуру с внутренним разделением каналов; 2 – переход на многообъектовую структуру, реализующую метод повышения оперативности

Таким образом, для рассматриваемого случая реализация МРИУС на основе многообъектовой базовой структуры с индивидуальными каналами и идентичными ОУиК обладает функциональной избыточностью по отношению к заданным требованиям (переход, обозначенный цифрой 1). Представленные в параграфах 4.2–4.3 методы обеспечивают возможность увеличения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей в однообъектовой МРИУС на величину $\xi \cdot N_{pq}^{оп}$ (см. выражение (4.2.7)), соответственно, их применение позволяет реализовать в ряде случаев заданные требования к оперативности, исключая необходимость перехода на более «ресурсозатратную» структуру аппаратного построения МРИУС (см. рисунок 4.5.1, выражения (4.5.2), (4.5.3)), и тем самым повысить технический уровень МРИУС посредством сокращения затрат на аппаратное обеспечение (переход, обозначенный цифрой 2).

Рассмотрим следующий пример, в рамках которого по результатам синтеза аппаратно-программного обеспечения на основе однообъектовой базовой структуры, полученная МРИУС обладает функциональной избыточностью по отношению к заданным требованиям в ТЗ, то есть $N_{\bar{t}_{ож_пор}}^{ТЗ} < N_{\bar{t}_{ож_пор}}^{BS_1}$. В данном случае является целесообразным рассмотреть возможности комплексирования нескольких МРИУС на основе многообъектовой базовой структуры с внутренним разделением каналов (см. п. 3.1), имеющей меньшие приведенные затраты на аппаратное обеспечение (см. выражения (4.5.3) – (4.5.5)). В данной системе при одновременной работе разных «функциональных групп» терминалов пользователей на одном временном интервале число обслуживаемых терминалов пользователей МРИУС увеличивается относительно однообъектовой системы и определяется в соответствии с выражением

$$N_T = \sum_{k=1}^{K^{вид}} N_T^k, \quad (4.5.6)$$

где N_T^k – число терминалов пользователей, имеющих функциональную принадлежность к соответствующему объекту управления и контроля ОУиК^k, где $k = 1, 2, \dots, K^{вид}$.

На рисунке 4.5.2 схематично представлены совмещенные нормированные зависимости среднего времени ожидания результатов измерения для однообъектовой МРИУС и многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов от числа терминалов пользователей N_T^k при $K^{вид} = 2$ и $N_T^1 = N_T^2$. Соответствующий переход от однообъектовой базовой структуры к многообъектовой с внутренним разделением

каналов обозначен цифрой 1. Увеличение числа обслуживаемых терминалов пользователей МРИУС в $K^{\text{Вид}} = 2$ раза приводит к увеличению величины $\bar{t}_{\text{ож}}$ (см. п. 3.4), новое значение которого в общем случае может не удовлетворять заданным требованиям ТЗ к $\bar{t}_{\text{ож,пор}}$ (см. рисунок 4.5.2).

Применение метода распараллеливания функциональных операций в многообъектовых МРИУС позволяет увеличить общее число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей на величину $\xi \cdot N_{pq}^{\text{оп}}$ (см. п. 4.4), тем самым обеспечивая возможность выполнения заданных требований ТЗ на основе комплексирования нескольких ОУиК в составе многообъектовой МРИУС с внутренним разделением каналов. Соответствующий переход между рассматриваемыми структурами аппаратного построения МРИУС на рисунке 4.5.2 обозначен цифрой 2. В свою очередь, данное техническое решение позволяет в ряде случаев сократить затраты на реализацию аппаратного обеспечения МРИУС (см. выражения (4.5.1), (4.5.3)–(4.5.5)).

Обобщенная схема возможных переходов между базовыми структурами аппаратного построения МРИУС в процессе разработки проектных решений приведена на рисунке 4.5.3, где вектор \vec{M} обобщенно характеризует применение рассмотренных в параграфах 4.2–4.4 методов повышения оперативности функционирования.

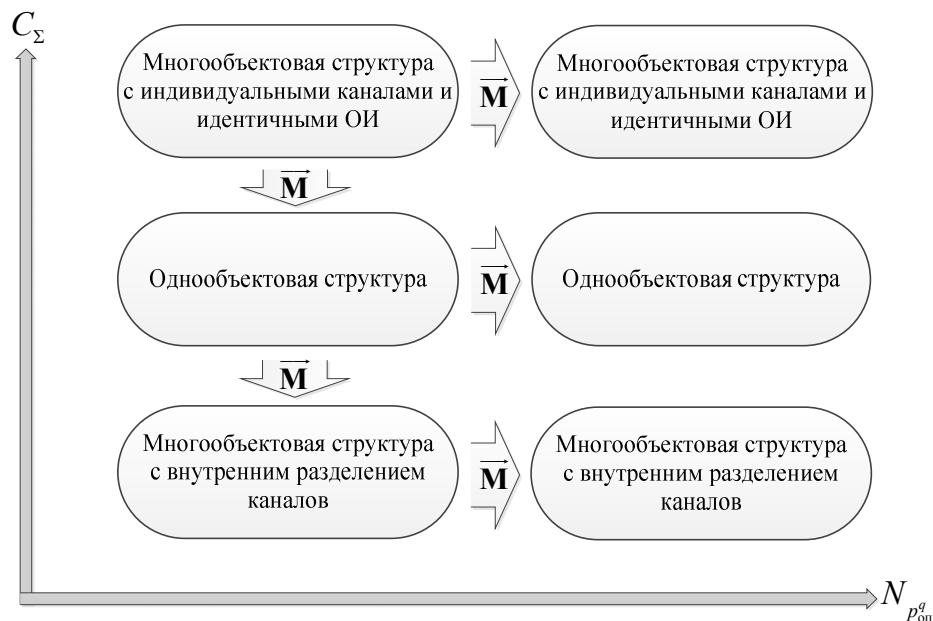


Рисунок 4.5.3 – Схема возможных переходов между базовыми структурами аппаратного построения МРИУС, обусловленных применением разработанных методов повышения оперативности функционирования в процессе разработки МРИУС

Целесообразность переходов между базовыми аппаратными структурами МРИУС, рассмотренных на рисунке 4.5.3, зависит от затрат на аппаратное обеспечение, затрат на доработку программного обеспечения и соответствующего им приращения технического уровня МРИУС (см. выражение (2.3.1)). Рассмотрим произвольное проектное решение МРИУС. Введем следующие обозначения:

α_T – относительное изменение числа терминалов пользователей, обусловленное реализацией произвольного комплекса мероприятий, направленных на повышение технического уровня МРИУС (применение методов повышения оперативности, сокращение затрат на аппаратную реализацию и прикладное программное обеспечение, изменение аппаратной структуры построения и пр.):

$$\alpha_T = \frac{N_{pq}^M - N_{pq}^{оп}}{N_{pq}^{оп}}; \quad (4.5.7)$$

β_C – относительное изменение материальных затрат, связанное с реализацией соответствующего комплекса мероприятий:

$$\beta_C = \frac{C_{\Sigma}^M - C_{\Sigma}}{C_{\Sigma}}, \quad (4.5.8)$$

где $N_{pq}^{оп}$, N_{pq}^M – число терминалов пользователей в исходной и модифицированной МРИУС соответственно, обслуживание которых выполняется с заданной оперативностью; C_{Σ}^M , C_{Σ} – затраты на реализацию исходной и модифицированной МРИУС.

Технический уровень МРИУС, модифицированной в результате реализации комплекса мероприятий, в соответствии с (2.3.10), (4.5.7), (4.5.8) определяется следующим образом:

$$\eta^M = \frac{N_{pq}^M \cdot C_1}{\delta \cdot C_{\Sigma}^M} = \frac{(1 + \alpha_T) \cdot N_{pq}^{оп} \cdot C_1}{\delta \cdot (1 + \beta_C) \cdot C_{\Sigma}}, \quad (4.5.9)$$

где η^M – технический уровень модифицированной МРИУС.

Таким образом, относительное приращение технического уровня МРИУС при реализации анализируемого комплекса мероприятий, характеризующее их эффективность, в общем виде описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} \varsigma &= \frac{\eta^M - \eta}{\eta} = \frac{\eta^M}{\eta} - 1 = \frac{(1 + \alpha_T) \cdot N_{p_q^{op}} \cdot C_1}{\delta \cdot (1 + \beta_C) \cdot C_\Sigma} \cdot \frac{\delta \cdot C_\Sigma}{N_{p_q^{op}} \cdot C_1} - 1 = \\ &= \frac{1 + \alpha_T}{1 + \beta_C} - 1. \end{aligned} \quad (4.5.10)$$

Выполнение рассматриваемого комплекса мероприятий является эффективным при соблюдении условия $\varsigma > 0$, что обеспечивается при соотношении:

$$\alpha_T > \beta_C. \quad (4.5.11)$$

Условие, определяемое в общем виде выражением (4.5.11), является критерием оценки целесообразности реализации анализируемого комплекса мероприятий с точки зрения обеспечения повышения технического уровня МРИУС.

Например, при реализации рассмотренных на рисунках 4.5.1 и 4.5.2 соответствующих переходов выполнение условия, заданного выражением (4.5.11), обеспечивается при относительном приращении числа терминалов пользователей в МРИУС, большем, чем обусловленное данными переходами увеличение затрат на создание МРИУС.

Рассмотрим подробно выражение (4.5.10). При сокращении затрат в целом на реализацию МРИУС число обслуживаемых терминалов пользователей остается без изменения ($\alpha_T = 0$), а соответствующее изменение технического уровня МРИУС зависит только от значения β_C . В случае когда, например, при реализации приведенных в параграфах 4.2–4.4 методов не выполняется переход на другую структуру аппаратного построения МРИУС, приращение числа обслуживаемых терминалов пользователей характеризуется переменной ξ (см. выражение 4.2.7), то есть $\alpha_T = \xi$. При этом величина β_C соответствует относительным затратам на доработку диспетчера разделяемого ресурса МРИУС. При повышении уникальности и стоимости используемых в качестве разделяемого ресурса МРИУС объектов управления и контроля и соответствующих им каналов управления и измерения затраты на модификацию алгоритма диспетчеризации, реализуемого диспетчером разделяемого ресурса МРИУС (см. рисунки 1.2.1, 4.2.3, 4.3.2, 4.4.3), являются пренебрежительно малыми по сравнению с величиной C_Σ . Таким образом, можно принять, что $\beta_C \approx 0$.

В соответствии с вышеизложенным выражение (4.5.10) можно представить в следующем виде:

$$\zeta = \frac{1 + \alpha_T}{1 + \beta_C} - 1 = \frac{1 + \xi}{1 + \beta_C} - 1 \approx \xi, \text{ при } C_{\Sigma}^M \approx C_{\Sigma}. \quad (4.5.12)$$

Для рассмотренного случая эффективность применения приведенных в параграфах 4.2–4.4 методов повышения оперативности в целях повышения технического уровня МРИУС является приблизительно равной отношению приращению числа терминалов пользователей ξ , обеспечиваемому данными методами. Соответствующие графики рассчитанных зависимостей ξ для ряда примеров МРИУС приведены в параграфах 4.2–4.4.

Таким образом, включение в состав предложенной методологии проектирования МРИУС разработанных методов (см. п. 4.2–4.4) обеспечивает возможность увеличения в несколько раз числа проектных решений МРИУС, синтезируемых в соответствии с заданными требованиями ТЗ к оперативности функционирования. Полученное выражение (4.5.10) характеризует в общем виде приращение технического уровня, обусловленное реализацией комплекса целевых мероприятий (в том числе рассмотренных в п. 4.2–4.4) на этапах разработки МРИУС. Методика проектирования МРИУС рассматривается в главе 5.

4.6 Выводы по главе 4

1. Предложен метод сбора и накопления апостериорной информации о соответствии длительностей выполняемых функциональных операций значениям параметров конфигурации и измерения для формируемых пользователями заданий. Метод реализуется в процессе эксплуатации МРИУС по ее целевому назначению на основе разработанного дополнительного программного модуля. Применение данного подхода целесообразно в МРИУС, для которых в рамках методики оценки параметров реализуемого сценария диалога выявление полного объема соответствующих данных на этапе разработки их проектных решений технически затруднено и/или нецелесообразно.

2. Разработан ряд методов повышения оперативности функционирования МРИУС (метод оптимизации операций управления, метод временного разделения многократных измерений, метод распараллеливания функциональных операций), которые отличаются от известных тем, что основаны на особенностях работы их разделяемых ресурсов как АСЭИ. Данные методы позволяют увеличить число

обслуживаемых терминалов пользователей на величину до 30 % и более посредством управления доступом к разделяемому ресурсу в соответствии выделенными особенностями аппаратного построения и/или выполняемых заданий в МРИУС.

3. Для предложенных методов повышения оперативности функционирования разработаны блок-схемы алгоритмов работы диспетчера разделяемого ресурса, реализующие их совместно с фоновым накоплением длительностей функциональных операций; на примере ряда исходных данных исследованы средствами математического моделирования зависимости относительного приращения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей. Способы функционирования МРИУС, реализующие разработанные методы, защищены рядом патентов РФ на изобретение.

4. Предложен обобщенный подход к анализу эффективности реализации комплекса произвольных мероприятий, направленных на повышение технического уровня МРИУС и включающих в себя, в том числе предложенные методы повышения оперативности функционирования. В обобщенном виде рассмотрены направления перехода в процессе разработки проектных решений к менее *ресурсозатратным* структурам аппаратного построения МРИУС посредством реализации разработанных методов.

5. Сформулирован в общем виде критерий оценки целесообразности реализации комплекса целевых мероприятий повышения технического уровня МРИУС с точки зрения затрат на их выполнение. Показано, что для предложенных методов при материальных затратах на модификацию алгоритма диспетчеризации, пренебрежительно малыми по сравнению в целом с затратами на МРИУС, их эффективность в пределе стремится к значению обеспечиваемого ими относительного приращения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей.

6. Включение в состав методологии проектирования предложенных методов повышения оперативности МРИУС и реализующих их алгоритмов диспетчеризации разделяемого ресурса расширяет в несколько раз число возможных вариантов проектных решений, синтезируемых в целях выполнения заданных требований ТЗ.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА СОСТАВА БАЗЫ ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МРИУС

В целях аккумуляции и систематизации опыта разработки образцов МРИУС, обеспечения функциональной, конструктивной взаимозаменяемости и преемственности, а также сокращения в дальнейшем сроков решения проектных задач в состав разработанной в диссертации методологии вошла база данных инженерных решений МРИУС, обеспечивающая накопление и хранение полученных данных, а также информационную поддержку принятия решений на их основе в процессе разработки МРИУС.

В состав базы данных инженерных решений МРИУС вошли: базовые структуры аппаратного построения МРИУС и алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса, разработанные и рассмотренные ранее в диссертации (см. п. 3.1, 4.2–4.4); базовое измерительное обеспечение МРИУС; базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя. В базу данных также включены варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС и сведения о длительностях выполняемых функциональных операций на их основе, накапливаемые в результате проектной деятельности и эксплуатации (см. выражение (3.3.4)).

Базовое измерительное обеспечение МРИУС, представленное алгоритмами спектрального измерения параметров сигналов, их реализующими подпрограммами, исследовательским аппаратно-программным комплексом и комплексом базовых унифицированных виртуальных приборов, рассматривается в параграфе 5.1, базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя описываются в параграфе 5.2. Методика формирования базы данных инженерных решений МРИУС для поддержки процесса разработки МРИУС, включающая в свой состав перечисленные компоненты, приводится в параграфе 5.3.

Методика проектирования МРИУС на основе разработанных в диссертации методов, моделей, методик и базы данных инженерных решений, а также методика адаптации разработанных образцов МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации рассматриваются в параграфах 5.4 и 5.5 соответственно.

5.1 Разработка базового измерительного обеспечения МРИУС

Реализации высокоинформативных и точных методов измерения в измерительных каналах МРИУС в должной мере способствуют мощные вычислительные ресурсы и быстродействие современных ЭВМ [451]. К таким методам относятся методы, основанные на цифровой спектрально-весовой обработке сигналов [340]. Общими задачами, решаемыми спектрально-весовыми методами в МРИУС, в том числе в условиях наложения шумов и помех, являются измерения базовых параметров гармонических и полигармонических сигналов: частоты, амплитуды, начальной фазы (разности фаз при двухканальных измерениях), несущих информацию о параметрах и характеристиках объектов управления и контроля или исследуемых физических процессах (см. п. 1.2.1).

Оценка параметров сигналов в МРИУС выполняется как для сигналов, являющихся откликами объектов управления и контроля на формируемые тестовые воздействия с точно известными и/или измеренными параметрами, так и в случаях, когда параметры тестовых сигналов и измеряемых сигналов известны приближенно [88, 121, 123, 152]. Систематизированные, исследованные и апробированные в рамках диссертационной работы базовые алгоритмы измерения и повышения точности оценок параметров сигналов, вошедшие в состав разработанной методологии проектирования МРИУС (см. рисунок 2.5.1), кратко приводятся далее [288].

5.1.1 Базовые алгоритмы спектрального измерения параметров сигналов в МРИУС

Специфика выполнения конфигурационных и измерительных заданий в интерактивном диалоговом режиме в МРИУС (см. п. 1.2.1) обуславливает необходимость проведения совместных измерений параметров сигналов по их оцифрованным реализациям конечной длины. При этом возможная некрatность времени измерения и периода измеряемого сигнала приводит к методической погрешности измерений, вызываемой спектральной утечкой [288, 340].

Спектральные измерения параметров сигналов в МРИУС выполняются по частотным выборкам дискретного преобразования Фурье (ДПФ) реализации сигнала $x(n)$, дискретизированной с частотой дискретизации f_d и взвешенной весовой функцией

(ВФ) $w(n)$, $n = 0, 1, \dots, N_{\text{от}} - 1$, и основываются на зависимости амплитуд частотных выборок ДПФ, ближайших к частоте сигнала, от его частоты, а также связи амплитуд частотных выборок с частотной характеристикой весовой функции [341].

Рассмотрим реализацию *вещественного гармонического сигнала* $x(n)$ конечной длины $N_{\text{от}} - 1$, полученную на измерительно-управляющей ЭВМ в результате оцифровки считываемого с объекта управления и контроля сигнала с использованием средств канала измерения МРИУС (см. рисунок 1.2.1). Ей соответствуют комплексные частотные выборки $X(jk)$, $k = 0, 1, \dots, N_{\text{от}} - 1$, вычисленные на основе ДПФ результата ее взвешивания весовой функцией $w(n)$ [288]. Оценка частоты гармонического сигнала при некогерентных измерениях выполняется посредством измерения нормированной частоты θ_c , которая выражается в бинах ДПФ на основе следующего выражения:

$$\theta_c = \frac{f_c}{f_d/N_{\text{от}}} = \mathbf{k} + \alpha, \quad (5.1.1)$$

где f_c – частота сигнала; f_d – частота дискретизации; $N_{\text{от}}$ – длина реализации оцифрованного сигнала; \mathbf{k} и α – целое число и дробная часть соответственно числа периодов сигнала на считанной реализации длиной $N_{\text{от}}$.

Значение \mathbf{k} определяется как номер частотной выборки ДПФ наибольшей амплитуды. Значение α ($-0,5 \leq \alpha \leq 0,5$) оценивается в соответствии с одним из следующих алгоритмов [288]:

- *алгоритм измерения № 1* – на основе функциональной связи отношений амплитуд частотных выборок ДПФ с частотной характеристикой ВФ;
- *алгоритм измерения № 2* – на основе интерполяции частотной характеристики ВФ по измеренным значениям амплитуд частотных выборок ДПФ, смещенной к частоте сигнала.

В соответствии с алгоритмом измерения на основе отношения частотных выборок (*алгоритм измерения № 1*) значение дробной части нормированной частоты сигнала α определяется посредством решения уравнения [288, 341]:

$$R_{k\pm 1} = \frac{W(1 - \alpha)}{W(\alpha)}, \quad (5.1.2)$$

где $W(1 - \alpha)$, $W(\alpha)$ значения частотной характеристики ВФ $W(\theta)$ на частотах $\theta = 1 - \alpha$ и $\theta = \alpha$; $R_{k\pm 1}$ – измеренное отношение амплитуд соседних частотных выборок ДПФ, ближайших к частоте сигнала:

$$R_{k\pm 1} = \frac{\max(X_{k-1}, X_{k+1})}{X_k}, \quad (5.1.3)$$

где X_{k-1} , X_k , X_{k+1} – амплитуды соответствующих частотных выборок ДПФ сигнала.

Решению уравнения (5.1.2) соответствует измеренное значение дробной частоты сигнала $\alpha_{и}$. В общем случае решение уравнения (5.1.2) и определение соответствующего значения $\alpha_{и}$ для конкретной весовой функции выполняется на основе вычислительных методов посредством табулирования функции $W(\theta)$ [244, 288].

Оценка частоты на основе интерполяционного алгоритма (*алгоритм измерения № 2*) выполняется по трем измеренным частотным выборкам ДПФ сигнала на основе одного из следующих выражений:

- для ступенчатой интерполяции частотной характеристики ВФ

$$\alpha_{и(с)} = \frac{X_{k+1} - X_{k-1}}{X_{k-1} + X_k + X_{k+1}}; \quad (5.1.4)$$

- для параболической интерполяции частотной характеристики ВФ

$$\alpha_{и(п)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{X_{k-1} - X_{k+1}}{X_{k-1} - 2 \cdot X_k + X_{k+1}}; \quad (5.1.5)$$

- для логарифмической параболической интерполяции частотной характеристики ВФ

$$\alpha_{и(пл)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln X_{k+1} - \ln X_{k-1}}{\ln X_{k-1} - 2 \ln X_k + \ln X_{k+1}}. \quad (5.1.6)$$

При этом следует отметить, что оценки частоты сигнала на основе выражений (5.1.4)–(5.1.6) дополнительно содержат методическую *погрешность интерполяции*, которая зависит от способа используемой интерполяции и вида ВФ. Подробно методы и алгоритмы коррекции методической *погрешности интерполяции* рассмотрены в работе [288].

Измеренное значение частоты сигнала f_c^n определяется на основе измеренного значения нормированной частоты $\theta_c^n = k + \alpha_{и}$ (см. выражения (5.1.2), (5.1.4)–(5.1.6)) следующим образом:

$$f_c^и = \frac{f_d}{N_{от}} \cdot \theta_c^и = \frac{f_d}{N_{от}} \cdot (\mathbf{k} + \alpha_и). \quad (5.1.7)$$

На основе полученных значений \mathbf{k} и $\alpha_и$ определяются базовые оценки амплитуды и начальной фазы сигнала:

$$Xm_и = X_k / (N_{от} \cdot W(\alpha_и)), \quad (5.1.8)$$

$$\varphi_и = \arg[X(j\mathbf{k})] + \pi \cdot (0,5 - \alpha_и), \quad (5.1.9)$$

где $Xm_и$ и $\varphi_и$ – измеренные значения амплитуды и начальной фазы сигнала; X_k – амплитуда \mathbf{k} -й частотной выборки ДПФ реализации сигнала; $\arg[X(j\mathbf{k})]$ – аргумент соответствующей комплексной частотной выборки ДПФ реализации сигнала.

Общей для рассмотренных алгоритмов измерения частоты гармонического сигнала является методическая погрешность наложения $\Delta\alpha_н = \alpha_и - \alpha$, которая обусловлена наложением зеркальной компоненты спектра на используемые для оценки частотные выборки вследствие ее прохождения через боковые лепестки частотной характеристики ВФ [340–344]. Коррекция данной погрешности осуществляется посредством выполнения вторичной программной обработки считанной реализации сигнала на основе полученных первичных оценок его параметров (выражения (5.1.7)–(5.1.9)) с использованием следующих алгоритмов [288, 342, 343]:

- посредством изменения длины обрабатываемой реализации сигнала $N_{от}$ на значение $N_{от}^*$ ($N_{от}^* < 1,5 \cdot N_{от}$), соответствующее приблизительно целому числу периодов сигнала, в целях приведения первичной оценки $\alpha_и$ к нулю (*алгоритм коррекции № 1*);
- посредством изменения длины обрабатываемой реализации сигнала $N_{от}$ на значение $N_{от}^*$ ($N_{от}^* < 1,5 \cdot N_{от}$) в целях приведения первичной оценки $\alpha_и$ к значению, соответствующему начальной фазе сигнала, при которой погрешность наложения оценки α минимальна (*алгоритм коррекции № 2*);
- посредством сложения ДПФ взвешенной считанной реализации сигнала $x(n)$ и ДПФ компенсирующего взвешенного комплексного гармонического сигнала $x_{комп}(n)$, синтезируемого на основе полученных первичных оценок (выражения (5.1.7)–(5.1.9)) с последующим нахождением уточненных оценок параметров сигнала на основе результирующего спектра $X_{рез}(jk)$ (*алгоритм коррекции № 3*):

$$x_{\text{КОМП}}(n) = \frac{Xm_{\text{и}}}{2} \cdot e^{\left\{-j \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{от}}}(k_{\text{п}} + \alpha_{\text{и}}) \cdot n + \varphi_{\text{и}} + \frac{\pi}{2}\right\}}; \quad (5.1.10)$$

$$X_{\text{КОМП}}(jk) = \sum_{n=0}^{N_{\text{от}}-1} x_{\text{КОМП}}(n) \cdot w(n) \cdot e^{-j \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{от}}} \cdot k}; \quad (5.1.11)$$

$$X_{\text{рез}}(jk) = X(jk) + X_{\text{КОМП}}(jk); \quad (5.1.12)$$

- посредством умножения взвешенной реализации сигнала $x(n)$ на комплексный гармонический сигнал $x^*(n) = e^{j \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{от}}} \cdot \alpha_{\text{и}} \cdot n}$ в целях подавления зеркальной компоненты исходного спектра сигнала, которая в результате умножения смещается к области ближайшего нуля частотной характеристики ВФ, с последующим нахождением уточненных оценок параметров сигнала на основе ДПФ результирующего произведения (*алгоритм коррекции № 4*).

В целях повышения точности измерения параметров сигнала рассмотренные алгоритмы коррекции погрешности наложения могут быть реализованы многократно для одной и той же считанной реализации сигнала $x(n)$. Применение данных алгоритмов обеспечивает уменьшение погрешности наложения при измерении параметров сигналов в 10 и более раз относительно их базовых оценок [288].

Аналогичным образом с использованием данных алгоритмов измерения и коррекции соответствующих методических погрешностей (выражения (5.1.2)–(5.1.9)) в МРИУС выполняется измерение параметров основной и высших гармоник для полигармонических сигналов. Для данных сигналов погрешность наложения вызывается большим числом спектральных составляющих, что обуславливает увеличение реализуемых циклов ее коррекции [288]. На основе измеренных значений частоты, амплитуды и фазы сигналов (разности фаз при двухканальных измерениях) рассчитываются параметры и характеристики объектов управления и контроля или исследуемых процессов, которые впоследствии отображаются средствами *графического интерфейса пользователя* МРИУС (см. выражение (2.1.24)).

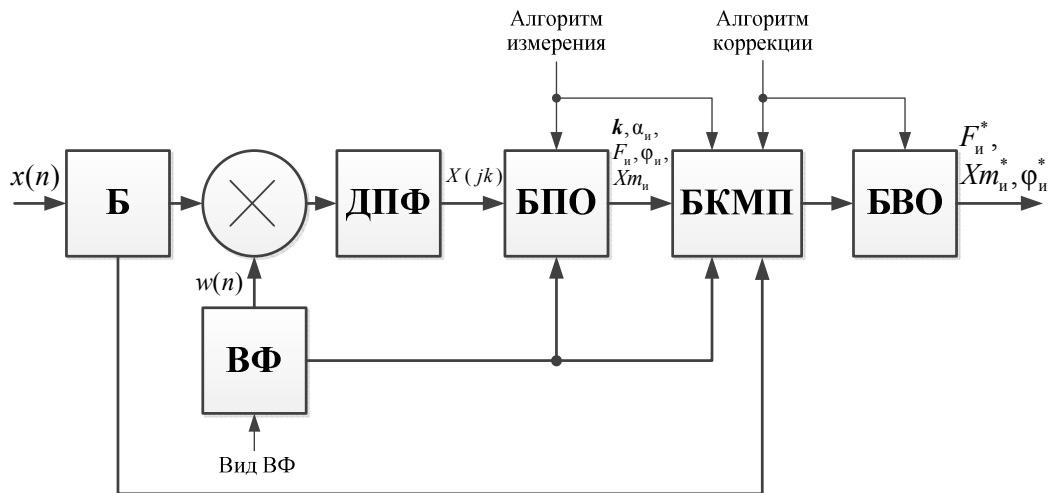
Аппаратно-программная реализация алгоритма измерения по отношению частотных выборок (выражение (5.1.2)) обуславливает необходимость вычисления частотных характеристик ВФ, а при использовании интерполяционного алгоритма (выражения (5.1.4)–(5.1.6)) необходимо выполнение коррекции соответствующей

методической погрешности интерполяции. Алгоритмы коррекции погрешности наложения № 1 и № 2 реализуются на основе считанной реализации сигнала длиной $1,5 \cdot N_{от}$ и предусматривают необходимость повторной обработки весовой функцией и последующего вычисления ДПФ для реализации сигнала новой длины $N_{от}^*$.

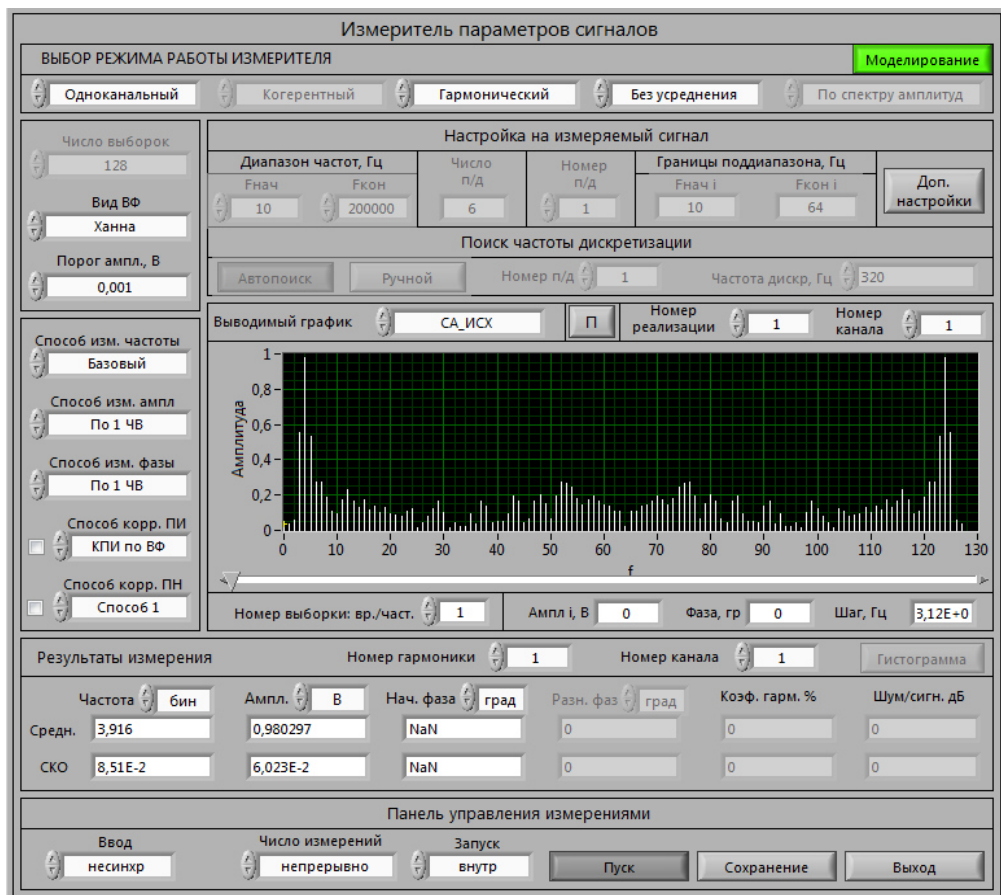
Таким образом, каждое сочетание применяемых в процессе разработки аппаратно-программного обеспечения МРИУС алгоритмов измерения параметров сигналов и коррекции их методических погрешностей (погрешностей интерполяции и/или погрешности наложения) характеризуется соответствующими длительностью обрабатываемой реализации сигнала, вычислительной сложностью и достигаемой точностью. Подробно результаты исследования алгоритмов измерения параметров сигналов (в том числе при известном значении частоты) значения методических погрешностей измерения, особенности проведения измерений при воздействии шума и оценки соответствующих случайных погрешностей спектрального измерения параметров гармонических и полигармонических сигналов подробно описаны в работах [270, 288, 342–348]. Реализация усреднений в МРИУС при измерениях в шумах, также может быть выполнена средствами *графического интерфейса пользователя* в соответствии с подходом, рассмотренным в параграфе 4.3.

В целях исследования точности измерения параметров сигналов на основе данных алгоритмов, а также оценки соответствующих им длительностей функциональных операций измерения разработан *исследовательский аппаратно-программный комплекс спектрально-весового измерения параметров сигналов* на базе ПЭВМ, включающий в свой состав: синтезатор тестовых сигналов, измеритель параметров гармонических и полигармонических сигналов, аппаратные средства формирования и оцифровки сигналов.

Обобщенная структурная схема разработанного измерителя параметров сигналов, реализующего рассмотренные алгоритмы измерения, и его лицевая панель управления приведены на рисунке 5.1.1. Управление выбором используемого алгоритма измерения амплитуды, частоты и начальной фазы (разности фаз при двухканальных измерениях) гармонических и полигармонических сигналов производится посредством соответствующих настроек, выполняемых на основе лицевой панели управления (см. рисунок 5.1.1, а).



а



б

Рисунок 5.1.1 – Измеритель параметров сигналов исследовательского комплекса спектрально-взвешенного измерения параметров сигналов на базе ПЭВМ: а – обобщенная структурная схема:

Б – буфер; **ВФ** – блок расчета реализации весовой функции; **ДФФ** – блок дискретного преобразования Фурье; **БПО** – блок первичных оценок параметров сигнала; **БКМП** – блок коррекции методической погрешности; **БВО** – блок вторичных оценок параметров сигнала;

б – лицевая панель управления

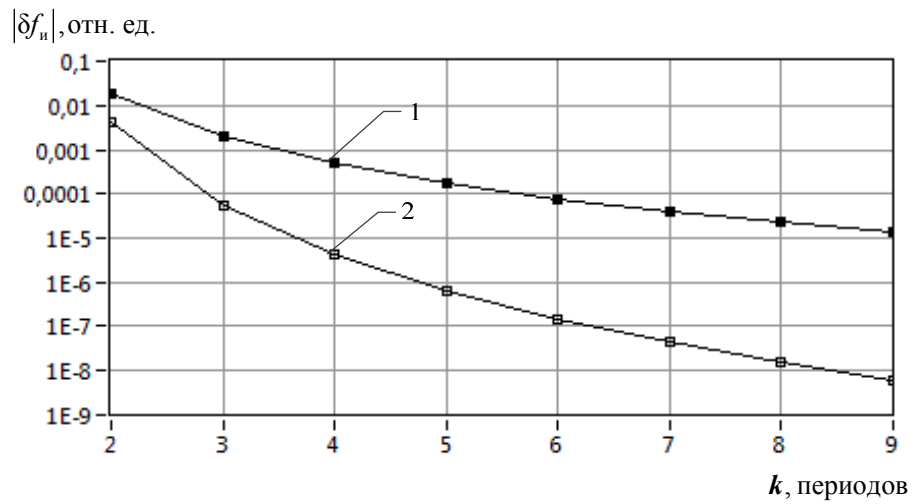
Обработка сигнала в соответствии с рассмотренными алгоритмами включает в свой состав следующие базовые операции:

- запись оцифрованной реализации сигнала $x(n)$ в буфер длиной, большей $N_{от}$ (блок **Б**);
- взвешивание реализации сигнала во временной области посредством умножения на соответствующую весовую функцию конечной длины, равной длине обрабатываемой реализации сигнала $x(n)$ (блок **ВФ**);
- вычисление комплексных частотных выборок ДПФ $X(jk)$ (блок **ДПФ**);
- первичная оценка частоты и других параметров сигналов в соответствии с рассмотренными алгоритмами (выражения (5.1.2)–(5.1.9)) (**БПО**);
- коррекция методических погрешностей измерения (**БКМП**);
- уточнённая оценка параметров сигнала (**БВО**).

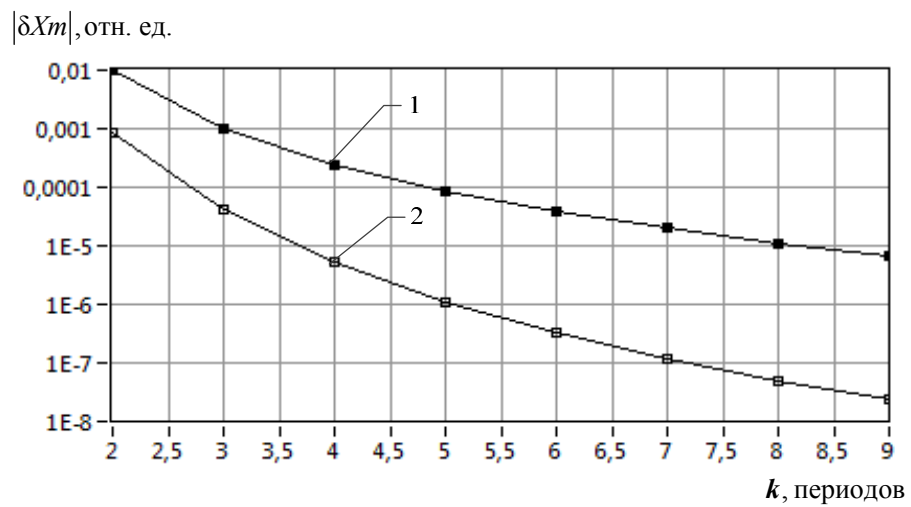
Блок коррекции методических погрешностей (**БКМП**) включает в свой состав блоки коррекции методических погрешностей интерполяции и погрешности наложения (алгоритмы коррекции № 1–№ 4). На основе результата коррекции методических погрешностей, выполняемой в блоке **БКМП**, в блоке вторичной оценки параметров сигнала (**БВО**) выполняется оценка уточнённых значений измеряемых параметров сигнала – f_i^* , Xm_i^* , φ_i^* .

Функциональные возможности разработанного измерителя позволяют оценить длительности выполнения функциональных операций измерения (см. п. 3.3) как на основе моделирования (оценка затрат машинного времени на выполнение алгоритмов), так и для реальных измерений, выполняемых на основе многофункциональных устройств сбора данных, например серии M , X , S и др. и включающих в свой состав аналого-цифровое преобразование входных сигналов, их последующую вторичную обработку в соответствии с реализуемыми алгоритмами [265-268, 349]. Подробно математическое обеспечение и реализация измерителя рассмотрены в работах [288, 342, 343, 350].

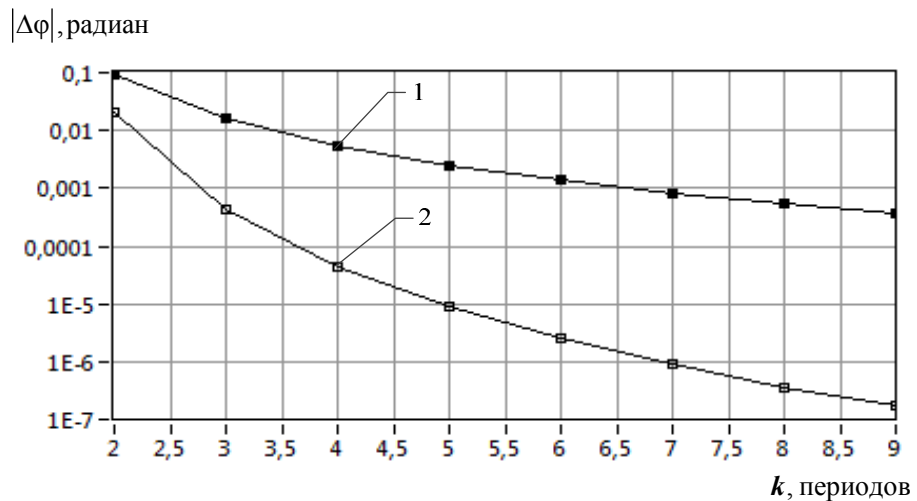
На рисунке 5.1.2 приведены графики зависимостей модулей погрешностей измерения частоты $\delta f_c = \frac{f_c^n - f_c}{f_c}$, амплитуды $\delta Xm = \frac{Xm_i - Xm}{Xm}$ и начальной фазы $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_i$ на примере чистого гармонического сигнала от числа периодов k для ВФ Ханна при $\alpha = -0,5$, $N_{от} = 128$ и начальной фазе сигнала $\varphi_i = -\pi\alpha$.



а



б



в

Рисунок 5.1.2 – Графики зависимостей относительных погрешностей измерения параметров гармонического сигнала на основе базовых оценок (1) и с коррекцией методической погрешности наложения (2): а – $|\delta f_c| = f(k)$; б – $|\delta X m_{и}| = f(k)$; в – $|\Delta\phi| = f(k)$

Данные графики получены средствами математического моделирования на основе разработанного исследовательского комплекса для алгоритма измерения частоты на основе отношения частотных выборок (*алгоритм изменения № 1*) и использованием одного цикла коррекции погрешности наложения (*алгоритм коррекции № 4*).

Приведенные зависимости показывают, что применение алгоритмов коррекции методической погрешности наложения, реализуемых средствами прикладного программного обеспечения измерительно-управляющей ЭВМ (см. рисунок 1.2.1 и выражения (2.1.21), (2.1.25)) при выполнении спектральных измерений параметров сигналов в МРИУС, позволяет уменьшить число оцифровываемых периодов сигнала в целях обеспечения заданной точности измерений его параметров и, как следствие, сократить для рассмотренного примера в *несколько раз* длительность соответствующей функциональной операции измерения. Применение полигармонических сигналов в качестве тестовых при экспериментальных исследованиях частотных характеристик объектов управления и контроля обеспечивает меньшие длительности выполняемых функциональных операций относительно метода измерения с последовательной перестройкой частоты генератора синусоидального сигнала [270, 286, 351].

Применение разработанного аппаратно-программного комплекса в рамках предложенной в диссертации методологии проектирования МРИУС позволяет осуществлять выбор используемых алгоритмов измерения параметров сигналов, длительность выполнения функциональных операций измерения в соответствии с которыми является минимальной при обеспечении заданных требований к точности измерения (см. выражения (2.1.2)–(2.1.5), п. 3.2)).

Исследованные и апробированные алгоритмы спектрально-весаого измерения параметров сигналов, их реализация в виде подпрограмм и разработанный исследовательский комплекс (см. рисунок 5.1.1) вошли в базу данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 2.5.1), информационный состав и методика формирования которой будут рассмотрены в параграфе 5.3.

5.1.2 Комплекс базовых унифицированных виртуальных приборов

На основе представленных в пункте 5.1.1 алгоритмов в рамках диссертации разработан комплекс базовых унифицированных виртуальных приборов на основе ЭВМ

и ряда многофункциональных устройств сбора данных *M*-, *X*-, *S*-, *USB*-серий компании *National Instruments* [265], обеспечивающий унификацию подходов и сокращение сроков разработки прикладного программного обеспечения в процессе создания образцов МРИУС. Программное обеспечение базовых унифицированных виртуальных приборов (УВП) выполнено в среде графического программирования *LabVIEW* в виде отдельных подпрограмм, предусматривающих возможность их модификации в соответствии с решаемыми на основе МРИУС измерительными задачами (см. выражения (2.1.2)–(2.1.5)) и последующей интеграции в состав прикладного программного обеспечения МРИУС (см. выражения (2.1.24), (2.1.25)) [287].

Модульность построения программного обеспечения разработанных приборов обеспечивает возможность применения в качестве средств измерения и формирования сигналов также многофункциональные устройства и модульные приборы сторонних производителей [266–268, 349] и пр.

В состав разработанного базового комплекса УВП вошли:

- многофункциональный синтезатор сигналов;
- анализатор сигналов;
- измеритель частотных характеристик;
- характериограф.

Программное обеспечение синтезатора сигналов характеризуется следующими функциональными возможностями:

- формирование тестовых сигналов различной формы (гармонические, импульсные, полигармонические) с изменяемыми значениями частоты, амплитуды, начальной фазы, скважности, числа гармоник;
- совместное формирование тестовых сигналов с наложенным шумом и смещением;
- реализацию функций управляемого источника постоянного напряжения;
- формирование импульсов синхронизации ввода/вывода с регулируемой задержкой и пр.

Функциональные возможности программного обеспечения анализатора сигналов:

- отображение, обработка и сохранение считанных реализаций измеряемых сигналов;

- измерение параметров сигнала (амплитуды, частоты и начальной фазы) на основе его считанной реализации (см. п. 5.1.1);
- измерение постоянного напряжения и силы тока;
- измерение параметров переходного процесса;
- анализ амплитудного и фазового спектров сигналов;
- измерение параметров спектральных составляющих (амплитуды, частоты и начальной фазы);
- изменение коэффициента гармоник сигнала и пр.

Функциональные возможности программного обеспечения измерителя частотных характеристик:

- измерение амплитудно-частотных, фазочастотных характеристик, характеристик группового времени запаздывания, зависимости комплексного коэффициента передачи на основе гармонического сигнала («вручную по точкам»), полигармонического сигнала или гармонического сигнала с автоматически перестраиваемой частотой (устанавливается на основе синтезатора сигналов);
- отображение и сохранение полученных зависимостей, проведение курсорных измерений и пр.

Функциональные возможности характериографа обеспечивают измерение вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов (диодов, стабилитронов, биполярных, полевых транзисторов и др). Подробно функциональные возможности, реализуемые алгоритмы синтеза и обработки сигналов, и технические характеристики разработанных приборов на примере их исполнения на основе многофункциональных устройств сбора данных *M*-серии компании *National Instruments* рассмотрены в работах [121, 270, 272, 286–288, 351].

Проектирование аппаратно-программного обеспечения МРИУС выполняется в соответствии с разработанной в рамках диссертации методикой, которая приведена в параграфе 3.2. На основе анализа комплекса решаемых измерительных задач **МТ** на этапе разработки аппаратно-программного обеспечения МРИУС рассматривается возможность применения разработанных приборов (см. рисунок 3.2.1) и/или их соответствующей модификации. Блок-схема алгоритма разработанной в диссертации методики модификации базовых унифицированных виртуальных приборов в обобщенном виде приведена на рисунке 5.1.3.

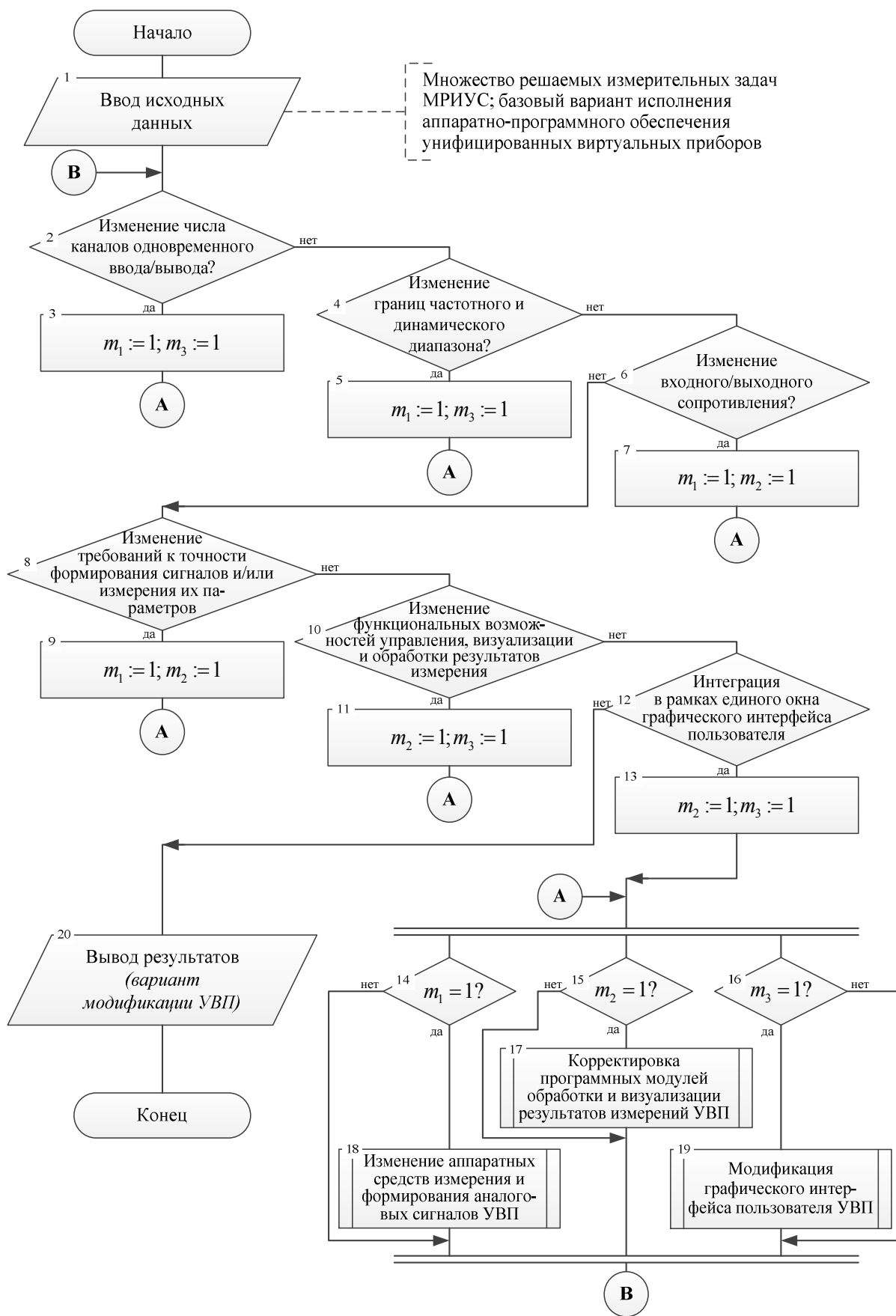


Рисунок 5.1.3 – Блок-схема алгоритма методики модификации базовых унифицированных виртуальных приборов

В качестве направлений, в рамках которых выполняется модификация и адаптация разработанных унифицированных виртуальных приборов в ходе процесса разработки МРИУС (см. рисунок 5.1.3), выделены следующие:

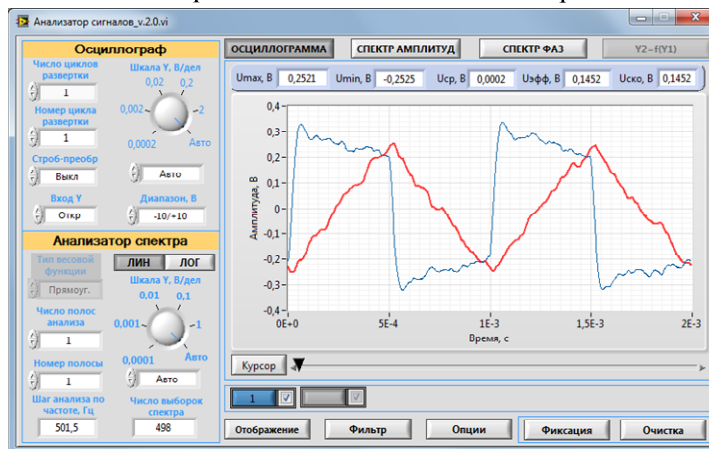
- изменение числа каналов одновременного аналогового ввода/вывода;
- изменение границ частотного диапазона, динамического диапазона измеряемых и/или формируемых аналоговых сигналов;
- изменение входного/выходного сопротивления каналов аналогового ввода/вывода;
- изменение требований к точности формирования сигналов и/или измерения их параметров;
- изменение функциональных возможностей визуализации и постобработки результатов измерения, управления формированием сигналов;
- интеграция в рамках единого окна *графического интерфейса пользователя* (см. п. 5.2) и т.д.

В ходе выполнения этапов представленной на рисунке 5.1.3 методики осуществляется последовательное определение необходимости модификации разработанных в диссертации базовых унифицированных виртуальных приборов в рамках выделенных направлений для решения заданных измерительных задач **МТ** (блоки 2–13) и реализация комплекса соответствующих мероприятий (блоки 14–19). Результаты модификации УВП включаются в состав соответствующего варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения r -й базовой структуры МРИУС – $HS_{v_r}^{BC}$, разрабатываемого на основе представленной в параграфе 3.2 методики.

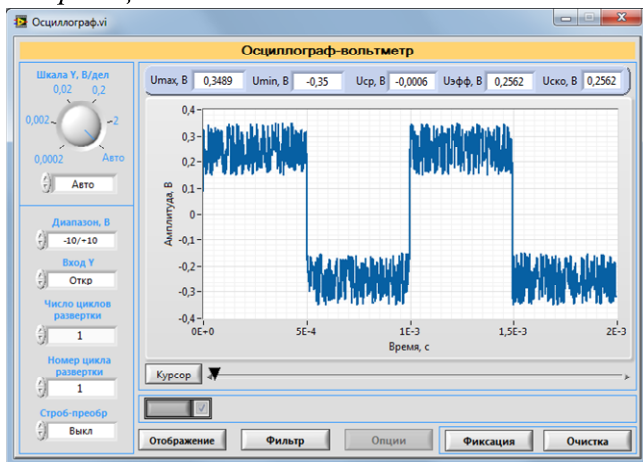
На рисунке 5.1.4 приведены примеры модификаций графического интерфейса базового анализатора сигналов, обеспечивающих различные функциональные возможности обработки и визуализации результатов измерений на примере ряда промышленных образцов МРУИС, полученных на основе разработанной в диссертации и представленной на рисунке 5.1.3 методики.

Разработанный комплекс УВП и его модификации успешно апробированы на базе многофункциональных устройств сбора данных M -серии в рамках эксплуатации ряда промышленных образцов МРИУС [352–360].

Базовый вариант исполнения анализатора сигналов



Модификация № 1



Модификация № 2

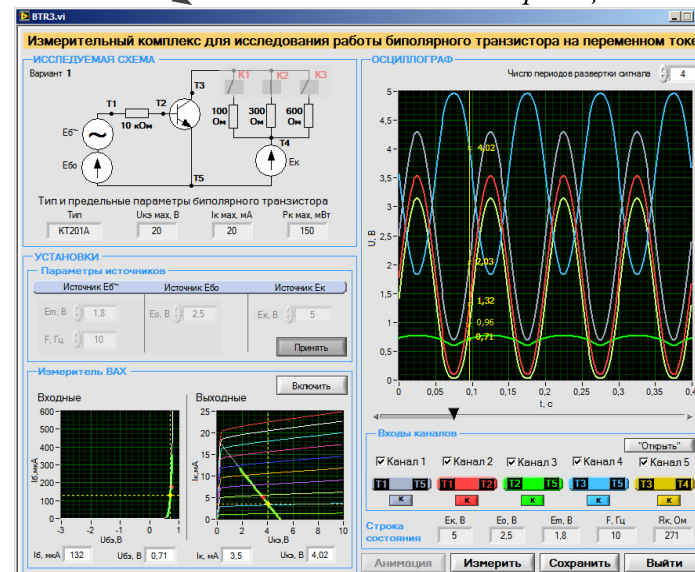


Рисунок 5.1.4 – Примеры вариантов модификации базового исполнения анализатора сигналов:

модификация № 1 – упрощение функциональных возможностей;

модификация № 2 – интеграция многоканального варианта исполнения в составе единого окна графического интерфейса пользователя

Разработанное в диссертации базовое измерительное обеспечение МРИУС обобщенно описывается кортежем

$$\mathbf{BMS} = \langle \mathbf{A}^{\text{ИЗ}}, \mathbf{S}^{\text{ИЗ}}, \mathbf{HS}^{\text{ИПС}}, \mathbf{HS}^{\text{УВП}} \rangle, \quad (5.1.13)$$

где $\mathbf{A}^{\text{ИЗ}}$ – множество алгоритмов спектрально-весаого измерения параметров сигналов (см. п. 5.1.1); $\mathbf{S}^{\text{ИЗ}}$ – множество подпрограмм, реализующих алгоритмы спектрально-весаого измерения параметров сигналов; $\mathbf{HS}^{\text{ИПС}}$ – исследовательский аппаратно-программный комплекс спектрально-весаого измерения параметров сигналов; $\mathbf{HS}^{\text{УВП}}$ – аппаратно-программное обеспечение базовых унифицированных виртуальных приборов.

Рассмотренный комплекс базового измерительного обеспечения \mathbf{BMS} (см. выражение (5.1.13)) включен в состав базы данных инженерных решений МРИУС. Применение данного комплекса обеспечило на 30–50 % сокращение сроков разработки прикладного программного обеспечения в процессе создания ряда промышленных образцов МРИУС [354, 355, 357–360].

5.2 Разработка базовых шаблонов проектирования графического интерфейса пользователя

К основным задачам, решаемым на основе графического интерфейса пользователя в МРИУС, относятся формирование параметров управляющих воздействий на ОУиК и представление полученных результатов измерения (см. п. 1.2.1) в целях обеспечения решения соответствующих задач пользователя на основе разделяемого ресурса [361, 362].

Как показали проведенные в диссертации исследования, на текущий момент человеко-машинное взаимодействие с разделяемым ресурсом в МРИУС в основном реализуется с использованием *графического интерфейса пользователя* (ГИП) (*graphic user interface*) [139–143, 146 и пр]. В соответствии с этим в рамках предложенной методологии проектирования МРИУС разрабатываемый ГИП представлен известными типами, характеризующимися следующими признаками [361, 363]:

- реализуемая модель взаимодействия, в рамках которого выделяют следующие типы ГИП:

- *процедурно-ориентированный* (выполнение действий в соответствии с заданными сценариями) [121, 159];
- *объектно-ориентированный* (манипулирование объектами) [88, 139, 286];
- способ организации:
 - *однооконный (single interface document)* [121];
 - *многооконный (multiple interface document)* [88].

Разработка графического интерфейса пользователя в МРИУС для работы в интерактивном диалоговом режиме выполняется на основе различных визуальных информационных абстракций (моделей) разделяемого ресурса – *метафор* [363–366]. На основе выполненного в диссертации анализа применительно к МРИУС выделены следующие виды применяемых метафор:

- *виртуальный рабочий стол* [143, 146];
- *виртуальная установка (мнемосхема, блок-диаграмма, макет, стенд)* [121, 286, 367];
- *виртуальное наборное поле* [88, 139, 140, 367];
- *виртуальные измерительные приборы* [88, 140, 286, 351].

Обозначим множеством $\mathbf{T}^И$ совокупность рассмотренных типов графических интерфейсов пользователей:

$$\mathbf{T}^И = \{T_{k^T} | k^T = 1, K^{T^И}\}, \quad (5.2.1)$$

где K^T – число возможных типов.

Обозначим множеством \mathbb{M} рассмотренную совокупность возможных метафор, которые могут быть использованы при реализации графического интерфейса пользователя МРИУС:

$$\mathbb{M} = \{M_{i^M} | i^M = 1, I^{M^И}\}. \quad (5.2.2)$$

В общем случае при проектировании графического интерфейса пользователя МРИУС могут быть использованы различные варианты сочетаний соответствующих метафор, которые описываются множеством

$$\mathbf{M}^И = \bigcup_{k^M=1}^{K^{M^И}} M_{k^M}, M_{k^M} \subset \mathbb{M}, \quad (5.2.3)$$

где $M^И$ – множество метафор, используемых в процессе проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС; $K^{M^И}$ – число примененных видов метафор.

Таким образом, в соответствии с введенными обозначениями (выражения (5.2.1)–(5.2.3)) в рамках диссертации под базовым шаблоном проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС понимается пара GUI , характеризующая его тип и используемые метафоры:

$$GUI = \langle T_{k^И}, M^И \rangle. \quad (5.2.4)$$

Возможные варианты базовых шаблонов проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС согласно рассмотренной классификации в общем виде описываются множеством:

$$GUI = \{GUI_{k^И} | k^И = 1, K^И\}, \quad (5.2.5)$$

где $K^И = K^{T^И} \cdot (2^{I^M} - 1)$.

В случае необходимости дальнейшая детализация шаблонов проектирования может быть выполнена на основе известных подходов, например, представленных в работах [368–372]. Блок-схема алгоритма методики разработки графического интерфейса пользователя на основе множества обобщенных и формализованных в диссертации базовых шаблонов (см. выражение (5.2.5)) в обобщенном виде приведена на рисунке 5.2.1. Рассмотрим шаги представленной методики.

Блок 1. Исходными требованиями к интерфейсу пользователя являются перечень управляемых воздействий и возможные задаваемые значения их параметров, перечень формируемых тестовых сигналов, перечень измеряемых физических величин, сигналов, зависимостей, требования к возможностям вторичной обработки и визуализации результатов измерения, которые определяются объектом управления и контроля, комплексом решаемых измерительных задач MT , реализуемыми методами и алгоритмами измерения и пр.

Блок 2. На данном шаге алгоритма методики выполняется выбор возможных используемых шаблонов проектирования ГИП МРИУС.

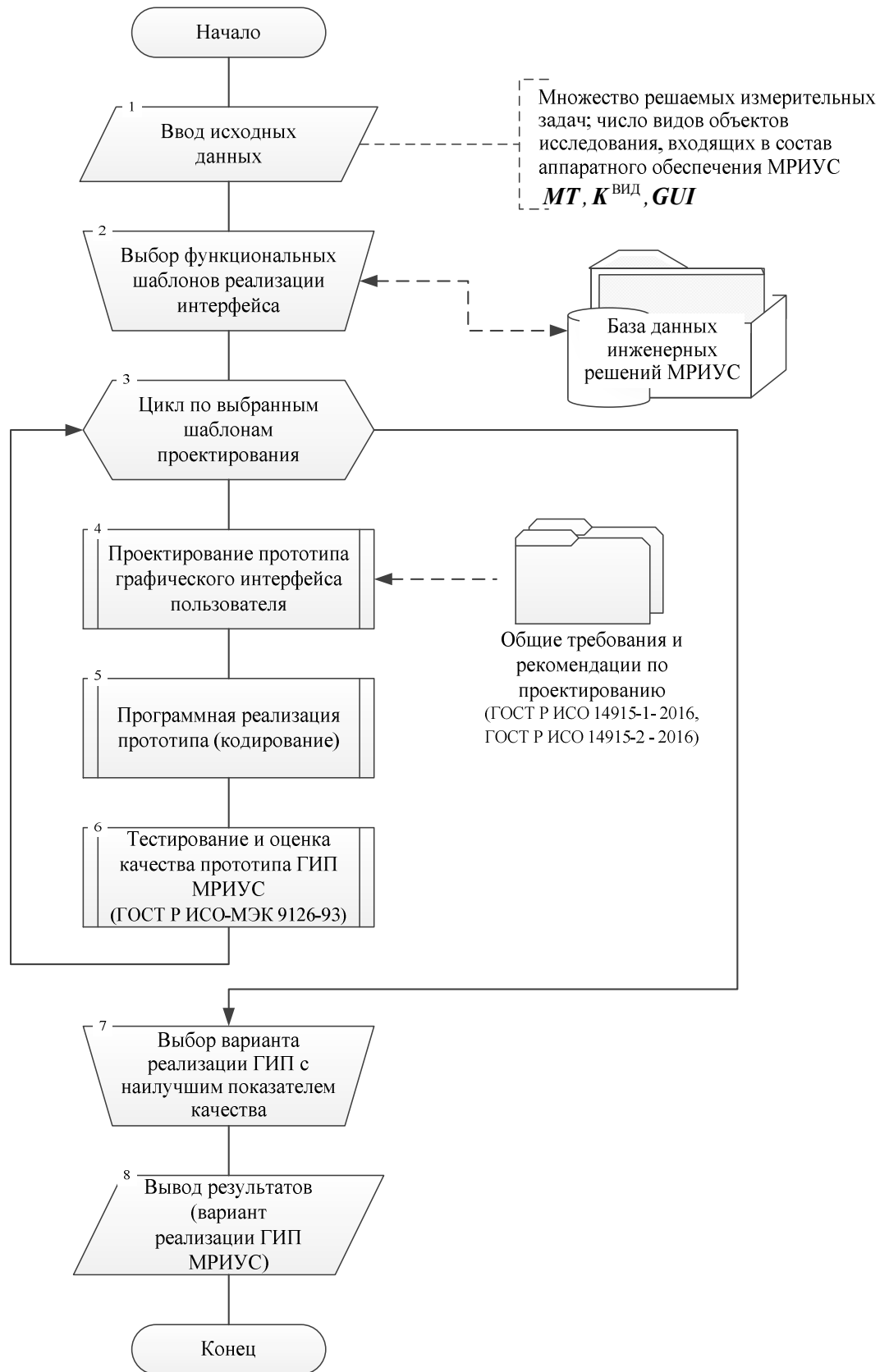


Рисунок 5.2.1 – Блок-схема алгоритма методики разработки графического интерфейса пользователя МРИУС на основе базовых шаблонов проектирования

Выбор возможного шаблона проектирования (см. выражение (5.2.5)) в рамках разработанной методики выполняется разработчиком на основе имеющегося опыта и анализа существующих решений в рассматриваемой и смежных предметных областях [139–143, 361–367 и др.]. При этом в качестве одного из ограничивающих факторов при выборе соответствующего шаблона может выступать, например, вид системного программного обеспечения, функционирующего на терминалах пользователей (см. (2.1.18)).

Реализация объектно-ориентированного графического интерфейса пользователя МРИУС обеспечивает выполнение произвольных последовательностей действий с компонентами разделяемого ресурса, предоставляя возможность пользователю самому определять методику экспериментальных исследований в рамках реализуемого диалога. Функциональные возможности процедурно-ориентированного графического интерфейса пользователя МРИУС ориентированы на реализацию predeterminedной разработчиком последовательности действий [363].

Блок 3. На данном этапе методики выполняется перебор выбранных вариантов шаблонов проектирования ГИП МРИУС.

Блок 4. На данном шаге алгоритма методики МРИУС на основе соответствующего шаблона GUI_k выполняется проектирование графического интерфейса пользователя. Процесс проектирования реализуется на основе подхода, рассмотренного в работе [365], и включает в себя решение следующих основных задач:

- функциональное проектирование;
- визуальное проектирование;
- проектирование взаимодействия.

Решение данных задач выполняется с учетом требований и рекомендаций, изложенных в ряде соответствующих нормативных документов [373, 374]. Более подробно подходы к решению данных задач описаны, например, в работах [362, 365, 375–377], при этом применительно к управлению сложными многопараметрическими объектами в рамках методики рассматривается возможность реализации *иерархической структуры* графического интерфейса пользователя МРИУС, каждый уровень которой характеризуется соответствующей детальностью представления компонентов разделяемого ресурса, например, в соответствии с подходом, приведенном в работе [361].

Блок 5. На данном этапе методики с учетом возможных ограничений, накладываемых используемым системным программным обеспечением терминалов пользователей, на основе соответствующего шаблона (выражение (5.2.4)) выполняется программная реализация варианта графического интерфейса пользователя, реализующего требуемые функциональные возможности по управлению разделяемым ресурсом МРИУС и необходимую обработку и визуализацию результатов измерения.

В рамках разработанной методологии в соответствии с реализацией принципа унификации (см. п. 2.2) сокращение сроков разработки обеспечивается посредством применения на данном этапе программных сред разработки, включающих в свой состав *GUI-конструктор*, например [264, 378 и пр.]. При этом перспективным направлением реализации графического интерфейса пользователя МРИУС является его исполнение в виде *WEB-приложения*, использующего стандартные *WEB-браузеры* [141, 142, 379, 380].

При проектировании и программной реализации прототипа графического интерфейса пользователя МРИУС используются разработанные в диссертации алгоритмы, подпрограммы и унифицированные виртуальные приборы, которые рассмотрены ранее в параграфе 5.1.

Блок 6. На текущем шаге алгоритма методики оценивается качество прототипа ГИП на основе соответствующих характеристик качества программного обеспечения, определяемых требованиями соответствующих нормативных документов [381].

Блок 7. На данном этапе методики выполняется выбор варианта прототипа ГИП МРИУС, характеризуемого наилучшим значением показателем качества. Соответствующий вариант исполнения графического интерфейса пользователя используется в ходе разработки варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС (см. п. 3.2).

Вариант исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС с реализованными функциональными возможностями графического интерфейса пользователя определяют множество заданий $REQ_{v,r}$, формируемых на его основе в рамках реализуемого диалога с разделяемым ресурсом (см. выражения (3.2.3)–(3.2.4)).

В случае необходимости последующая корректировка и доработка графического интерфейса пользователя может быть выполнена в ходе эксплуатации МРИУС.

Методика адаптации МРИУС, предусматривающая реализацию данных мероприятий, приводится в параграфе 5.5.

Варианты реализации альтернативных вариантов ГИП при организации удаленного взаимодействия с использованием вычислительных сетей, таких как *естественный интерфейс пользователя (natural user interface – NUI)* и *нейрокомпьютерный интерфейс (brain computer interface – BCI)*, описываются, например, в работах [382–384]. При рассмотрении возможности применения данных интерфейсов в МРИУС для их формализованного описания на основе соответствующих классификационных признаков также может быть использован предложенный подход (выражения (5.2.4)–(5.2.5)).

Разработанные в диссертации базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС – **GUI** (выражения (5.2.4)–(5.2.5)) также вошли в базу данных инженерных решений для поддержки процесса разработки МРИУС на основе предложенной методологии (см. рисунок 2.5.1). Методика формирования соответствующей базы данных рассматривается в следующем параграфе.

5.3 Разработка методики формирования базы данных инженерных решений МРИУС

База данных инженерных решений, формируемая в рамках предложенной в диссертации методологии, обеспечивает накопление выявленных в процессе разработки МРИУС *данных*, которые в дальнейшем используются при решении соответствующих проектных задач (см. гл. 2, рисунок 2.5.1).

Процесс формирования базы данных инженерных решений МРИУС осуществляется итерационно по мере накопления опыта и результатов разработки образцов МРИУС. Блок-схема алгоритма разработанной в диссертации методики накопления базы данных инженерных решений в обобщенном виде приведена на рисунке 5.3.1.

Блок 1. В качестве исходных данных в методику формирования базы данных инженерных решений МРИУС вошли следующие разработанные, а также обобщенные и систематизированные в ходе выполненных в диссертации исследований подходы и варианты решения ряда проектных задач:

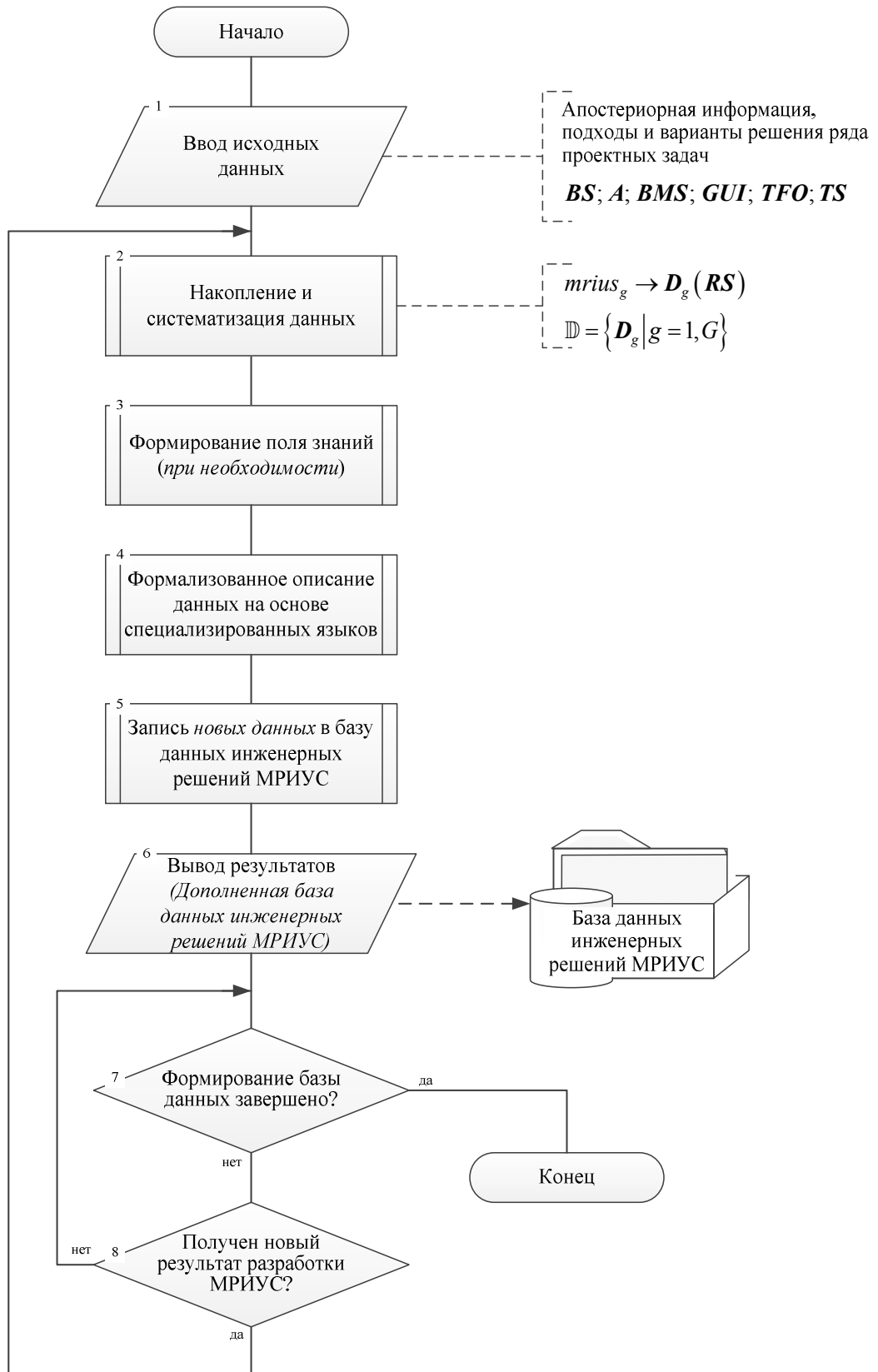


Рисунок 5.3.1 – Блок-схема алгоритма методики формирования базы данных инженерных решений в процессе разработки МРИУС

- базовые структуры аппаратного построения – **BS** (см. п. 3.1);
- алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса, в том числе реализующие разработанные в диссертации методы повышения оперативности МРИУС, – **A** (см. п. 4.2–4.4);
- базовое измерительное обеспечение МРИУС – **BMS** (см. п. 5.1);
- экспериментальные данные о длительности выполняемых функциональных операций (в том числе на основе базовых унифицированных виртуальных приборов) – **TFO** (см. п. 3.3, 5.1);
- базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя – **GUI** (см. п. 5.2).

Блок 2. Результаты и сведения о принципах и способах принятия решений по использованию соответствующих подходов при разработке компонентов проектного решения МРИУС в соответствии с заданными требованиями технического задания накапливаются в процессе проектирования в виде *данных* [385, 386]. В рамках разработанной в диссертации методологии вариант реализации МРИУС характеризуется информационной моделью проектного решения (см. выражение (2.2.10)). Таким образом, накапливаемые *данные* в обобщенном виде можно представить на основе *функции отношения*, связывающей вариант проектного решения МРИУС с заданными требованиями технического задания:

$$mrius_g \rightarrow D_g(RS) = D_g(MT, P^{оп}, SP), \quad (5.3.1)$$

где $mrius_g$ – g -е проектное решение МРИУС, полученное в процессе проектирования; D_g – *функция отношения*, связывающая g -е проектное решение МРИУС и заданные требования технического задания; **RS** – модель представления требований технического задания, включающая в свой состав:

MT – комплекс решаемых измерительных задач (см. выражение (3.2.1));

P^{оп} – требования к оперативности функционирования (см. выражения (1.2.9), (1.2.10));

SP – множество, описывающее требования к энергетическим характеристикам МРИУС, характеристикам конструктивно-технологической реализации, показателям надежности и пр. (см. выражение (1.3.5), п. 3.6).

Совокупность полученных в ходе проектной деятельности *данных* обобщенно характеризуется множеством:

$$\mathbb{D} = \{D_g | g = 1, G\}, \quad (5.3.2)$$

где G – общее число проектных решений образцов МРУИС, разработанных в ходе осуществляемой проектной деятельности (см. выражения (1.3.1)–(1.3.4)).

Функции отношения D_g на предварительном этапе могут быть представлены в виде текстового описания, таблиц, графиков, диаграмм, графов и др. [385, 386].

Блок 3. На основе систематизации полученных данных на этом этапе методики при необходимости формируется *поле знаний* [386].

Блок 4. В дальнейшем на основе сформированного поля знаний осуществляется формализация и описание *данных* о применяемых в ходе разработки МРИУС подходах и вариантах решения проектных задач. Этапы методики, определяемые блоками 3, 4, выполняются с использованием известных подходов и языков представления *данных*, например, рассмотренных в работах [276, 386, 387 и др.].

Блок 5. На данном шаге алгоритма методики база данных инженерных решений МРИУС пополняется вновь полученными данными.

При выполнении последующих разработок МРИУС ранее полученные данные используются в ходе синтеза проектных решений, а полученные новые проектные решения МРИУС используются как исходные данные (блоки 7–8). Таким образом, в соответствии с представленной на рисунке 5.3.1 методикой в ходе процесса проектирования МРИУС выполняется постепенное наполнение базы данных как новыми подходами к решению проектных задач, так и информацией о их применении. Разработанные варианты проектных решений и их соответствие требованиям ТЗ (см. выражения (2.2.10), (5.3.1)), разработанная конструкторская и программная документация в электронном виде также включаются в базу данных инженерных решений МРИУС.

Разработанные в рамках диссертации информационная модель проектного решения (выражение (2.2.10)) и подходы к решению ряда проектных задач (п. 3.1, 4.2–4.4, 5.1, 5.2) определяют предварительный комплекс используемых понятий при описании предметной области в формируемом *поле знаний*. Для выявления соответствующих закономерностей при формировании поля знаний также могут быть

использованы разработанные в диссертации математические модели динамики функционирования МРИУС (см. п. 3.4).

Информационный состав базы данных инженерных решений МРИУС и структурная схема взаимодействия с ней при решении ряда проектных задач, а также ее пополнения новыми данными в процессе разработки образцов МРИУС в обобщенном виде приведены на рисунке 5.3.2.

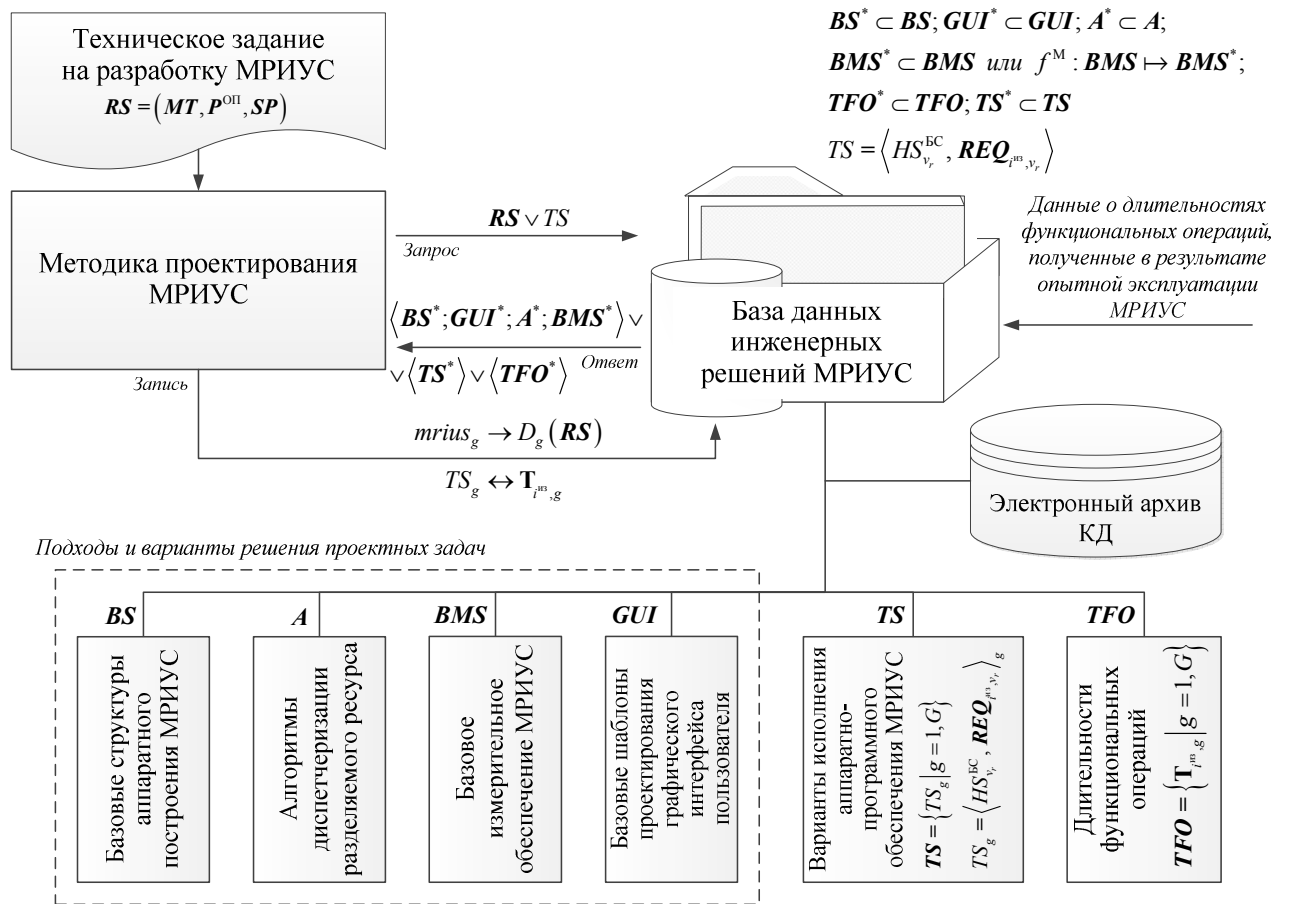


Рисунок 5.3.2 – Информационный состав и обобщенная структурная схема взаимодействия с базой данных инженерных решений в процессе разработки МРИУС

В процессе разработки МРИУС в соответствии с требованиями технического задания RS взаимодействие с базой данных инженерных решений выполняется при выборе одного или нескольких подходящих решений в части: аппаратной структуры построения; алгоритма диспетчеризации; выбора или модификации базового измерительного обеспечения (см. рисунок 5.3.2); применения соответствующих базовых шаблонов проектирования графического интерфейса пользователя (BS^*, A^*, BMS^*, GUI^*); а также возможности применения ранее разработанных вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС (TS^*) (см. п. 3.2).

Обобщенные и систематизированные в ходе выполненных в диссертации исследований подходы и варианты решения ряда проектных задач, вошедшие в базу данных инженерных решений (см. рисунок 5.3.2) и характеризующиеся переменными ***BS, A, BMS, GUI*** (см. выражения (2.1.22), (2.2.1), (5.1.13), (5.2.5)), также дополняются в процессе разработки МРУИС на основе новых проектных решений (см. рисунок 5.3.1).

В рамках методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС (см. п. 3.3) осуществляется взаимодействие с базой данных в целях определения наличия необходимых сведений о длительностях функциональных операций ***TFO****, выполняемых в рамках решения соответствующей измерительной задачи на основе варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $TS = \langle HS_{v_r}^{BC}, REQ_{i^{из}, v_r} \rangle$ (см. рисунок 3.3.1), и в случае отсутствия таковых – их оценка, запись и накопление в базе данных в виде элементов $TS_g \leftrightarrow TFO_g$ (см. выражение (3.3.4)) соответствующих множеств ***TS*** и ***TFO*** (см. рисунки 3.3.1, 5.3.2). Данные о длительностях выполняемых функциональных операций также могут быть уточнены в ходе опытной эксплуатации МРИУС на основе подхода, рассмотренного в параграфе 4.1, с последующим их внесением в базу данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 5.3.2).

Включение в базу данных разработанных, а также систематизированных в диссертации подходов к решению ряда проектных задач обеспечивает локализацию множества допустимых вариантов синтезируемых проектных решений МРИУС в соответствии с положенными в основу предложенной методологии принципов *иерархичности* и *унификации* (см. п. 2.2). Формирование базы данных инженерных решений в процессе проектирования образцов МРИУС реализует накопление опыта разработки компонентов МРИУС, информационную поддержку при решении проектных задач и позволяет сократить сроки выполнения последующих разработок [385, 388].

Рассмотренная база данных является одним из составных компонентов разработанной в диссертации методологии (см. рисунок 2.5.1), взаимодействие которых выполняется на основе методики проектирования МРИУС, рассматриваемой в следующем параграфе.

5.4 Разработка методики проектирования МРИУС

Предложенная методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками реализует подход направленного совершенствования прототипа [233, 243]. В качестве прототипов рассматриваются варианты реализации МРИУС на основе базовых структур аппаратного построения **BS** и базового алгоритма диспетчеризации *FIFO* (см. п. 1.2.1, 3.1), при этом под процессом совершенствования понимается «модификация» проектных решений МРИУС посредством применения разработанных в диссертации методов повышения оперативности (см. п. 4.2–4.4).

Из совокупности синтезируемых альтернативных вариантов проектных решений МРИУС, удовлетворяющих техническому заданию на разработку, выполняется выбор рабочего решения, обладающего наилучшим значением показателя технического уровня (см. выражение (2.3.10)).

Блок-схема алгоритма методики проектирования МРИУС на основе рассмотренных ранее компонентов методологии приведена в обобщенном виде на рисунке 5.4.1. Рассмотрим этапы представленной методики.

Блок 1. На данном этапе задаются требования технического задания (ТЗ) на разработку, к которым относятся:

- комплекс решаемых измерительных задач – **MT** и соответствующий им перечень объектов управления и контроля МРИУС – K^{OB} , K^{VID} ;
- требования к числу обслуживаемых терминалов пользователей – N_T^{T3} ;
- требования к оперативности функционирования – p_q^{op} ;
- требования к энергетическим характеристикам, показателям надежности и пр.

Цели и задачи, методика выполнения экспериментальных исследований определяют решаемый на основе МРИУС комплекс измерительных задач – **MT** и соответствующий им перечень объектов управления и контроля K^{OB} , K^{VID} (см. п. 3.1). Каждая измерительная задача характеризует измеряемую физическую величину, требуемую точность и условия ее измерения [125], которым в соответствие ставятся множество операций, выполняемых по заданиям пользователя, и требования к качеству их выполнения (см. выражения (2.1.2)–(2.1.5)).

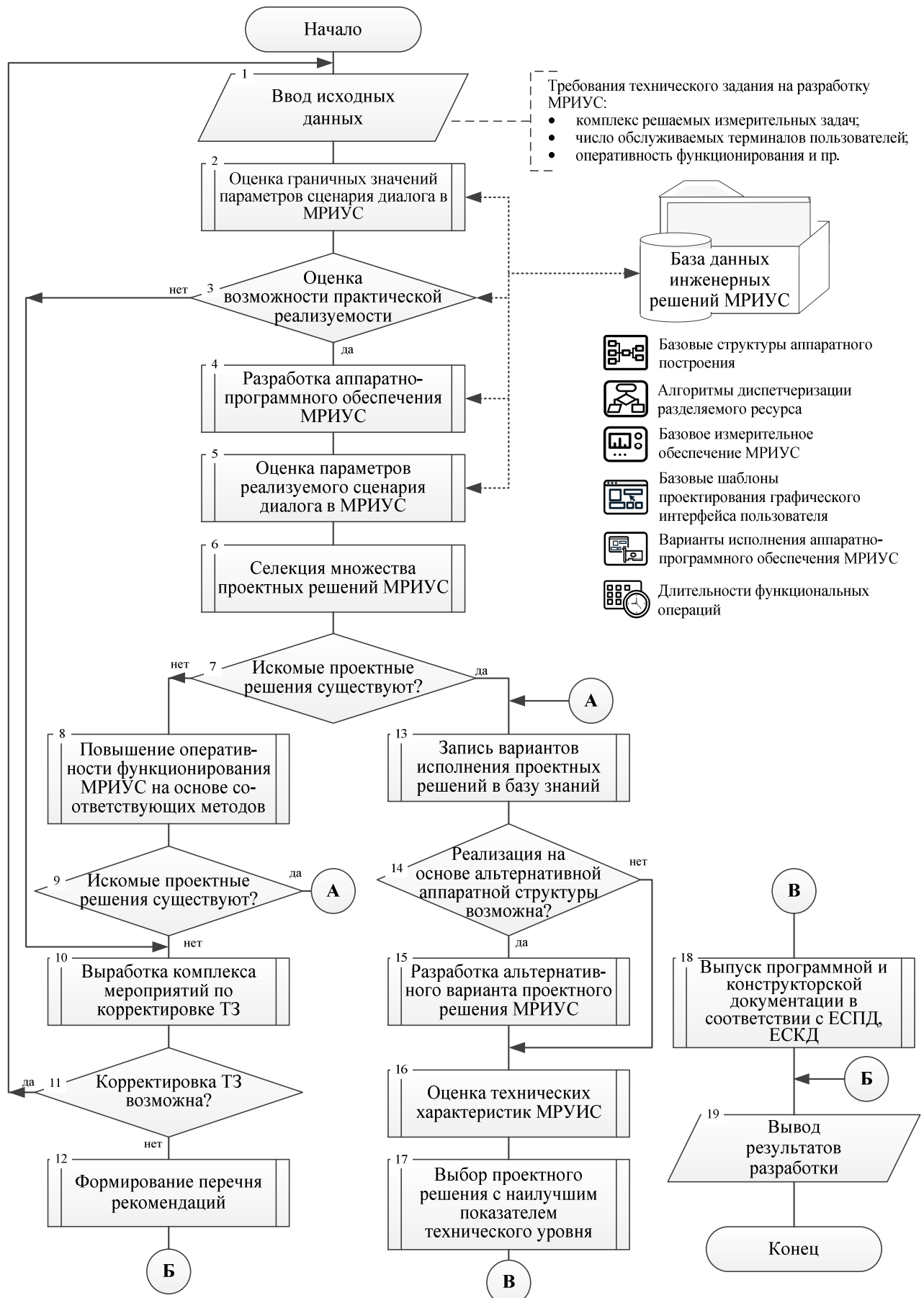


Рисунок 5.4.1 – Блок-схема алгоритма методики проектирования МРИУС

Необходимое число обслуживаемых терминалов пользователей $N_T^{T3} = N_{p_q^{оп}}$ (см. выражения (1.2.11), (2.3.8)) формируется исходя из планируемого режима эксплуатации МРИУС (требуемое повышение производительности работ, выполняемых на основе системы; требуемое повышение пропускной способности прототипа; общее число терминалов пользователей, расположенных в различных локациях; наличие расписания работы локаций и пр.).

Требования к параметрам оперативности функционирования $p_q^{оп}$ (выражение (1.2.10)) устанавливаются на основе имеющейся информации о поведении пользователя или в соответствии с заданными требованиями к детерминированности реакции системы. Например, абсолютное значение среднего времени ожидания результатов измерения в соответствии с проведенными исследованиями (см. п. 1.2.3), как правило, устанавливается в диапазоне 5–12 секунд, при этом в ряде случаев, когда альтернативой использования системы является необходимость изменения собственного территориального размещения (необходимость поездки в другой город, регион, страну), приемлемое значение времени ожидания может быть увеличено до 15–20 с [180, 366].

Блок 2. На данном шаге алгоритма для каждой базовой структуры аппаратного построения МРИУС BS_r выполняется формирование множества граничных значений пар параметров сценария диалога в МРИУС $SD_r^{ГР}$ (см. выражения (2.2.20)–(2.2.22)) в соответствии с заданными требованиями $p_q^{оп}$ и N_T^{T3} . Данные требования формируются на основе разработанной в диссертации методики, подробно рассмотренной в параграфе 3.5.

Блок 3. С учетом имеющейся информации о возможных длительностях выполняемых функциональных операций, в том числе полученной на основе предыдущих результатов разработки и эксплуатации образцов МРИУС (см. п. 5.3), выполняется анализ возможности принципиальной реализуемости заданных требований ТЗ к числу обслуживаемых терминалов пользователей (см. выражения (1.2.3)–(1.2.5)). При отсутствии таковой выполняется корректировка технического задания. Подробно соответствующие мероприятия по корректировке ТЗ будут рассмотрены далее в блоке 10 алгоритма.

Блок 4. При принятии положительного решения о возможности реализации МРИУС выполняется разработка вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS_{v_r}^{BC}$ (см. выражения (2.2.11)–(2.2.14)) на основе разработанной в

диссертации и представленной в параграфе 3.2 методики. Например, методика проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС в соответствии с заданными требованиями к длительностям функциональных операций подробно рассмотрена в работе [272].

В результате выполнения данного этапа методики (см. рисунок 5.4.1) для каждой базовой структуры аппаратного построения МРИУС BS_r формируется множество вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения HS_r^{BC} (см. выражение (2.2.13)). Варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС HS_r^{BC} образуют множество HS^{BC} (см. выражение (2.2.15)).

Блок 5. Для сформированного множества вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения каждой r -й структуры МРИУС HS_r^{BC} оцениваются параметры реализуемого на их основе сценария диалога SD_r^{BC} (см. выражения (2.2.16)–(2.2.19)). Данный шаг алгоритма осуществляется на основе разработанной в диссертации методики, описанной в параграфе 3.3.

Блок 6. На данном этапе методики в соответствии с принципом ограничения допустимых альтернатив (см. п. 2.2.2) из общего множества HS^{BC} , сформированного ранее (блок 4), выполняется исключение вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС, не удовлетворяющих требованиям к граничным параметрам сценария диалога для соответствующей структуры аппаратного построения SD_r^{GP} при реализации проектных решений МРИУС на основе базового алгоритма диспетчеризации разделяемого ресурса *FIFO*.

Блок 7. На данном шаге алгоритма методики анализируется сформированное множество вариантов исполнения аппаратно-программного обеспечения МРИУС $HS^{OD3 BC}$, удовлетворяющих заданным в ТЗ параметру оперативности p_q^{op} и числу обслуживаемых терминалов пользователей N_T^{T3} (см. выражения (2.2.23)–(2.2.29), рисунок 2.2.2).

Блок 8. В случае если в сформированном множества проектных решений МРИУС ни одно не удовлетворяет требуемым параметрам p_q^{op} и N_T^{T3} (то есть $HS^{OD3 BC} = \emptyset$), для исходного множества HS^{BC} выполняется применение разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования МРИУС.

Анализ возможности применения методов осуществляется на основе расчета функций параметрической чувствительности [250] заданного параметра оперативности функционирования МРИУС $p_q^{оп}$ к изменению длительностей соответствующих функциональных операций управления и измерения с использованием разработанной в диссертации методики (см. п. 3.6), и/или на основе формируемой базы данных инженерных решений (см. п. 5.3).

Для реализуемых методов выполняется оценка их эффективности (см. выражение (4.2.7)) по отношению к относительным затратам на их реализацию в соответствии с критерием, определяемым выражением (4.5.11). Для проектных решений, «модифицированных» посредством применения разработанных в диссертации методов, производится расчет результирующих значений числа обслуживаемых терминалов пользователей и оперативности функционирования с использованием разработанных в рамках диссертации математических моделей (см. п. 3.4, 4.2–4.4).

Блок 10. На данном этапе методики для проектных решений МРИУС, реализующих разработанные методы оперативности, осуществляется проверка их соответствия требованиям ТЗ – $p_q^{оп}$ и $N_T^{ТЗ}$. Если удовлетворяющие данным требованиям проектные решения отсутствуют, выполняется корректировка технического задания. В качестве направлений и рекомендаций по корректировке ТЗ могут рассматриваться следующие:

- сокращение комплекса решаемых измерительных задач;
- реализация альтернативных методик экспериментальных исследований, например, переход от автоматизированного измерения параметрических зависимостей на измерения, выполняемые по точкам, и пр.;
- декомпозиция многообъектовой МРИУС на МРИУС с меньшим числом объектов и/или несколько однообъектовых;
- ограничение численности и временное разнесение работы групп одновременно работающих терминалов пользователей (формирование расписания доступа).

Блок 11. Принятие решения. Решение о возможности реализации того или иного комплекса мероприятий принимается разработчиком на основе анализа технической возможности их реализации и особенностей прикладного применения разработанного образца МРИУС.

Блок 12. При отсутствии такой возможности, рекомендации, формируемые на основе вышеперечисленных (см. блок 10) совместно с результатами оценки граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС (блок 2), в дальнейшем выводятся в качестве результатов разработки (см. блок 18).

Блок 13. При существовании проектных решений МРИУС, удовлетворяющих заданным требованиям $p_q^{оп}$ и $N_T^{ТЗ}$ технического задания на разработку (блоки 7 и 9), выполняется их запись в формируемую базу данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 5.3.2).

Блок 14. На данном этапе методики с использованием разработанных в диссертации компонентов методологии (п. 3.1, п. 3.4) проводится анализ возможности альтернативной реализации МРИУС в части исследования технической возможности и эффективности применения предложенных методов повышения оперативности (п. 4.2–4.4) с точки зрения «перехода» на альтернативную аппаратную структуру построения МРИУС (см. рисунки 4.5.1–4.5.3). При положительном результате, на основе разработанной в диссертации методики проектирования аппаратно-программного обеспечения (см. п. 3.2), выполняется разработка альтернативных проектных решений МРИУС (блок 15).

Блок 16. Для сформированного множества проектных решений МРИУС осуществляется оценка их технических характеристик на основе разработанной методики, описанной в параграфе 3.6. Также на данном этапе выполняется оценка технического уровня полученных проектных решений МРИУС в соответствии с предложенным в диссертации подходом, рассмотренным в параграфе 2.2.

Блок 17. На данном шаге методики из совокупности сформированных проектных решений МРИУС выбирается решение, обладающее наилучшим значением показателя технического уровня.

Блок 18. Для проектного решения МРИУС, выбранного в качестве рабочего, выполняется разработка и выпуск соответствующей программной и конструкторской документации согласно ЕСПД и ЕСКД. Технические характеристики МРИУС, электронная программная и конструкторская документация (схемы электрические функциональные, принципиальные; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов, 3D-модели конструкции), описание принципов работы с прикладными ПО, сведения о техническом обслуживании и пр. интегрируются в рамках интерактивного технического

руководства пользователя. Интерактивные технические руководства пользователя являются структурированным представлением электронной конструкторской документации и необходимых сведений о МРИУС на основе современных технологий [389, 390], и размещаются в электронном архиве базы данных (см. п. 5.3).

Блок 19. На данном этапе методики выводятся результаты разработки в виде проектного решения МРИУС, комплекта электронной документации и соответствующего перечня рекомендаций.

При положительном результате разработки на основе анализа полученного рабочего проектного решения МРИУС в качестве рекомендаций могут быть сформированы следующие:

- при выявлении наличия резерва системы по числу обслуживаемых терминалов пользователей:
 - рекомендации по увеличению информативности проводимых экспериментальных исследований (дополнение комплекса решаемых измерительных задач);
 - рекомендации по расширению областей прикладного использования;
 - рекомендации по числу дополнительных терминалов пользователей;
- реализация возможности унификации и комплексирования нескольких образцов МРИУС на уровне их конструктивного исполнения;
- рекомендации по проведению экспериментальных исследований длительностей операций, выполняемых в соответствии с заданиями пользователей, при случайном характере их зависимостей;
- рекомендации по дополнительному экспериментальному исследованию эффективности различных методов повышения оперативности вследствие вариативности обрабатываемых заданий (длительностей соответствующих функциональных операций), например, зависящей от типа объекта управления и контроля в многообъектовой МРИУС, с которым в текущий момент выполняется работа и пр.

В том случае, если проектное решение МРИУС, удовлетворяющее требованиям технического задания, не найдено, в качестве результата разработки выводятся сформированные граничные значения параметров сценария диалога, характеризующие предельно достижимые характеристики МРИУС как системы массового обслуживания,

и перечень сформированных рекомендаций по корректировке ТЗ (блок 12), на основе которых принимается решение о направлениях дальнейших работ.

На основе полученного рабочего проектного решения, характеризуемого информационной моделью (см. выражение (2.2.10)), и комплекта конструкторской и программной документации, согласно разработанной методологии, выполняется изготовление МРИУС. Изготовленный образец многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы с учетом сформированных рекомендаций вводится в эксплуатацию, в ходе которой проводится реализация соответствующих мероприятий. Методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации рассматривается в следующем параграфе.

5.5 Разработка методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации

Обобщенная схема жизненного цикла МРИУС как технической системы в соответствии с [391, 392] представлена на рисунке 5.5.1.

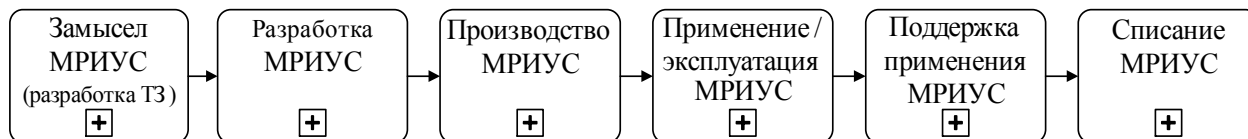


Рисунок 5.5.1 – Обобщенная схема жизненного цикла МРИУС

На этапе замысла выполняется формирование требований к создаваемой МРИУС в соответствии с потребностями обеспечения коллективного удаленного доступа пользователей к оборудованию (измерительным средствам, макетам, стендам, установкам), повышения производительности работ, пропускной способности аналога и/или прототипа. Разработка МРИУС выполняется на основе предложенной в диссертации методологии (см. п. 2.5). Производство МРИУС осуществляется в соответствии с известными подходами на основе конструкторской и программной документации, разработанной в процессе проектирования согласно ЕСПД, ЕСКД (см. рисунок 5.4.1).

Этап эксплуатации МРИУС разделяется на основных два подэтапа:

- опытная эксплуатация;
- промышленная эксплуатация.

В целях проведения опытной эксплуатация изготовленного образца МРИУС выполняется дополнение ее программного обеспечения разработанной в диссертации специализированной *подпрограммой регистрации и накопления статистических данных*. Составным компонентом данной подпрограммы является специализированный программный модуль, выполняющий измерение длительностей функциональных операций, рассмотренный в параграфе 4.1 (см. рисунок 4.1.1). В процессе функционирования МРИУС подпрограмма регистрации и накопления статистической информации обеспечивает фиксацию:

- моментов времени отправки заданий с терминалов пользователей и получения результатов их выполнения;
- моментов поступления заданий на измерительно-управляющую ЭВМ;
- моментов времени начала и завершения выполнения заданий;
- моментов времени отправки результатов выполнения заданий с измерительно-управляющей ЭВМ;
- времени ожидания результатов выполнения заданий на терминалах пользователей;
- функционального и параметрического содержания обрабатываемых заданий.

Включение в состав программного обеспечения МРИУС данной подпрограммы позволяет накапливать сведения о длительностях соответствующих функциональных операций, реализуемых аппаратно-программным обеспечением МРИУС при выполнении поступающих заданий пользователей, а также формировать соответствующий массив статистических данных о функционировании МРИУС как системы массового обслуживания (см. рисунки 2.1.1, 3.4.1). Подробно результаты экспериментальных исследований параметров распределений интервалов времени размышления пользователей между повторными заданиями и длительностей обслуживания заданий рассмотрены в главе 6.

К аспектам, обуславливающим необходимость адаптации МРИУС в процессе ее эксплуатации, относятся:

- отклонение в сторону увеличения требуемого числа обслуживаемых терминалов пользователей и вызываемое им снижение оперативности функционирования МРИУС;
- варьирование числа терминалов пользователей и заданий, имеющих

принадлежность к одному из объектов управления и контроля МРИУС;

- вариативность поведения пользователей в МРИУС как в эргатической системе (см. п. 1.2.3);
- расширение областей прикладного применения МРИУС как средства автоматизации экспериментальных исследований и пр.

Методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации в рамках выделенных аспектов приведена на рисунке 5.5.2 в виде диаграммы *BPMN (Business Process Model and Notation)* бизнес-процесса фрагмента жизненного цикла [393]. Рассмотрим основные этапы представленной на рисунке 5.5.2 методики. Изготовленный образец МРИУС вводится в опытную эксплуатацию (блок 3) с учетом сформированных в ходе процесса разработки рекомендаций (см. п. 5.4). В течение периода опытной эксплуатации на основе подпрограммы регистрации и накопления статистических данных осуществляется мониторинг функционирования МРИУС как СМО (процесса взаимодействия пользователей с разделяемыми ресурсами). Объем проводимых экспериментальных исследований образца МРИУС определяет длительность соответствующего периода опытной эксплуатации. Также на данном этапе выполняется экспериментальная оценка удовлетворенности пользователей МРИУС разработанным графическим интерфейсом МРИУС (см. п. 5.3). Оценку предлагается выполнять на основе методик, рассмотренных, например в работах [381, 394], с использованием «опросных листов», заполняемых пользователями в электронном или бумажном виде.

На основе обработки накопленных статистических данных о функционировании МРИУС формируются соответствующие сводные зависимости, в качестве примеров которых могут быть выделены следующие:

- зависимости оперативности функционирования МРИУС от числа одновременно работающих пользователей;
- эмпирические распределения числа поступивших заданий по заданным временным интервалам в течение периода опытной эксплуатации;
- эмпирические распределения числа заданий, имеющих функциональную принадлежность к разным объектам управления и контроля (для многообъектовых МРИУС (см. п. 3.1));
- эмпирические распределения интервалов размышления пользователей, длительностей выполнения заданий и др.

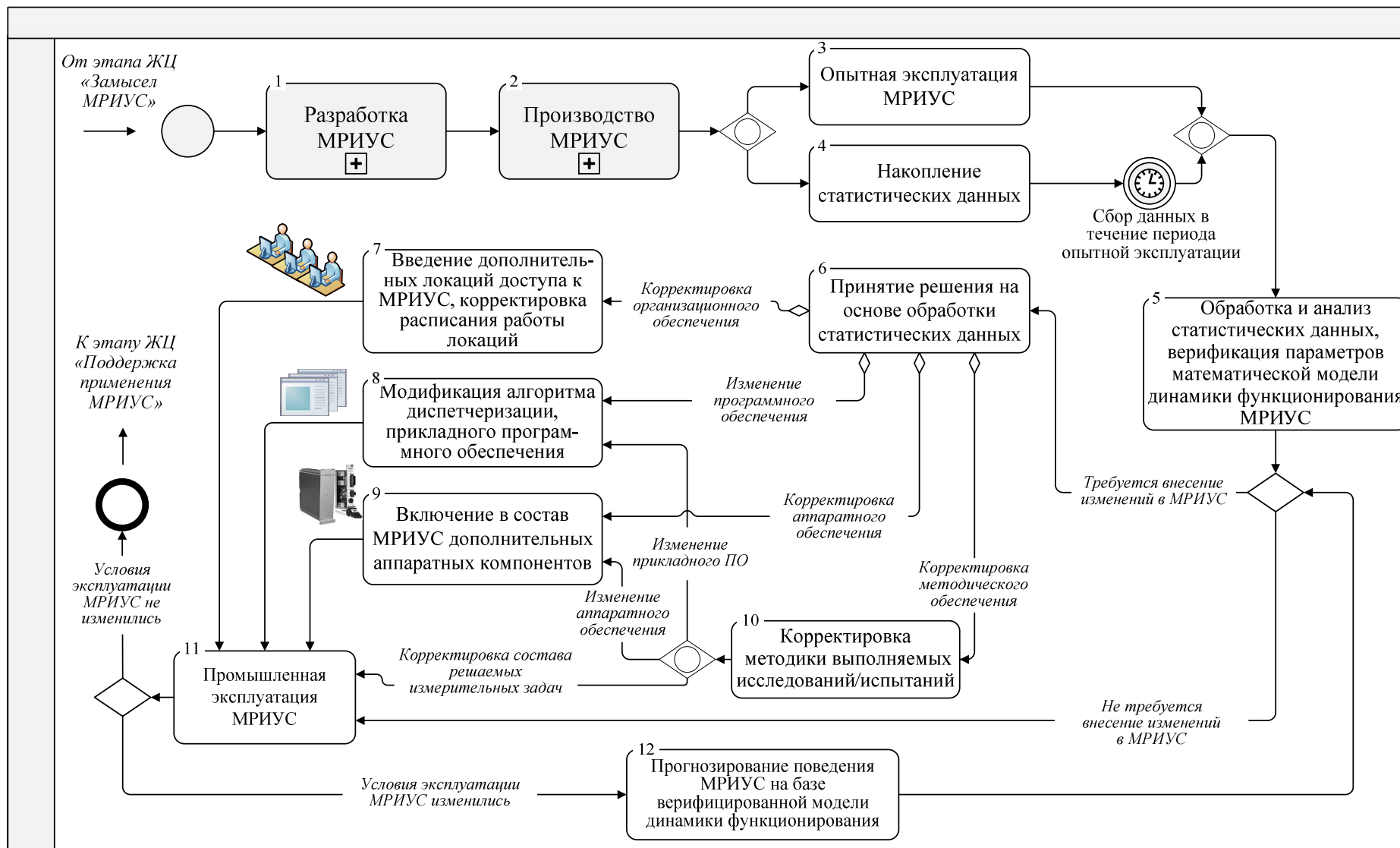


Рисунок 5.5.2 – Блок-схема фрагмента жизненного цикла MRIUS

Накапливаемые в ходе опытной эксплуатации статистические данные о функционировании МРИУС (блок 4) и результаты оценки удовлетворенности пользователей используются в целях:

- идентификации и верификации соответствующей математической модели динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания (блок 5);
- анализа и принятия решения о необходимости внесения определенных изменений в МРИУС (блоки 6–10).

В качестве соответствующих технических и организационных мероприятий, решение о необходимости реализации которых принимается на основе анализа накопленных статистических данных, рассматриваются следующие (блоки 7–10):

- введение дополнительных локаций доступа;
- корректировка расписания работы удаленных локаций;
- модификация используемого алгоритма диспетчеризации (см. п. 4.2 – 4.4);
- модификация программного и аппаратного обеспечения МРИУС (включение в состав МРИУС или исключение «каналов обслуживания», построение системы с внутренним разделением каналов и пр.);
- корректировка методики проводимых на основе МРИУС экспериментальных исследований/испытаний;
- корректировка дизайна и функциональных возможностей графического интерфейса пользователя МРИУС.

Проектирование МРИУС на основе типовых аппаратных структур (п. 3.1), применение интегрированных сред разработки, модульность конструктивно-технологической реализации в соответствии с рассмотренными в параграфе 2.2 принципами иерархичности и унификации, положенными в основу предложенной методологии, обеспечивают минимальными затратами возможность изменения/дополнения функционала разработанной системы в процессе ее опытной и дальнейшей промышленной эксплуатации. Например, комплект запасных аппаратных компонентов МРИУС может быть подобран на основе анализа разработанных в диссертации математических моделей (см. п. 3.4) с учетом реализуемого конструктивно-технологического исполнения и заданных пределов возможного изменения нагрузки.

Верификация математической модели динамики МРИУС (блок 5) выполняется посредством исследования эмпирических функций распределения интервалов

размышления пользователей, времени обслуживания заданий, времени ожидания результатов выполнения заданий и пр. (см. рисунок 3.4.1). Верифицированная математическая модель (см. п. 3.4) применяется для прогнозирования поведения МРИУС на основе проведения вычислительных экспериментов при изменении ее параметров и/или условий эксплуатации (блоки 11, 12).

Рассмотренная методика (рисунок 5.5.2) обеспечивает возможность модификации МРИУС на основе компонентов предложенной в диссертации методологии в процессе жизненного цикла в целях адаптации к возможным изменениям ее условий эксплуатации. Результаты экспериментальных исследований и апробации разработанных в диссертации компонентов и методологии проектирования МРИУС в целом, описываются в главе 6.

5.6 Выводы по главе 5

1. На основе методов цифровой спектрально-весовой обработки сигналов разработано базовое измерительное обеспечение МРИУС, которое представлено алгоритмами спектрального измерения параметров сигналов, измерительными подпрограммами, исследовательским аппаратно-программным комплексом, комплексом базовых унифицированных виртуальных приборов. Предложенный комплекс реализует решения по выполнению измерений в диалоговом режиме и решает задачи унификации подходов и сокращения сроков разработки компонентов аппаратно-программного обеспечения МРИУС для ряда областей их применения.

2. Разработанный и созданный исследовательский аппаратно-программный комплекс спектрально-весового измерения параметров сигналов решает в том числе задачи оценки погрешности и длительностей функциональных операций измерения, выполняемых на основе рассмотренных алгоритмов и применяемого аппаратного обеспечения. Для разработанного и созданного комплекса базовых унифицированных виртуальных приборов предложена методика их модификации в соответствии с решаемыми измерительными задачами, которая применяется на этапе проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС.

3. На основе проведенных в диссертации исследований основных типов графического интерфейса пользователя и применяемых визуальных информационных абстракций разделяемого ресурса разработаны базовые шаблоны проектирования

соответствующего прикладного программного обеспечения МРИУС. Предложена методика проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС с применением базовых шаблонов и ряда руководящих документов, которая представлена блок-схемой ее алгоритма.

4. Разработанные в ходе исследований решения в комплексе с данными о длительностях функциональных операций и результатами проектной деятельности (в виде электронного архива конструкторской и программной документации) предложено интегрировать в базу данных инженерных решений МРИУС. Приведена методика формирования базы данных в процессе разработки образцов МРИУС, которая представлена блок-схемой ее алгоритма. Разработаны информационный состав базы данных, а также структурная схема взаимодействия с ней разработчика при решении проектных задач и итерационном пополнении новыми данными.

5. Разработана методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками, представленная блок-схемой ее алгоритма. Данная методика в отличие от ранее известных объединяет в своем составе подходы разработки их аппаратных и программных компонентов с точки зрения функционирования как АСЭИ и СМО, обеспечивает аккумулирование и возможность применения положительного опыта предыдущих разработок, а также реализует процедуру поиска проектного решения МРИУС с наилучшим значением показателя технического уровня,

6. Предложена методика адаптации МРИУС, в рамках которой реализуется корректировка аппаратно-программного обеспечения МРИУС, методического и организационного обеспечения их эксплуатации на основе применения созданной специализированной подпрограммы регистрации и накопления статистических данных о функционировании как СМО. Данная методика предназначена для сопровождения и анализа функционирования МРИУС, а также последующей их адаптации на этапах опытной и промышленной эксплуатации.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Апробация и экспериментальные исследования разработанных и описанных в предыдущих главах компонентов методологии выполнены в ходе разработки и эксплуатации комплекса промышленных и опытных образцов МРИУС автоматизации экспериментальных исследований для ряда областей их практического применения.

В пункте 6.1.1 рассмотрены результаты апробации компонентов предложенной в диссертации методологии в процессе разработки опытных образцов МРИУС автоматизации экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей. Функциональные возможности разработанных на основе результатов диссертационного исследования промышленных образцов МРИУС в области автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований приводятся в пункте 6.1.2.

На основе методики, рассмотренной в параграфе 5.5 проведены экспериментальные исследования функционирования промышленных образцов МРИУС автоматизации научного и учебного эксперимента как систем массового обслуживания в процессе их опытной эксплуатации на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Соответствующие результаты экспериментальных исследований представлены в параграфе 6.2.

В параграфе 6.3 приведены результаты экспериментальных исследований разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования МРИУС.

Внедрение результатов диссертационного исследования обобщается в параграфе 6.4.

6.1 Апробация результатов диссертации

6.1.1 МРИУС автоматизации экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей

6.1.1.1 Многопользовательская распределенная измерительно-управляющая система квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи

В целях обеспечения глобальной круглосуточной связи и вещания широкое применение получили космические аппараты (КА), располагаемые на геостационарной орбите [395]. Для решения задачи допуска земных станций спутниковой связи (ЗССС) к работе через бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) космического аппарата применяются специализированные наземные системы, на основе которых выполняется подготовка и проведение соответствующих квалификационных испытаний [396]. Типовая структура таких систем включает в свой состав антенный пост, комплекс управления антеннами, радиоизмерительное оборудование и специализированное рабочее место оператора [397, 398]. На рисунке 6.1.1 приведена обобщенная структурная схема распределенной измерительно-управляющей системы, решающей задачи проведения квалификационных испытаний ЗССС.

В рамках проведения испытаний на основе представленной на рисунке 6.1.1 системы и выделенного канала бортового ретрансляционного комплекса осуществляется измерение диаграммы направленности антенны ЗССС на передачу, кроссполяризационной развязки, долгосрочной стабильности частоты и эквивалентной изотропной излучаемой мощности, диаграммы направленности на прием антенны ЗССС и др. Каждая из рассмотренных операций представляет ряд однократных измерений, выполняемых с использованием оборудования измерительной цепи системы, на основе обработки результатов которых определяются искомые характеристики ЗССС.

В процессе проведения квалификационных испытаний на основе представленной на рисунке 6.1.1 системы оператором с его рабочего места удаленно выполняется координация действий оператора тестируемой ЗССС (например, с помощью телефонной связи), а также устанавливаются параметры конфигурации измерительной цепи посредством взаимодействия с визуальным интерфейсом программного комплекса, установленного на ПЭВМ рабочего места.

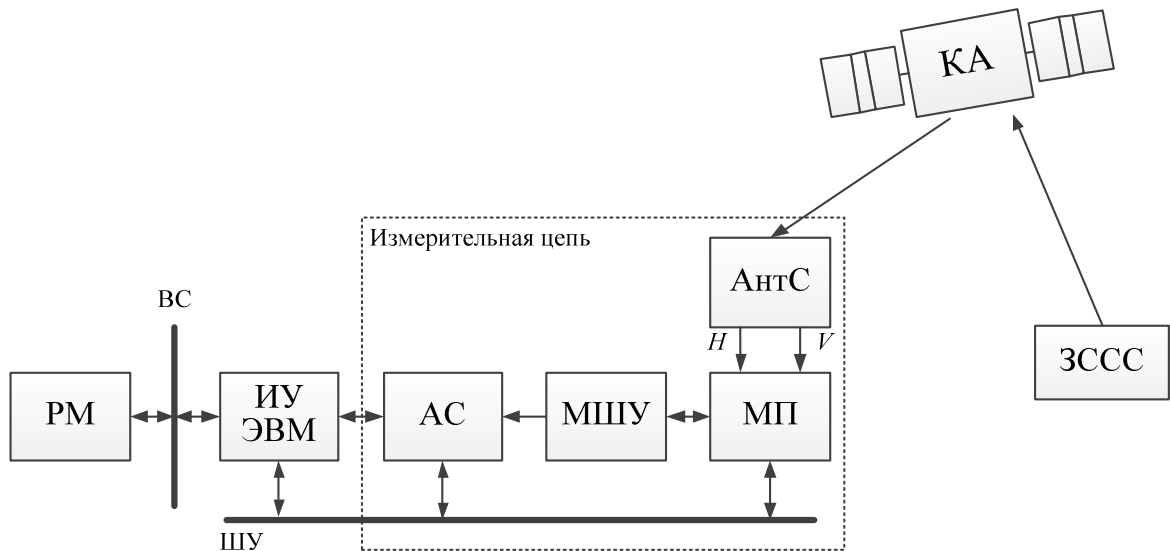


Рисунок 6.1.1 – Обобщенная структурная схема распределенной измерительно-управляющей системы квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи: РМ – рабочее место оператора системы квалификационных испытаний; ВС – вычислительная сеть; ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; АС – анализатор спектра; МШУ – малошумящий усилитель; МП – матричный переключатель; АнтС – антенная система; КА – космический аппарат; ЗССС – земная станция спутниковой связи; ШУ – шина управления; H – выход горизонтальной поляризации; V – выход вертикальной поляризации

Объем выполняемых в процессе квалификационных испытаний измерений, частотный ресурс полезной нагрузки современных КА и число тестируемых ЗССС обуславливают соответствующие временные затраты на формирование эксплуатационной загрузки БРК КА. Например, для конфигурации БРК, включающей в свой состав 40 транспондеров шириной 36 МГц, полосы частот, занимаемой каждым оператором в 4 МГц, и принятой средней продолжительность проведения испытаний для одной станции 2 часа, суммарная продолжительность квалификационных испытаний может быть рассчитана на основе следующего выражения:

$$T_{\text{КИ}} \approx \frac{n_3 \cdot K^{\text{СТВ}} \cdot \Delta F}{\Delta F_{\text{ЗС}}} \cdot \bar{t}^{\text{КИ}} = \frac{0,8 \cdot 40 \cdot 36}{4} \cdot 2 = 576 \text{ ч}, \quad (6.1.1)$$

где $K^{\text{СТВ}}$ – число транспондеров БРК КА; ΔF – ширина одного транспондера БРК КА; $n_3 = 0,8$ – коэффициент, учитывающий наличие защитного интервала между полосами занимаемых частот ЗССС [395]; $\Delta F_{\text{ЗС}}$ – полоса частот, занимаемая каждой ЗССС; $\bar{t}^{\text{КИ}}$ – средняя продолжительность проведения испытаний для одной ЗССС.

Таким образом, при восьмичасовом рабочем дне суммарная продолжительность квалификационных испытаний для рассмотренного примера конфигурации БРК составляет 72 дня. Возможное значение T^{KI} (см. выражение (6.1.1)) зависит от конфигурации БРК КА и планируемой эксплуатационной загрузки его частотно-энергетического ресурса. При этом, например:

- общее число ЗССС, работающих в космической группировке *KazSat*, состоящей из двух космических аппаратов, превышает 11600 станций [399] (т.е. отношение $\frac{n_3 \cdot K^{CTB} \cdot \Delta F}{\Delta F_{3c}}$ в выражении (6.1.1) в среднем для одного КА принимает значение 5800 станций);
- БРК КА «Экспресс АМ-6» включает в свой состав 72 транспондера с общим частотным ресурсом более 2700 МГц, а БРК КА «Ямал-601» – свыше 400 «эквивалентных» транспондера [400, 401].

Продолжительность этапа квалификационных испытаний ЗССС обуславливает соответствующий «вынужденный простой» частотно-энергетического ресурса БРК космического аппарата, находящегося на орбите и вырабатывающего свой срок активного существования, при этом согласно результатам исследований, опубликованным в работе [402], среднерыночная годовая стоимость аренды одного транспондера БРК составляет около 1 млн долларов.

Повышение общей производительности работ при проведении квалификационных испытаний и, как следствие, сокращение общей длительности формирования эксплуатационной загрузки частотно-энергетического ресурса БРК КА может быть достигнуто за счет обеспечения возможности проведения квалификационных испытаний для нескольких ЗССС одновременно на основе единого комплекта оборудования измерительной цепи (см. рисунок 6.1.1) [152, 153]. Рассмотрим процесс работы системы, приведённой на рисунке 6.1.1, в рамках которого можно выделить следующие характерные временные интервалы ее функционирования:

- временной интервал, затрачиваемый на работу с оператором ЗССС в части координации изменений направленности антенной системы по азимуту и углу места, установки уровня мощности передаваемой несущей, а также на визуализацию результатов измерения на экране, проведение курсорных измерений, обработку и анализ их результатов;

- временной интервал, необходимый непосредственно для проведения измерений с использованием оборудования измерительной цепи [396–398].

Таким образом, в «интервалы размышления» оператора происходит «простои» оборудования измерительной цепи, что обуславливает необходимость исследования возможности построения МРИУС, обеспечивающей решение соответствующей прикладной задачи квалификационных испытаний ЗССС (см. п. 1.2.1).

Разработанная на основе результатов диссертации обобщенная структурная схема многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи представлена на рисунке 6.1.2. Дополнительно размещаемый на измерительно-управляющей ЭВМ диспетчер разделяемого ресурса (см. рисунок 1.2.1) обеспечивает буферизацию и заданную очередность обработки поступающих заданий на измерение при совместном доступе операторов с разных рабочих мест. В качестве разделяемого ресурса в рассматриваемой МРИУС (см. рисунок 6.1.2) выступает оборудование измерительной цепи: анализатор сигнала, малошумящий усилитель и антенная система.

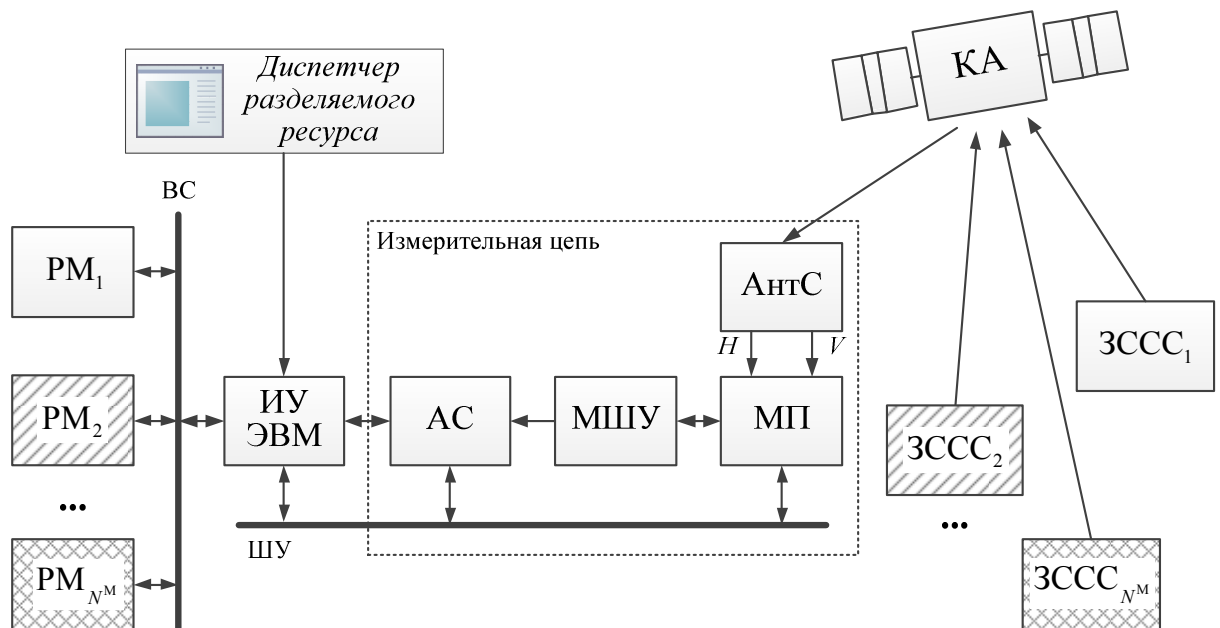


Рисунок 6.1.2 – Обобщенная структурная схема МРИУС квалификационных испытаний ЗССС: N^M – число организуемых рабочих мест

При проведении квалификационных испытаний ЗССС на основе представленной на рисунке 6.1.2 МРИУС каждый n -й оператор системы на основе своего рабочего места

независимо от других осуществляет координацию действий оператора только одной прикрепленной к нему n -й тестируемой ЗССС, а также формирует с соответствующей n -й ПЭВМ рабочего места задание на установку конфигурации анализатора сигналов, антенной системы и выполнение с их помощью измерений параметров сигнала, передаваемого соответствующей прикрепленной n -й тестируемой ЗССС, где $n = 1, 2, \dots, N^M$.

Соответствующая координация действий операторов тестируемых ЗССС в части изменения направленности их антенн по азимуту и углу места, установки уровня мощности передаваемой несущей и пр. может выполняться, например, с помощью телефонной связи или сетевых сервисов передачи текстовых и голосовых сообщений на основе ПЭВМ рабочих мест (на рисунке 6.1.2 не приведены).

Сигналы со всех N^M тестируемых ЗССС передаются через бортовой ретрансляционный комплекс на антенную систему МРИУС с частотным разделением. На основе результатов выполняемых измерений параметров сигналов и их обработки на рабочих местах определяются исследуемые характеристики соответствующих тестируемых ЗССС [396, 398].

Результаты оценок граничных параметров реализуемого сценария диалога и параметров оперативности функционирования МРИУС квалификационных испытаний ЗССС, выполненные на основе разработанных в диссертации компонентов методологии (п. 3.1, 3.4, 3.5), приведены на рисунках 6.1.3, 6.1.4 в виде графиков сводных зависимостей.

Приведенные оценки выполнены с применением средств имитационного моделирования на примере экспоненциального распределения интервалов размышления операторов, экспоненциального распределения времени выполнения заданий, базового алгоритма диспетчеризации *FIFO* (см. п. 3.4), среднего значения выполнения конфигурационных и измерительных заданий $\bar{t}_{\text{обсл}} = 5$ секунд и ЛВС с пропускной способностью 10 Мбит/с (см. п. 3.4.1).

На рисунке 6.1.3 приведены графики зависимостей числа организуемых рабочих мест (одновременно тестируемых ЗССС) N^M от среднего значения времени размышления операторов $\bar{t}_{\text{разм}}$ для различных значений коэффициента замедления ϵ (см. п. 1.2.3, выражение (3.4.7)), полученные средствами математического моделирования (см. п. 3.4).

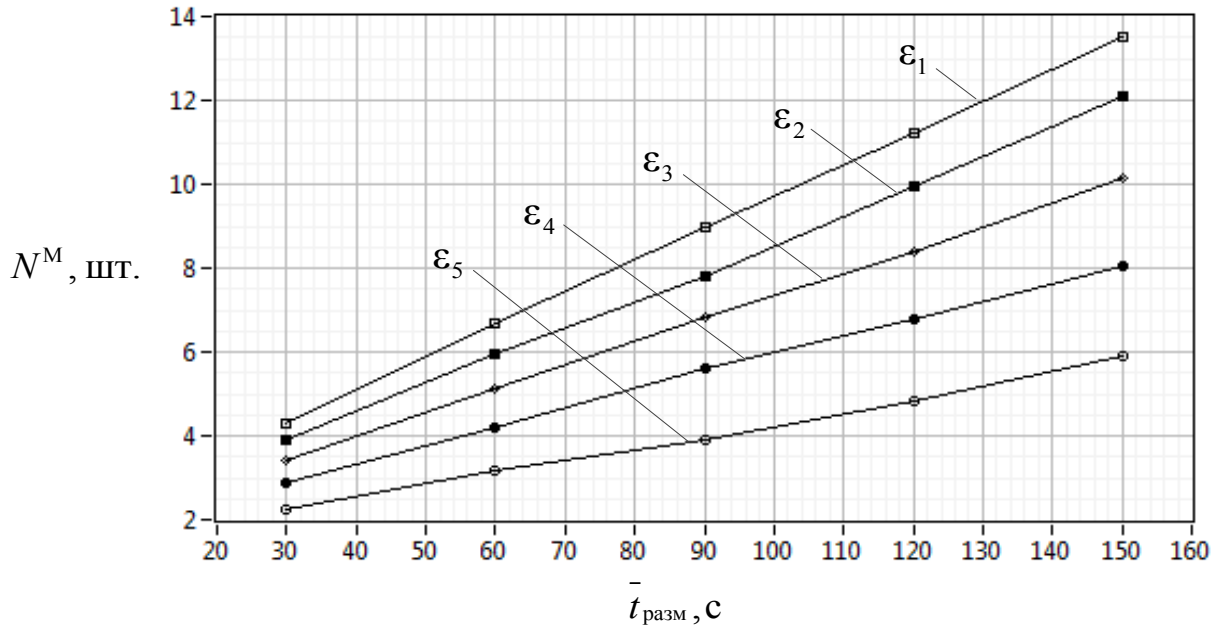


Рисунок 6.1.3 – Графики сводных зависимостей $N^M = f(\bar{t}_{\text{разм}})$ при $\bar{t}_{\text{обсл}} = 5$ с:

$$\epsilon_1 = 1,2; \epsilon_2 = 1,3; \epsilon_3 = 1,4; \epsilon_4 = 1,5; \epsilon_5 = 1,6$$

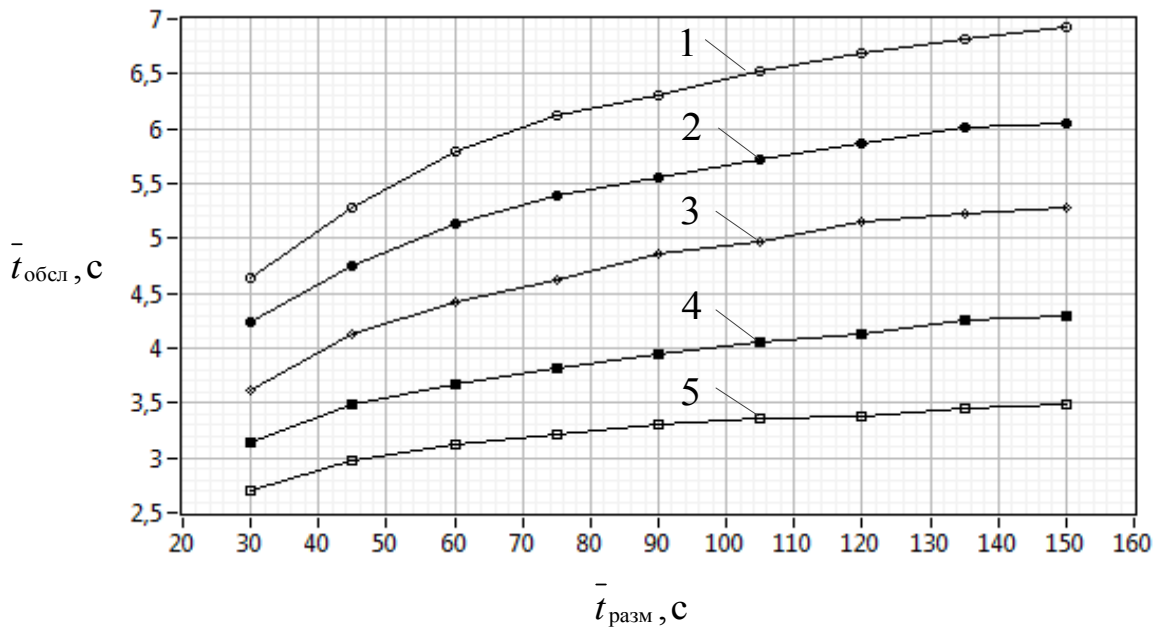


Рисунок 6.1.4 – Графики сводных зависимостей $\bar{t}_{\text{обсл}} = f(\bar{t}_{\text{разм}})$

для $t_{\text{ож_пор}} = 7,5$ с: 1 – $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}}) = 0,7$; 2 – $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}}) = 0,75$;
 3 – $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}}) = 0,8$; 4 – $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}}) = 0,85$; 5 – $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}}) = 0,9$

Приведенные графики зависимостей, построенные на основе принятых гипотез и заданного среднего времени выполнения заданий, позволяют оценить число возможных организуемых рабочих мест в зависимости от среднего времени размышления операторов при требуемой степени снижения оперативности функционирования МРИУС (рисунок 6.1.2) относительно прототипа, функционирующего в монопольном режиме (см. рисунок 6.1.1).

На рисунке 6.1.4 приведены графики зависимостей среднего времени выполнения заданий $\bar{t}_{\text{обсл}}$ от среднего значения времени размышления операторов $\bar{t}_{\text{разм}}$ для различных значений критерия оперативности $P_{t_{\text{ож_пор}}}$ (см. выражение (3.4.9)) на примере пяти рабочих мест ($N^M = 5$). Полученные с учетом сформулированных гипотез сводные зависимости позволяют оценить требования к среднему времени выполнения заданий $\bar{t}_{\text{обсл}}$ в зависимости от $\bar{t}_{\text{разм}}$ при заданных значениях вероятности $P(t_{\text{ож}} < t_{\text{ож_пор}})$ на примере $t_{\text{ож_пор}} = 7,5$ с.

Более подробно результаты исследования возможности реализации МРИУС квалификационных испытаний ЗССС, оценка параметров оперативности и результаты оценки граничных параметров реализуемого сценария диалога в соответствии с заданными параметрами оперативности рассмотрены в работах [152, 153, 321, 403, 404].

При организации испытаний на основе МРИУС их суммарная продолжительность сокращается пропорционально числу организованных рабочих мест. Соответственно, повышение производительности работ, выполняемых с использованием рассматриваемого подхода, можно оценить на основе следующего выражения:

$$L = \frac{T^{\text{КИ}}}{T^{\text{КИ}*}} = \frac{J^{\text{ЗС}} \cdot \bar{t}^{\text{КИ}}}{\left[\frac{J}{N^M} \right] \cdot \bar{t}^{\text{КИ}}} = J^{\text{ЗС}} \cdot \left[\frac{J^{\text{ЗС}}}{N^M} \right]^{-1}, \quad (6.1.2)$$

где $T^{\text{КИ}}$ – суммарная продолжительность последовательных испытаний ЗССС (см. выражение (6.1.1)); $T^{\text{КИ}*}$ – суммарная продолжительность испытаний ЗССС на основе МРИУС; $J^{\text{ЗС}}$ – количество испытуемых ЗССС; $\bar{t}^{\text{КИ}}$ – средняя продолжительность испытания одной ЗССС; $\lceil \cdot \rceil$ – знак округления в большую сторону.

Например, для $N^M = 3$ и $J^{\text{ЗС}} = 20$ при проведении испытаний ЗССС обеспечивается повышение производительности работ приблизительно в 2,9 раза, а для $N^M = 10$ и $J^{\text{ЗС}} = 100$, $L = 10$, что для ряда конфигураций БРК КА и планируемых вариантов их эксплуатационной загрузки (см. выражение (6.1.1)) является актуальным.

На рисунке 6.1.5 схематично представлен график окупаемости затрат на проектирование, изготовление и запуск коммерческого КА связи и ретрансляции геостационарной орбиты на основе отдельных этапов его жизненного цикла. После запуска КА на расчетную орбиту (точка t^3) начинается отсчет его срока активного существования, который завершается в точке t^{CAC} . На представленном рисунке сплошной линией на интервале $(t^{\text{КЭ}}, t^{\text{CAC}})$ приведен график окупаемости затрат на космический аппарат при последовательном проведении квалификационных испытаний ЗССС, пунктирной линией на интервале $(t^{\text{КЭ*}}, t^{\text{CAC}})$ показан график окупаемости затрат при проведении испытаний с использованием МРИУС.

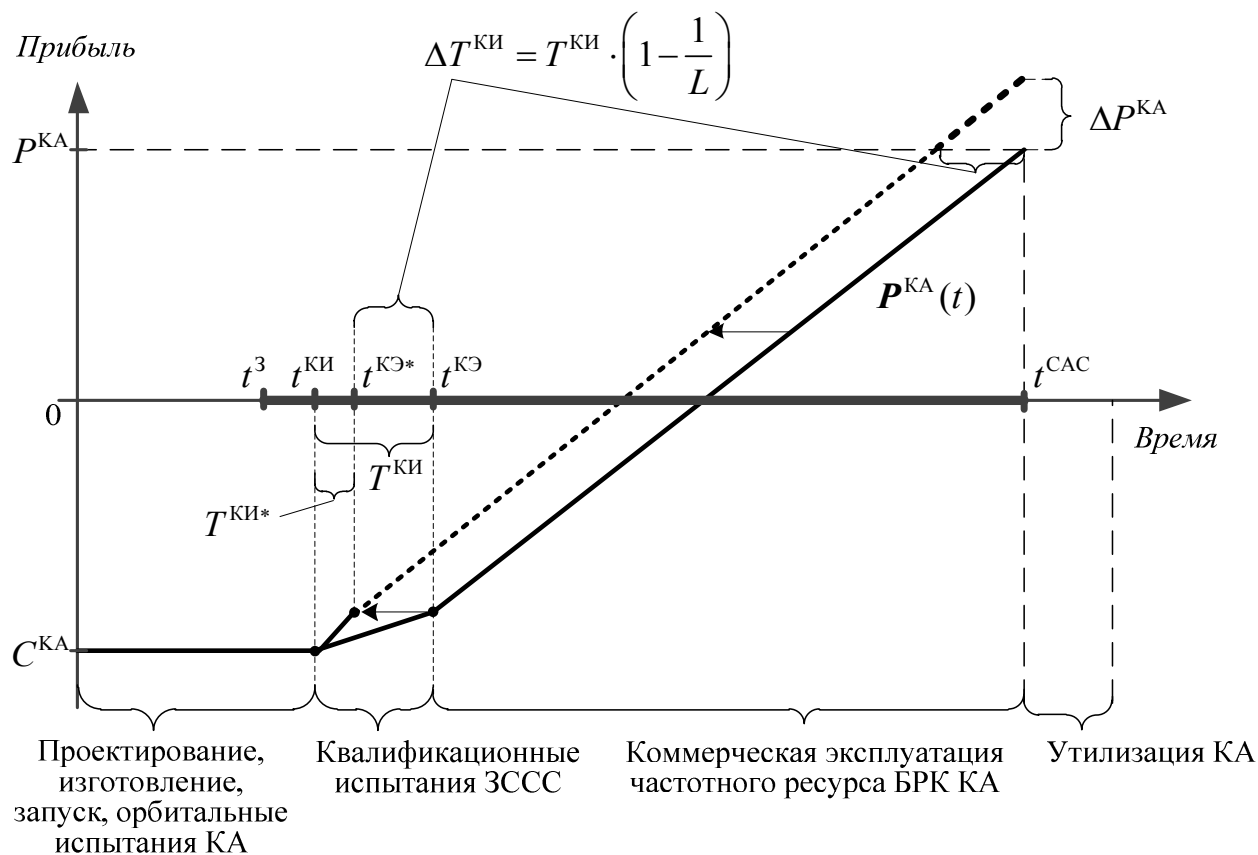


Рисунок 6.1.5 – График окупаемости затрат на космический аппарат: $C^{\text{КА}}$ – затраты на проектирование, изготовление и запуск КА; $P^{\text{КА}}$ – прибыль, полученная от коммерческой эксплуатации КА; $P^{\text{КА}}(t)$ – функция, характеризующая рост прибыли от коммерческой эксплуатации КА; t^3 – запуск КА на орбиту; $t^{\text{КИ}}$ – начало этапа квалификационных испытаний ЗССС; $t^{\text{КЭ}}$ и $t^{\text{КЭ*}}$ – начало этапа коммерческой эксплуатации КА при традиционном подходе к испытаниям ЗССС и испытаниях на основе МРИУС; t^{CAC} – завершение срока активного существования КА; $T^{\text{КИ}}$ – продолжительность этапа квалификационных испытаний ЗССС при традиционном подходе; $T^{\text{КИ*}}$ – продолжительность этапа квалификационных испытаний ЗССС на основе МРИУС; $\Delta T^{\text{КИ}}$ – абсолютное сокращение длительности квалификационных испытаний ЗССС; $\Delta P^{\text{КА}}$ – дополнительная прибыль, обусловленная сокращением длительности этапа квалификационных испытаний ЗССС

Реализация приведенной на рисунке 6.1.2 МРИУС позволяет сократить в L раз длительность этапа формирования эксплуатационной загрузки частотного ресурса БРК КА и, как следствие, обеспечить возможность его ранней целевой эксплуатации потребителями, тем самым увеличивая прибыль от коммерческой эксплуатации КА в целом в течение его ограниченного срока активного существования (см. рисунок 6.1.5). Значение ΔP^{KA} зависит от относительного сокращения длительности проведения квалификационных испытаний на основе МРИУС, а также вида функции $P^{KA}(t)$ и может быть определено на основе следующего общего выражения: $\Delta P^{KA} \approx P^{KA}(t^{CAC} + \Delta T^{KI}) - P^{KA}(t^{CAC})$ [404].

В рамках диссертационной работы опытный образец рассмотренной на рисунке 6.1.2 МРИУС прошел успешное прототипирование на основе испытательной материально-технической базы Акционерного общества «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнёва» в части реализации управления и выполнения измерений в интерактивном диалоговом режиме на основе промышленной модульной платформы *PXI* [265]. Для анализатора сигналов *PXI-5667* в результате обработки 1000 сформированных случайным образом заданий по выполнению его настройки, однократного измерения и визуализации спектра входного сигнала экспериментально получены следующие параметры обслуживания заданий: $\bar{t}_{обсл} = 1,2$ с; $\sigma_{t_{обсл}} = 0,65$ с.

Каждое сформированное задание содержало:

- значение центральной частоты, изменяемое случайным образом в диапазоне от 2 до 2,5 ГГц;
- значение полосы обзора, изменяемое случайным образом от 1 до 50 МГц;
- значение частного разрешения, изменяемое случайным образом в диапазоне от 1 кГц до 100 кГц.

Предложенное в рамках диссертации техническое решение МРИУС квалификационных испытаний ЗССС (см. рисунок 6.1.2) защищено патентом РФ на изобретение № 2620596 [405]. Ряд разработанных технических решений, учитывающих специфику выполняемых заданий операторов на основе рассмотренной МРИУС (см. рисунок 6.1.2) и обеспечивающих возможность повышения производительности выполняемых на ее основе работ, также защищены патентами РФ на изобретения [338, 339].

По результатам проведенной апробации в базу данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 5.3.2) вошли:

- вариант реализации аппаратного-программного обеспечения измерительного канала МРИУС на основе промышленной системы *PXI*;
- длительности функциональных операций для ряда прикладных измерительных задач, выполняемых на его основе.

6.1.1.2 Аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения БРЭА

Одним из приборов, входящих в состав бортового комплекса управления космических аппаратов (КА) производства Акционерного общества «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева», является *блок управления (БУ)* в состав которого входят *вычислительный модуль (ВМ)* и комплекс *интерфейсных модулей сопряжения (ИМС)*, реализующих управление соответствующими системами, узлами или агрегатами КА (системой коррекции, системой электропитания, пиропатронами, приводами, нагревателями и пр.).

Вычислительный модуль БУ является унифицированным компонентом, а интерфейсные модули сопряжения разрабатываются с учетом реализуемой заданной конфигурации соответствующих служебных систем КА. Обмен данными между бортовым центральным вычислительным комплексом КА и ВМ БУ, как правило, осуществляется по мультиплексному каналу обмена, а взаимодействие между ВМ и соответствующими ИМС выполняется на основе специализированного внутриприборного интерфейса (ВПИ) [228, 406, 407]. Данный интерфейс обмена реализуется на основе специализированных микросхем или *IP-ядер*, загружаемых в программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и выполняющих функции контролеров внутриприборного интерфейса (КВПИ).

Обобщенная структурная схема блока управления приведена на рисунке 6.1.6 [228, 407, 408]. В процессе функционирования блока управления в составе КА через интервалы времени и в последовательности, определяемые текущей веткой алгоритма

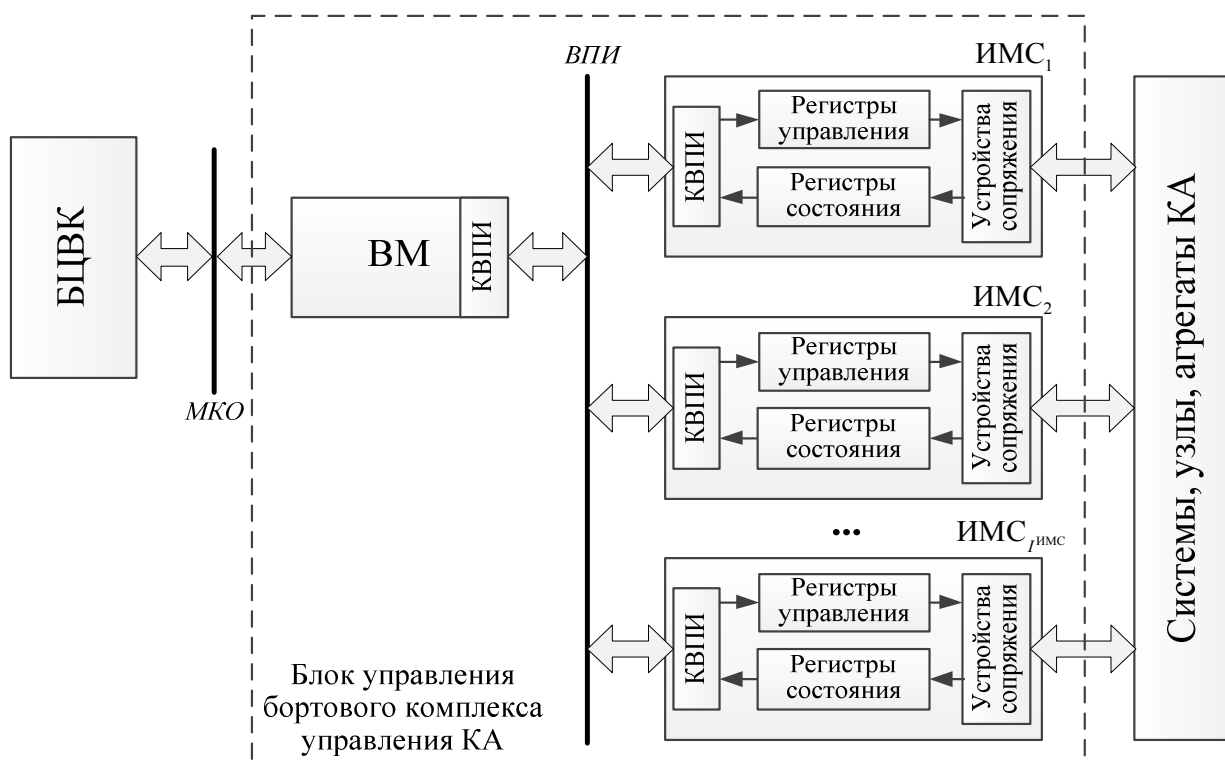


Рисунок 6.1.6 – Обобщенная структурная схема блока управления бортового комплекса управления: БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс; МКО – мультиплексный канал обмена; ВМ – вычислительный модуль; ВПИ – внутриприборный интерфейс обмена данными; КВПИ – контроллер внутриприборного интерфейса обмена;
 $I_{ИМС}$ – число ИМС в составе БУ

работы программного обеспечения ВМ, внешними источниками команд (БЦВК, линия контрольно-измерительной системы), вычислительный модуль блока управления по внутриприборному интерфейсу осуществляет обмен данными с соответствующими интерфейсными модулями сопряжения. Обмен данными выполняется на основе вызова программных модулей обращения к ИМС и включает в себя запись данных в регистры управления ИМС – слов данных управления – с последующим чтением содержания регистров состояния ИМС – слов данных состояния, отображающих результат исполнения выданных управляющих воздействий. На основе анализа содержания слов данных состояния в дальнейшем выполняется соответствующая ветка алгоритма программного обеспечения ВМ. Логика обработки и преобразования слов данных управления в слова данных состояния определяется схмотехнической реализацией ИМС.

Сложность алгоритма работы программного обеспечения ВМ, наличие нескольких режимов работы обусловили необходимость разработки испытательного комплекса, обеспечивающего возможность его наземной отработки [406]. Процедура тестирования программного обеспечения предусматривает возможность выдачи на ВМ внешних команд (см. рисунок 6.1.6) и необходимость обеспечения двухстороннего обмена данными между ВМ и соответствующими ИМС. Данный факт обуславливает необходимость наличия изготовленных и подключенных ИМС к ВМ, состав и параметры которых для разных КА, как правило, существенно различаются, что при проведении опережающего тестирования программного обеспечения на этапе разработки БРЭА в ряде случаев не представляется возможным, а в случае выполнения – является экономически нецелесообразным, так как приводит к затратам на комплектацию и изготовление дополнительных комплектов ИМС [406].

Решение задачи опережающего тестирования программного обеспечения ВМ БУ, в условиях отсутствия ИМС возможно на основе специализированного аппаратно-программного комплекса, эмулирующего их работу в составе БУ [408].

Обозначим слова данных управления, формируемые программным обеспечением ВМ, множеством

$$K_{сд} = \{K_{i^{имс}} | i^{имс} = 1, I^{имс}\}, \quad (6.1.3)$$

где $I^{имс}$ – число ИМС, входящих в состав БУ; $K_{i^{имс}}$ – подмножество слов данных управления, формируемых соответствующим программным модулем $i^{имс}$ -го ИМС.

Формируемые в ИМС слова данных состояния представим в виде множества

$$Z_{сд} = \{Z_{i^{имс}} | i^{имс} = 1, I^{имс}\}, \quad (6.1.4)$$

где $Z_{i^{имс}}$ – подмножество слов данных состояния, формируемых соответствующим $i^{имс}$ -м ИМС.

Таким образом, преобразование в ИМС подмножества слов данных управления $K_{i^{имс}}$ в подмножество слов данных состояния $Z_{i^{имс}}$ в обобщенном виде можно представить на основе *функций отношения* $f_{i^{имс}}$:

$$Z_{i^{имс}} = f_{i^{имс}}(K_{i^{имс}}), \quad (6.1.5)$$

совокупность которых образует множество:

$$F_{\text{сд}} = \{f_{i_{\text{имс}}} | i_{\text{имс}} = 1, I_{\text{имс}}\}, \quad (6.1.6)$$

где $F_{\text{сд}}$ – множество преобразований слов данных управления, реализуемых соответствующими интерфейсными модулями сопряжения, входящими в состав БУ.

Таким образом, эмулятор интерфейсных модулей сопряжения должен обеспечивать в соответствии с заданной логикой функционирования ИМС реализацию множества функций преобразования $F_{\text{сд}}$ для множества слов данных управления $K_{\text{сд}}$, формируемых в случайные моменты времени соответствующими программными модулями программного обеспечения ВМ. При этом согласно общей логике работы программного обеспечения ВМ новые слова данных управления не записываются в соответствующий ИМС, пока не будут считаны слова данных состояния, сформированные по результатам выполнения предыдущих, или же не будет превышено время ожидания их формирования.

В соответствии с вышеизложенным разрабатываемый эмулятор интерфейсных модулей сопряжения рассматривается как частный случай многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы, функционирующей в интерактивном диалоговом режиме. В данной системе под *терминалами пользователей* понимаются программные модули ПО ВМ, осуществляющие формирование и обмен данными с соответствующими интерфейсными модулями сопряжения под *заданиями* – записываемые в соответствующие регистры слова данных управления $K_{\text{сд}}$, под *процессом обслуживания заданий* – реализация функций преобразования слов данных $F_{\text{сд}}$, под *ответом* – формируемые в соответствующих регистрах слова данных состояния $Z_{\text{сд}}$.

Обобщенная структурная схема эмулятора ИМС как системы массового обслуживания приведена на рисунке 6.1.7.

В связи с тем, что управление обменом данными по внутрисприборному интерфейсу осуществляет ВМ (централизованная схема включения) [243] и моментом формирования заданий является завершение записи слов данных управления в соответствующие регистры управления ИМС, в исследуемой модели динамики функционирования эмулятора ИМС величина $\tilde{t}_{\text{св}}$ (см. п. 3.4) принимается равной нулю.

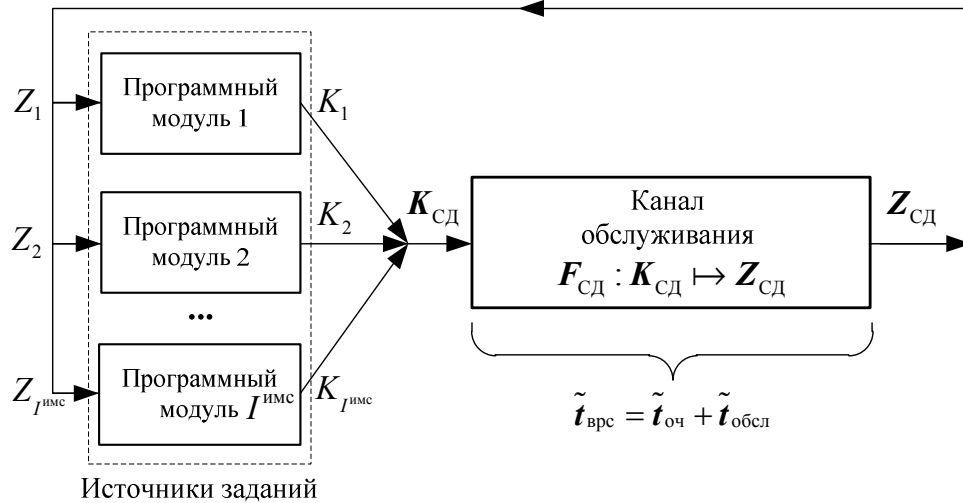


Рисунок 6.1.7 – Обобщенная структурная схема эмулятора интерфейсных модулей сопряжения как системы массового обслуживания

Базовой задачей разработки представленной на рисунке системы является выбор структуры ее построения и анализ основных подходов, применяемых при реализации канала обслуживания в целях обеспечения заданной оперативности функционирования. При этом под оперативностью функционирования эмулятора как СМО, характеризуемой величиной $\tilde{t}_{\text{врс}} = \tilde{t}_{\text{ож}}$ (см. рисунки 3.4.1, 6.1.7), понимается пребывание в очереди поступающих элементов множества $K_{\text{сд}}$ и время формирования элементов множества $Z_{\text{сд}}$ в соответствующих регистрах согласно функциям преобразования $F_{\text{сд}}$.

Решение сформулированной задачи выполнено на основе компонентов разработанной в ходе диссертации методологии. В рамках оценки параметров сценария диалога (см. п. 3.3) и формирования требований к оперативности функционирования разрабатываемого эмулятора проведена серия дополнительных экспериментальных исследований.

На основе результатов экспериментальных исследований режимов функционирования вычислительного модуля блока управления на базе наземного отладочного комплекса бортовой радиоэлектронной аппаратуры (НОК БРЭА) в АО «ИСС» [406], проведенных автором, были выделены следующие отличительные особенности представленной на рисунке 6.1.7 системы массового обслуживания:

- наличие нескольких видов формируемых программными модулями ИМС *слов данных управления* и соответствующие им временные ограничения, накладываемые на

оперативность формирования *слов данных состояния*, которые укрупненно могут быть разделены на следующие классы заданий:

- *класс № 1* – требуемое время формирования эмулятором *слов данных состояния* в соответствующих регистрах не более 12 мкс ($\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K1}} \leq 12 \text{ мкс}$);
- *класс № 2* – требуемое время формирования эмулятором *слов состояния* в соответствующих регистрах свыше 12 мкс, но менее 150 мс ($12 \text{ мкс} \leq \tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K2}} < 150 \text{ мс}$);
- широкое изменение интервалов времени между повторными обращениями к ИМС (например, от 10 мкс до 200 мс), значения которых зависят от выполняемой ветки алгоритма программного обеспечения вычислительного модуля, схемотехнической реализации и текущей конфигурации ИМС, текущего состояния систем, узлов, агрегатов КА, а также режима работы БУ и др. [406, 409].

Таким образом, на основании выделенных отличительных особенностей разрабатываемый аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения как *система массового обслуживания* должен обеспечивать заданную значениями $\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K1}}$ и $\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K2}}$ детерминированность обработки поступающих заданий (то есть реализацию режима жесткого реального времени) в условиях наличия неполных эмпирических сведений о параметрах входящего потока.

Апробация реализации канала обслуживания под управлением промышленной ЭВМ *iRobo-4000* в виде специализированного *IP*-ядра контроллера внутрисистемного интерфейса и сопряженных с ним функциональных регистров на базе ПЛИС платы цифрового реконфигурируемого ввода-вывода *PCI-7813R* в рамках оценки длительностей выполняемых функциональных операций (см. п. 3.3) показала следующее. Длительность программной процедуры обработки прерываний (чтение $\mathbf{K}_{\text{сд}}$, программное преобразование $\mathbf{F}_{\text{сд}}: \mathbf{K}_{\text{сд}} \mapsto \mathbf{Z}_{\text{сд}}$, запись $\mathbf{Z}_{\text{сд}}$ в соответствующие регистры ПЛИС), формируемых при поступлении новых значений $\mathbf{K}_{\text{сд}}$, для данного варианта исполнения аппаратно-программного обеспечения эмулятора составляет 10–15 мс ($\tilde{t}_{\text{обсл}} = 10\text{--}15 \text{ мс}$) без учета времени нахождения слов данных в очереди. То есть полученное в результате экспериментальных исследований значение $\tilde{t}_{\text{обсл}}$ для *слов данных управления*, относящихся к выделенному *классу № 1*, при реализуемом подходе

превышает значение $\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K1}}$ и, как следствие, не удовлетворяет заданным условиям функционирования эмулятора в режиме жесткого реального времени [228, 408].

На основании анализа результатов экспериментальных исследований функционирования ВМ и полученных результатов прототипирования канала обслуживания эмулятора ИМС как СМО (см. рисунок 6.1.7), для обеспечения требуемой оперативности функционирования эмулятор реализован на основе предложенной автором гибридной структуры, включающей в свой состав *однообъектовую* и *многообъектовую с индивидуальными каналами* базовые структуры построения МРИУС (см. п. 3.1). С учетом выделенной в результате экспериментальных исследований неоднородности типов *слов данных управления*, формирующих входящий поток, и требований к оперативности формирования *слов данных состояния*, множества $\mathbf{K}_{\text{СД}}$ и $\mathbf{Z}_{\text{СД}}$ были представлены следующим образом:

$$\mathbf{K}_{\text{СД}} = \mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K1}} \cup \mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K2}}, \quad (6.1.7)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{СД}} = \mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K1}} \cup \mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K2}}, \quad (6.1.8)$$

где $\mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K1}}$ и $\mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K2}}$ – множества *слов данных управления* эмулируемых ИМС, относящиеся к выделенным классам № 1 и 2; $\mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K1}}$ и $\mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K2}}$ – множества *слов данных состояния* эмулируемых ИМС, относящиеся к выделенным классам № 1 и 2. Соответственно,

$$\mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K1}} = \bigcup_{i=1}^{I_{\text{ИМС}}} K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}, \quad \mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K1}} = \bigcup_{i_{\text{ИМС}}=1}^{I_{\text{ИМС}}} Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}, \quad (6.1.9)$$

$$\mathbf{K}_{\text{СД}}^{\text{K2}} = \bigcup_{i=1}^{I_{\text{ИМС}}} K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}, \quad \mathbf{Z}_{\text{СД}}^{\text{K2}} = \bigcup_{i_{\text{ИМС}}=1}^{I_{\text{ИМС}}} Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}, \quad (6.1.10)$$

$$K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}, K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}} \subset K_{i_{\text{ИМС}}}, \quad Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}, Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}} \subset Z_{i_{\text{ИМС}}}, \quad (6.1.11)$$

где $K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}$, $K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}$ и $Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}$, $Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}$ – подмножества *слов данных управления* и формируемые на их основе подмножества *слов данных состояния*, относящиеся к выделенным классам № 1 и 2 для $i_{\text{ИМС}}$ -го ИМС.

Аналогичным образом выполнено разделение реализуемых *функций отношения*, представленных множеством $\mathbf{F}_{\text{СД}}$ (см. выражение (6.1.6)), по выделенным классам обрабатываемых *слов данных управления*:

$$F_{\text{СД}} = F_{\text{СД}}^{\text{K1}} \cup F_{\text{СД}}^{\text{K2}}, \quad (6.1.12)$$

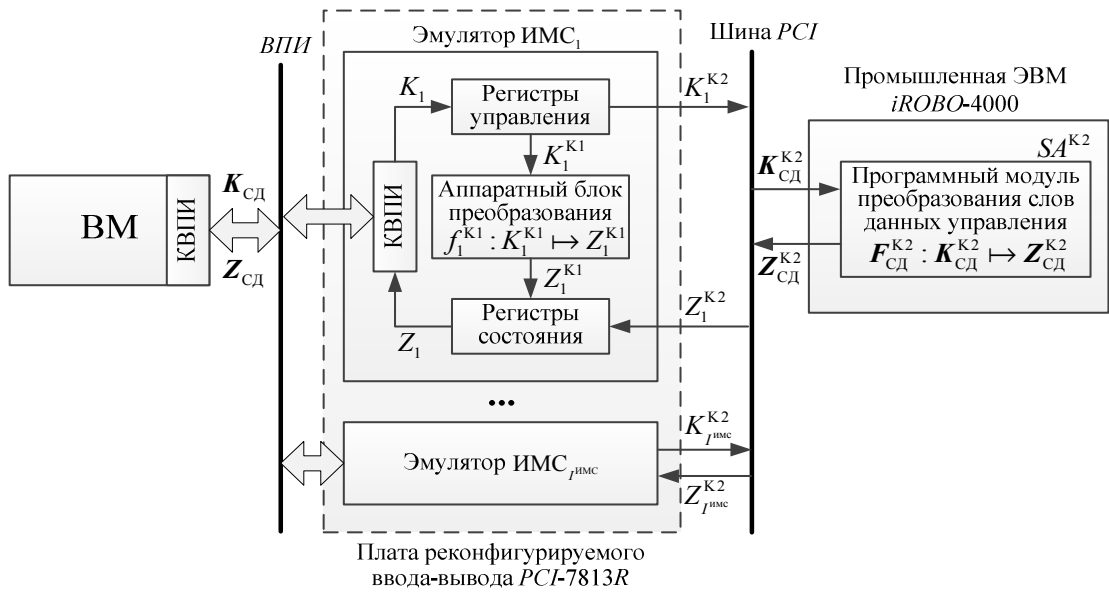
$$F_{\text{СД}}^{\text{K1}} = \bigcup_{i_{\text{ИМС}}=1}^{I_{\text{ИМС}}} f_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}, \quad f_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}} \subset f_{i_{\text{ИМС}}}, \quad (6.1.13)$$

$$F_{\text{СД}}^{\text{K2}} = \bigcup_{i_{\text{ИМС}}=1}^{I_{\text{ИМС}}} f_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}, \quad f_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}} \subset f_{i_{\text{ИМС}}}. \quad (6.1.14)$$

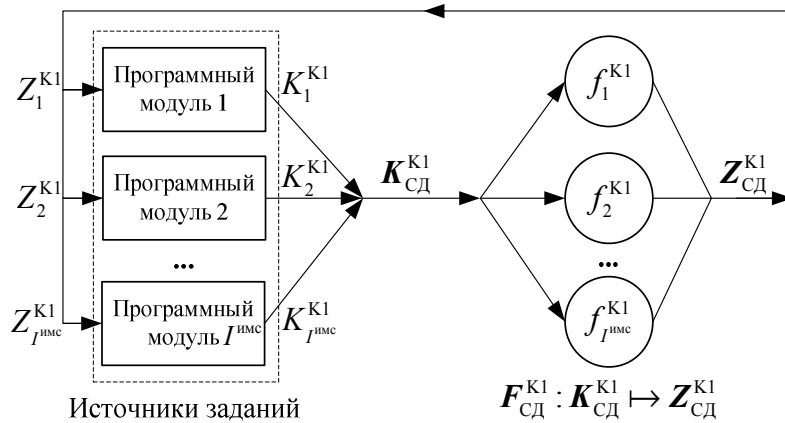
Разработанная структурная схема эмулятора интерфейсных модулей сопряжения, учитывающая выделенную в ходе экспериментальных исследований неоднородность требований к обработке слов данных управления, приведена на рисунке 6.1.8, *а* и включает в свой состав промышленную ЭВМ и плату цифрового реконфигурируемого ввода-вывода *PCI-7813R*.

В целях сокращения времени формирования эмулятором ИМС в соответствующих регистрах *слов данных состояния* для *слов данных управления* класса № 1 (см. выражения (6.1.9), (6.1.13)) *индивидуальные каналы* (реализация функций отношения $f_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}$) выполнены в виде аппаратных блоков преобразования с использованием ресурсов ПЛИС (см. рисунок 6.1.8, *а*). Данный подход обеспечивает детерминированность формирования $Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K1}}$ и возможность организации *индивидуальных каналов* для нескольких эмулируемых интерфейсных модулей сопряжения на основе ПЛИС одной платы *PCI-7813R*.

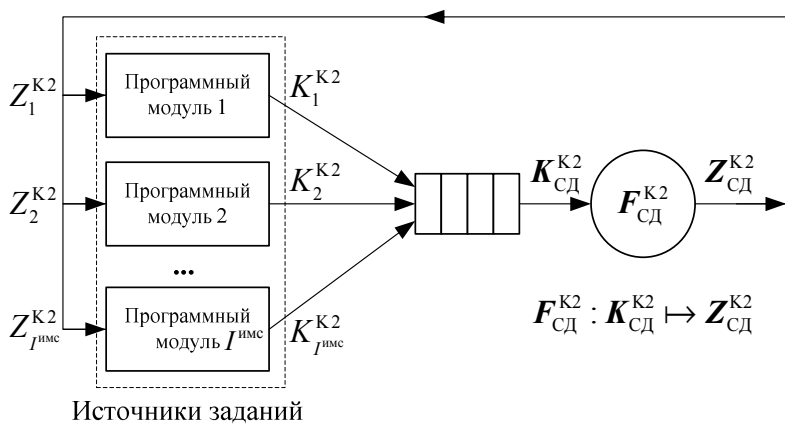
Реализация преобразований на основе функций отношения $F_{\text{СД}}^{\text{K2}}$ (см. выражение (6.1.14)) эмулятором ИМС выполнена посредством прикладного программного модуля – SA^{K2} , функционирующего на промышленной ЭВМ *iRobo-4000* (см. рисунок 6.1.8, *а*). При поступлении новых значений $K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}$ в регистры управления формируется единая для всех эмулируемых ИМС очередь прерываний, которые в порядке их формирования обрабатываются в программном модуле, посредством чтения $K_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}$, преобразования и записи $Z_{i_{\text{ИМС}}}^{\text{K2}}$ в соответствующие регистры ПЛИС. Представление разработанного аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения в виде систем массового обслуживания при обработке заданий *класса № 1* и *класса № 2* приведено на рисунках 6.1.8, *б* и 6.1.8, *в*.



а



б



в

Рисунок 6.1.8 – Аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения:
 а – обобщенная структурная схема; б – представление в виде системы массового обслуживания при обработке слов данных управления класса № 1; в – представление в виде системы массового обслуживания при обработке слов данных управления класса № 2

Рассмотрим систему массового обслуживания представленную на рисунке 6.1.8, б. Обслуживание *заданий класса №1* (выполнение преобразования $F_{СД}^{K1} : K_{СД}^{K1} \mapsto Z_{СД}^{K1}$) выполняется посредством реализованных параллельных *обслуживающих приборов*, число которых равно числу ИМС. При этом под *обслуживающим прибором* понимается IP-ядро КВПИ [410] и соответствующий аппаратный блок преобразования, реализованные с использованием ресурсов ПЛИС (см. рисунки 6.1.8, а, 6.1.8, б). Число *обслуживающих приборов* для $K_{СД}^{K1}$ равно числу ИМС, входящих в состав блока управления, что исключает накопление поступающих *заданий* в очереди. Таким образом, время реакции эмулятора равно времени обслуживания *заданий* (см. выражение (3.4.1)). Для рассматриваемой СМО время обслуживания *заданий* определяется временем формирования соответствующих слов данных в регистрах состояния и для приведенного на рисунке 6.1.8, а варианта реализации аппаратно-программного эмулятора по результатам разработки и тестирования проекта для ПЛИС составляет

$$\tilde{t}_{врс}^{K1} = \tilde{t}_{обсл}^{K1} = 2 \cdot \frac{1}{f_T} = 2 \cdot \frac{1}{40 \cdot 10^6} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ с}, \quad (6.1.15)$$

где f_T – тактовая частота работы проекта ПЛИС.

Обслуживание *заданий*, относящихся к *классу № 2*, выполняется в канале обслуживания, едином для всех эмулируемых ИМС (см. рисунки 6.1.8, а, 6.1.8, в), реализованном программно (на основе процессора промышленной ЭВМ). Общее число ИМС в составе блока управления, реализованного на основе представленной на рисунке 6.1.6 структурной схемы, как правило, не превышает восьми (то есть $I^{имс} = 8$), соответственно при программной обработке прерываний максимально возможная задержка формирования *слов данных состояния* $Z_{i^{имс}}^{K2}$, вызванная накоплением *слов данных управления* $K_{i^{имс}}^{K2}$ в очереди обработки (см. рисунок 6.1.8, в), согласно полученным выше результатам апробации программной реализации канала обслуживания составляет

$$\begin{aligned} \max(\tilde{t}_{врс}^{K2}) &= \max(\tilde{t}_{оч}^{K2}) + \max(\tilde{t}_{обсл}^{K2}) = \\ &= (I^{имс} - 1) \cdot \max(\tilde{t}_{обсл}^{K2}) + \max(\tilde{t}_{обсл}^{K2}) = \\ &= 8 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 120 \text{ мс}. \end{aligned} \quad (6.1.16)$$

Максимальное значение задержки формирования слов данных состояния для заданий *класса № 2* удовлетворяет заданным требованиям, полученным в результате экспериментальных исследований функционирования вычислительного модуля блока управления ($\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K2}} < 150$ мс). При этом исключение *слов данных управления* $\text{K}_{\text{СД}}^{\text{K1}}$ из программной процедуры обработки дополнительно обеспечило сокращение значения $\tilde{t}_{\text{врс}}^{\text{K2}}$.

Разработанная структурная схема эмулятора ИМС (см. рисунок 6.1.8, *a*) позволяет осуществлять модификацию реализуемых в программном модуле SA^{K2} функций отношения $\text{F}_{\text{СД}}^{\text{K2}}$ без повторной компиляции проекта ПЛИС, что обеспечивает унификацию и гибкость его применения в условиях промышленной эксплуатации [228, 407–409].

Разработанная с использованием компонентов предложенной автором методологии структура аппаратно-программного эмулятора ИМС позволила реализовать эмуляцию восьми интерфейсных модулей сопряжения для БУ бортового комплекса управления КА на базе одной платы цифрового реконфигурируемого ввода-вывода *PCI-7813R*, что в несколько раз сократило расходы на обеспечение проведения испытаний ПО ВМ БУ, а также сократило время его отработки.

Применение разработанной на основе результатов диссертации архитектуры аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения также обеспечило сокращение до 50 % срока разработки эмуляторов для вновь проектируемой БРЭА [228, 407–409]. Дальнейшая эксплуатация разработанного аппаратно-программного эмулятора ИМС показала корректность и подтвердила эффективность примененных подходов и технических решений. Эмулятор обеспечивает возможность тестирования отработки функционирования штатного бортового ПО ВМ БРЭА (блок управления и блок интерфейсный) в условиях, максимально приближенных к реальным условиям функционирования в составе КА, что позволило реализовать ряд методик моделирования нештатных ситуаций функционирования КА на орбите посредством проверки работы ПО ВМ при искусственном внесении ряда неисправностей, таких как ошибки обмена по ВПИ, частичная неисправность или выход из строя основного/резервного комплекта ИМС, неисправность узла, системы, агрегата КА и пр. [409, 410].

Разработанное с использованием результатов диссертационных исследований техническое решение эмуляторов интерфейсных модулей сопряжения для БРЭА КА

внедрено в производственную деятельность Акционерного общества «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» и используется с 2013 г. в составе НОК БРЭА [228, 406–414].

По результатам проведенной апробации результатов диссертационного исследования в базу данных инженерных решений МРИУС (см. рисунок 5.3.2) вошли:

- вариант реализации аппаратно-программного обеспечения МРИУС на основе многофункционального устройства реконфигурируемого цифрового ввода/вывода;
- данные о длительностях функциональных операций, выполняемых на его основе.

6.1.1.3 Интегрированная многопользовательская система идентификации параметров математических моделей полупроводниковых приборов

Задача идентификации параметров математических моделей (*Spice-моделей*) электрорадиоизделий (ЭРИ), используемых в процессе разработки радиоэлектронных средств (РЭС) при решении ряда трудоемких проектных задач, таких как:

- расчет параметров переходных процессов в РЭС;
- расчет электрических характеристик РЭС и исследование влияния на них температуры окружающей среды, допусков на параметры применяемых электронных компонентов и пр.;
- составление карт режимов работы электронных компонентов РЭС, является особенно актуальной для применяемых отечественных ЭРИ, номенклатура которых постепенно расширяется в рамках реализации программы импортозамещения [415].

В процессе проектирования современных конкурентоспособных образцов РЭС, связанного с широким применением систем автоматизированного проектирования и, в частности, систем схемотехнического и системотехнического моделирования, разработчики в рамках реализации программы импортозамещения сталкиваются с отсутствием централизованной базы математических моделей применяемых отечественных ЭРИ, функциональных узлов и пр. Для решения данной проблемы на предприятиях радиоэлектронной промышленности и ракетно-космической отрасли целесообразно создание ряда специализированных подразделений, в функции которых будет входить решение следующих основных задач:

- идентификация параметров и верификация математических моделей ЭРИ, функциональных узлов и устройств для разрабатываемых РЭС;
- идентификация параметров и верификация физико-химических, физико-механических и других математических моделей применяемых конструкционных материалов.

Соответствующие математические модели интегрируются и применяются в составе специализированных систем автоматизированного проектирования (в том числе и моделирования конструкций) в рамках сквозного цикла проектирования РЭС.

Обобщенная структурная схема возможного взаимодействия вновь создаваемых специализированных подразделений с существующими проектными и производственными подразделениями предприятий в виде диаграммы бизнес-процесса приведена на рисунке 6.1.9.



Рисунок 6.1.9 – Обобщенная блок-схема взаимодействия специализированных подразделений идентификации и верификации математических моделей материалов и ЭРИ с проектными и производственными подразделениями предприятия

Рассматриваемые специализированные подразделения на основе имеющихся в наличии технических и программных средств осуществляют решение поставленных задач в целях обеспечения своевременного наполнения и поддержания в актуальном

состоянии базы данных математических моделей элементов РЭС, применяемых или планируемых к применению на предприятии. Созданные и/или верифицированные математические модели в дальнейшем применяются в процессе разработки РЭС соответствующими конструкторскими подразделениями.

Например, предложенная и рассмотренная в работе [416] архитектура системы идентификации параметров моделей элементов РЭС на базе интернет-сервера, обеспечивает решение сформулированных задач на основе специализированного *расчетного ядра* серверной части системы, включающего в свой состав:

- комплекс программных модулей, реализующих методики идентификации параметров моделей ЭРИ;
- систему компьютерной математики;
- систему схемотехнического моделирования.

Посредством взаимодействия пользователя с графическим интерфейсом и пошагового внесения необходимых данных, их передачи на сервер, обработки, преобразования и последующего использования, реализуются методики идентификации параметров математических моделей соответствующих типоминалов ЭРИ. Архитектура данной системы позволяет взаимодействовать с *расчетным ядром* одновременно нескольким пользователям [416], что повышает в несколько раз ее пропускную способность.

Идентификация параметров математических моделей ЭРИ может выполняться на основе справочных данных, данных технических условий (при условии их наличия и достаточности) или на основе данных, полученных в результате экспериментальных исследований [417, 418]. Таким образом, при идентификации параметров математических моделей и их верификации для вновь поступающей номенклатуры ЭРИ, применяемых в процессе проектирования, для соответствующих полупроводниковых приборов, микросхем, партий намоточных изделий собственного производства, материалов и пр. актуальной является задача проведения ряда специализированных экспериментальных исследований.

В частности, идентификация параметров и верификация математических моделей полупроводниковых приборов осуществляются с использованием результатов измерений, проводимых на основе специализированных аппаратно-программных комплексов, реализованных, например, в виде *измерителей параметров*

полупроводниковых приборов (ИППП) (*semiconductor parameter analyzer*) и включающих в свой состав управляемые источники входных воздействий, устройства измерения тока и напряжения и пр. [419–423]. В целях исключения саморазогрева кристалла измерение параметров и характеристик тестируемых полупроводниковых приборов, в том числе выполняется в импульсном режиме, то есть с ограниченным по времени приложенным заданным воздействием [121, 418, 424 и др.].

Учитывая высокую актуальность своевременного создания соответствующих математических моделей и/или уточнения их параметров в рамках использования единой интегрированной базы ЭРИ и материалов, применяемых на предприятии (см. рисунок 6.1.9), на основе компонентов разработанной в диссертации методологии предлагается создание многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы, обеспечивающей возможность измерения заданных параметров и характеристик тестируемых ЭРИ, в частности полупроводниковых приборов, на основе одного комплекта специализированного оборудования, и ее интеграция в виде специализированного *измерительного ядра* в состав известных систем идентификации моделей элементов РЭС коллективного пользования [416].

В качестве факторов, обуславливающих необходимость создания предложенной *интегрированной многопользовательской системы*, можно выделить: широкую номенклатуру применяемых на предприятиях отечественных полупроводниковых приборов, для которых отсутствуют верифицированные *Spice*-модели; наличие технологического разброса параметров ЭРИ, характерных для разных партий; высокую стоимость специализированных измерительных аппаратно-программных комплексов; высокую длительность и трудоемкость процедуры идентификации параметров *Spice*-моделей для ряда ЭРИ, а также их верификации [424].

Основные подходы к построению предложенной системы, результаты оценки числа автоматизированных рабочих мест при выполнении измерений характеристик радиоэлектронных компонентов в многопользовательском режиме рассматриваются далее. Обобщенная структурная схема предложенной интегрированной многопользовательской системы идентификации параметров полупроводниковых приборов приведена на рисунке 6.1.10.

При выполнении процедуры измерений в целях идентификации и верификации параметров математических моделей на основе *измерительного ядра* представленной на

рисунке 6.1.10 интегрированной многопользовательской системы измеритель параметров полупроводниковых приборов работает в режиме внешнего асинхронного разделения времени между автоматизированными рабочими местами операторов, каждый из которых проводит измерения параметров и характеристик соответствующего тестируемого полупроводникового прибора с заданными индивидуальными настройками.

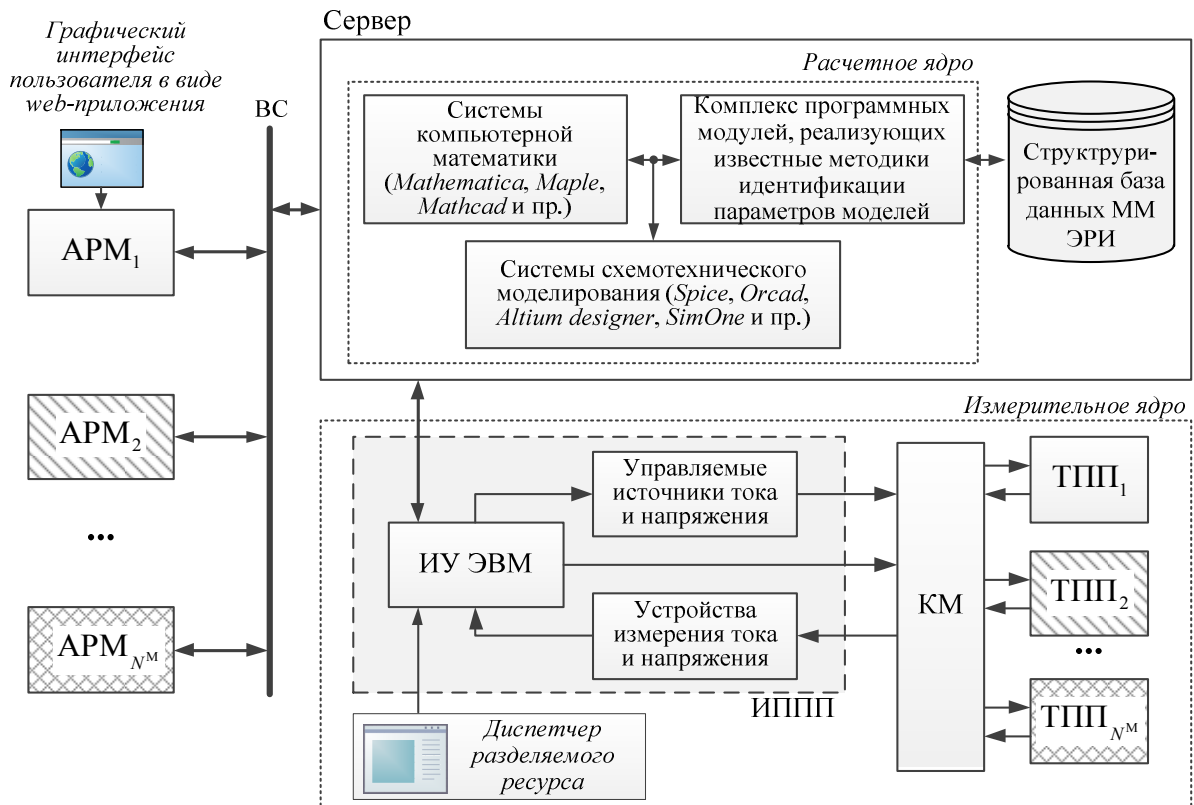


Рисунок 6.1.10 – Интегрированная многопользовательская система идентификации параметров моделей полупроводниковых приборов: АРМ – автоматизированное рабочее место; ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая ЭВМ; ИППП – измеритель параметров полупроводниковых приборов; КМ – коммутационная матрица; ТПП – тестируемый полупроводниковый прибор; N^M – число организуемых рабочих мест и одновременно тестируемых полупроводниковых приборов

Полученные результаты измерения впоследствии используются в качестве исходных данных при выполнении процедуры идентификации параметров *Spice*-моделей или их верификации на основе *расчетного ядра* системы.

Апробированные в рамках реализации промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований – аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом «Электроника» и

«Полупроводниковые приборы» [121, 289, 356, 429 и др.] – алгоритмы измерения вольт-амперных характеристик и параметров полупроводниковых приборов, разработанные в диссертации базовые унифицированные виртуальные приборы (п. 5.1.2), а также экспериментально полученные значения длительностей выполняемых функциональных операций на их основе подтверждают возможность практической реализации *измерительного ядра* рассмотренной на рисунке 6.1.10 *интегрированной системы*.

В частности, в точке «насыщения» предложенной системы, рассчитанной на основе выражения (1.2.4), для $\bar{t}_{\text{разм}} = 25$ с и при среднем времени измерения семейства входных и выходных вольт-амперных характеристик биполярного транзистора в 2,5 с возможно обеспечение одновременной работы до 11 автоматизированных рабочих мест на основе одного комплекта оборудования. Оценка числа одновременно работающих АРМ в соответствии с заданными требованиями к оперативности функционирования также может быть выполнена на основе предложенных в диссертации базовых математических моделей (см. п. 3.4). Реализация возможности коллективного использования специализированного измерительного оборудования в режиме *внешнего асинхронного разделения времени* позволяет распараллелить проведение соответствующих экспериментальных исследований, что обеспечивает повышение общей производительности работ пропорционально числу организуемых рабочих мест (см. рисунок 6.1.10).

Результаты экспериментальных исследований длительностей операций измерения параметров и характеристик полупроводниковых приборов в интерактивном диалоговом режиме рассматриваются в параграфе 6.2. Разработанные на основе предложенной в диссертации методологии промышленные образцы многопользовательских измерительно-управляющих систем автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований описаны в следующем пункте.

6.1.2 МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований

Как было показано ранее в главе 1, направление применение МРИУС в качестве средства автоматизации экспериментальных исследований в научно-исследовательской и учебно-исследовательской сферах человеческой деятельности является актуальным и

получило широкое развитие в мировой практике, так как позволяет сократить излишнее дублирование однотипного оборудования, а также в ряде случаев исключить необходимость приобретения дополнительных экземпляров дорогостоящего оборудования. Реализация данного подхода обеспечивает возможность предоставления *удаленного коллективного доступа* конечным пользователям (физических лиц, образовательным учреждениям и учебным заведениям) к измерительным средствам, лабораторным макетам, комплексам, установкам и пр. для решения научно-исследовательских и образовательных экспериментальных задач в режиме 24 часа в сутки 7 дней в неделю на основе современных информационно-коммуникационных и компьютерных измерительных технологий. Возможность широкой географической доступности экспериментального оборудования обеспечивается за счет того, что работа с *разделяемым ресурсом* в МРИУС осуществляется на основе практически любого персонального компьютера или мобильного устройства, оснащенного соответствующим *графическим интерфейсом пользователя* и имеющего доступ в Интернет [140, 141, 379, 380, 425 и др.].

Описание функциональных возможностей промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований, разработанных на основе предложенной в диссертации методологии и реализованных в виде многопользовательских аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом (АПК УД), приведено в таблице 6.1.1. Данные образцы успешно внедрены в научно-исследовательский и учебный процесс ряда учреждений высшего образования как компоненты инновационной лабораторной научно- и учебно-исследовательской базы.

Оценка многопользовательской масштабируемости в виде числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей N_T (см. выражение (1.2.11)), а также пропускной способности образцов МРИУС γ^C (см. выражение (3.6.1)) выполнена расчетным путем с использованием разработанных базовых математических моделей (см. п. 3.4) для экспериментальных значений среднего времени выполнения заданий и следующих принятых исходных данных:

- требуемое среднее время ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{\text{ож}} = 8$ с;
- среднее время размышления пользователей $\bar{t}_{\text{разм}} = 25\text{--}35$ с;
- работа в локальной вычислительной сети с пропускной способностью $\theta = 100$ МБит/с (см. п. 3.4.1).

Таблица 6.1.1 – Промышленные образцы МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
1	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Тракт усиления звуковой частоты»	<ul style="list-style-type: none"> • исследование характеристик предварительного усилителя и усилителя низкой частоты: амплитудной характеристики, амплитудно-частотных характеристик, коэффициента усиления, полосы пропускания, коэффициента нелинейных искажений, спектра выходного сигнала при варьировании номиналов элементов схемы электрической принципиальной; • исследование выходного каскада усилителя низкой частоты: при нескольких типоминалах транзисторов выходного каскада, нескольких значениях тока покоя и различных сопротивлениях нагрузки (измерение напряжений в ряде контрольных точек, необходимых для расчета коэффициентов электрической нагрузки, используемых при анализе показателей надежности); • исследование отказов: моделирование параметрических и структурных изменений в различных каскадах усилителя низкой частоты и предварительного усилителя; • исследование совместной работы предварительного усилителя и усилителя низкой частоты 	<ul style="list-style-type: none"> • среднее время выполнения заданий – 1,4 с; • пропускная способность – 39 заданий в минуту; • масштабируемость – 22...28 одновременно работающих терминалов пользователей; • максимальная нагрузочная способность – 520...670 пользователей в сутки 	<p>Программное обеспечение (Роспатент) [426];</p> <p>методическое обеспечение [427];</p> <p>рабочая документация [358];</p> <p>патенты на изобретение [325, 328, 335]</p>

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
2	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Полупроводниковые приборы» («Электроника»)	<ul style="list-style-type: none"> • измерение/исследование в ручном и автоматических режимах: прямой и обратной ветвей вольт-амперных характеристик диода и стабилитрона; нагрузочной характеристики и характеристик стабилизации стабилитрона; статических и динамических передаточных и выходных характеристик полевого транзистора; статических и динамических входных и выходных характеристик биполярного транзистора в схемах включения с общим эмиттером и общей базой; статического и дифференциального сопротивлений диода и стабилитрона, крутизны и выходного сопротивления полевого транзистора, <i>h</i>-параметров биполярного транзистора; • измерение/исследование технологического разброса вольтамперных характеристик и параметров диода, стабилитрона, полевого и биполярного транзисторов; • исследование работы: диода на переменном токе при активной и активно-емкостной нагрузках; стабилитрона в схеме параметрического стабилизатора напряжения; полевого и биполярного транзисторов на переменном токе в линейном и нелинейном режимах при различных сопротивлениях нагрузки; • визуализация установки и изменения положения рабочей точки на вольт-амперных характеристиках исследуемых полупроводниковых приборов в динамическом режиме работы 	<ul style="list-style-type: none"> • среднее время выполнения заданий – 1 с; • пропускная способность – 57 заданий в минуту; • масштабируемость – 31...40 одновременно работающих терминалов пользователей; • максимальная нагрузочная способность – 740...950 пользователей в сутки 	<p>Программное обеспечение (Роспатент) [289, 428]; методическое обеспечение [121, 356]; рабочая документация [359, 429]; патенты на изобретение [325]</p>

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
3	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Схемотехника аналоговых электронных устройств»	<ul style="list-style-type: none"> • исследование методов экспериментального определения основных показателей аналоговых электронных усилительных устройств (амплитудных, амплитудно-частотных, фазочастотных и переходных характеристик, коэффициентов усиления и преобразования, линейных и нелинейных искажений, входных и выходных сопротивлений и емкостей); • исследование обратных связей на параметры и характеристики усилительных устройств; • исследование усилительных и частотных свойств резистивного усилительного каскада на биполярном транзисторе; • исследование способов коррекции частотных искажений и расширения полосы пропускания усилителей; • исследование энергетических показателей и нелинейных искажений усилителей мощности в различных режимах их работы; • исследование функциональных характеристик и параметров устройств аналоговой обработки сигналов на основе операционных усилителей: инвертирующего и неинвертирующего усилителей, дифференциатора, интегратора, компаратора, логарифмического усилителя, активных фильтров нижних и верхних частот 	<ul style="list-style-type: none"> • среднее время выполнения заданий – 1,4 с; • пропускная способность – 39 заданий в минуту; • масштабируемость – 22...28 одновременно работающих терминалов пользователей; • максимальная нагрузочная способность – 520...670 пользователей в сутки 	<p>Программное обеспечение (Роспатент) [430];</p> <p>методическое обеспечение [353];</p> <p>рабочая документация [360];</p> <p>патенты на изобретение [325, 335]</p>

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
4	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Основы теории цепей»	<ul style="list-style-type: none"> исследование переходных процессов в RC-, RL-, RLC-цепях, исследование частотных характеристик RC-, RL-, RLC-цепей при их различной параметрической конфигурации; исследование частотных характеристик и избирательных свойств последовательного, параллельного и связанного колебательных контуров при их различной параметрической конфигурации; исследование частотных характеристик и фильтрующих свойств электрических фильтров нижних, верхних частот, полосовых и заграждающих фильтров, фильтров m-типа при их различной параметрической конфигурации 	<ul style="list-style-type: none"> среднее время выполнения заданий – 1,5 с; пропускная способность – 36 заданий в минуту; масштабируемость – 20...26 одновременно работающих терминалов пользователей; максимальная нагрузочная способность – 520...620 пользователей в сутки 	Программное обеспечение [351, 354]; методическое обеспечение [354]; патенты на изобретение [325, 335]
5	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Устройства приема и обработки сигналов»	<ul style="list-style-type: none"> исследование характеристик одноконтурных входных цепей нескольких типов; исследование характеристик усилителей радиосигнала нескольких типов; исследование процесса детектирования ЧМ-сигнала на основе частотных детекторов нескольких типов; исследование процесса частотной автоподстройки частоты (ФАПЧ), основных характеристик и параметров систем ФАПЧ; исследование процесса автоматического регулирования усиления (АРУ) в усилителях промежуточной частоты, основных характеристик и параметров систем АРУ 	<ul style="list-style-type: none"> среднее время выполнения заданий – 1,5 с; пропускная способность – 36 заданий в минуту; масштабируемость – 20...26 одновременно работающих терминалов пользователей; максимальная нагрузочная способность – 520...620 пользователей в сутки 	Программное обеспечение (Роспатент) [431–434]; методическое обеспечение [357]; рабочая документация [435]; патенты на изобретение [325, 335]

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
6	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электропроводность биологических объектов»	<ul style="list-style-type: none"> исследование частотных зависимостей электропроводности (активной и реактивной составляющей сопротивления) тканей образцов биологических объектов, имеющих различную степень термообработки 	<ul style="list-style-type: none"> среднее время выполнения заданий – 2 с; пропускная способность – 25 заданий в минуту; масштабируемость – 14...18 одновременно работающих терминалов пользователей; максимальная нагрузочная способность – 330...430 пользователей в сутки 	Программное обеспечение (Роспатент) [436]; методическое обеспечение [355]; патенты на изобретение [325, 335]

№ п/п	Название	Исследовательские возможности	Базовые (проектные) технические характеристики	Программно-методическая и эксплуатационная документация
7	Многопользовательский аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Физика. Электродинамика»	<ul style="list-style-type: none"> • исследование зависимости силы тока от разности потенциалов при постоянном сопротивлении, зависимости силы тока от сопротивления участка цепи при постоянной разности потенциалов, сравнение расчетного сопротивления с реальными (найденным графически и математически); • исследование зависимости полной мощности, мощности, выделенной во внешней цепи, и КПД источника тока от внешнего сопротивления; • определение внутреннего сопротивления источника тока и условия, при котором мощность, выделяемая во внешней цепи, будет максимальной; • исследование времени переходных процессов в RC-цепи при ее различной параметрической конфигурации; • измерение времени переходных процессов в RL-цепи при ее различной параметрической конфигурации; • исследование зависимостей периода колебаний, динамики процесса затуханий, декремента затухания и добротности от параметров последовательного колебательного контура; • исследование зависимостей резонансных кривых, фазочастотных характеристик и добротности последовательного колебательного контура от параметров его элементов; • исследование воль-тамперной характеристики германиевого и кремниевого диодов, исследование зависимости дифференциального сопротивления диода от приложенного сопротивления; • исследование цепи переменного тока (реактивного и полного сопротивлений, экспериментальная проверка закона Ома и пр.) при различных номиналах элементов цепи 	<ul style="list-style-type: none"> • среднее время выполнения заданий – 1,5 с; • пропускная способность – 36 заданий в минуту; • масштабируемость – 20...26 одновременно работающих терминалов пользователей; • максимальная нагрузочная способность – 520...620 пользователей в сутки 	<p>Программное обеспечение (Роспатент) [437];</p> <p>методическое обеспечение [438];</p> <p>рабочая документация [439];</p> <p>патенты на изобретение [325, 335]</p>

Общее число пользователей, которые могут быть обслужены на основе каждого из рассматриваемых образцов МРИУС в течение суток при организации режима работы 24 часа в сутки, характеризует максимальную нагрузочную способность МРИУС и рассчитано на основе следующего выражения:

$$N_T^{\text{сут}} = \frac{24}{\bar{T}_и} \cdot N_T, \quad (6.2.1)$$

где N_T – число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей с заданной оперативностью; $\bar{T}_и$ – средняя длительность выполнения экспериментальных исследований, которая была принята равной 1 час [142].

Разработка рассмотренных в таблице 6.1.1 промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований выполнена при непосредственном участии автора, а также на основе результатов проведенных им теоретических и экспериментальных исследований.

АПК УД «Полупроводниковые приборы», «Электроника», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Устройства приема и обработки сигналов», «Электропроводность биологических объектов» и «Физика. Электродинамика» реализованы на основе многообъектовых базовых структур аппаратного построения с внутренним разделением каналов (см. п. 3.1), что позволило на 20–30 % сократить затраты на реализацию их аппаратного обеспечения.

Для ряда многопользовательских АПК УД [355, 359, 429, 435, 437] реализованное конструктивно-технологическое исполнение обеспечивает возможность оперативной замены исследуемых объектов исследования на объекты с близкими характеристиками в пределах, ограниченных техническими параметрами каналов измерения и управления (предельные измеряемые токи и напряжения, сопротивления электронных и электромеханических ключей, коммутируемые токи и пр.).

Примеры внешнего вида конструктивного исполнения аппаратных компонентов некоторых промышленных образцов МРИУС приведены на рисунке 6.1.11. Более детальное описание разработанных многопользовательских АПК УД приведено в приложении А.



Рисунок 6.1.11 – Примеры конструктивного исполнения аппаратных компонентов промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований: *а* – АПК УД «Полупроводниковые приборы»; *б* – АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов»; *в* – АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»; *г* – АПК УД «Электропроводность биологических объектов»; *д* – размещение промышленных образцов МРИУС в телекоммуникационном шкафу 19" системы конструктивов «Евромеханика»

Прикладное программное обеспечение приведенных в таблице 6.1.1 многопользовательских АПК УД реализовано на основе компонентов разработанного в диссертации базового измерительного обеспечения МРИУС (см. п. 5.1), что обеспечило сокращение на 30–50 % сроков разработки данного ПО. Различные варианты модификации базовых унифицированных виртуальных приборов (см. п. 5.1.2) в соответствии с решаемыми измерительными задачами, разработаны на основе представленной на рисунке 5.1.3 методики [289, 426, 428, 430–434, 436, 437]. Реализация измерений амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик ОУиК на основе полигармонических сигналов в комплексе с разработанными и исследованными алгоритмами спектрального измерения их параметров (см. п. 5.1.1) позволила сократить длительность выполнения данных функциональных операций для ряда многопользовательских АПК УД с 5–6 до 1–1,5 секунд [286, 351, 430].

Рабочая документация на образцы МРИУС представлена интерактивными электронными техническими руководствами и руководствами пользователя [358–360, 429, 435, 439]. Разработанные и зарегистрированные в установленном порядке в качестве электронных изданий интерактивные электронные технические руководства включают в свой состав:

- описание принципов работы с прикладным программным обеспечением;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные, чертежи и 3D-модели конструктивных узлов, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции) и пр.

Разработанные и зарегистрированные в установленном порядке в качестве электронных изданий руководства пользователей содержат необходимые сведения для организации, администрирования и сопровождения научно-исследовательского и учебного процесса на основе рассмотренных промышленных образцов систем (см. табл. 6.1.1).

Варианты исполнения аппаратно-программного обеспечения на основе многофункциональных устройств сбора данных для решения ряда измерительных задач, полученные в ходе разработки рассмотренных в таблице 6.1.1 промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований, вошли в базу данных инженерных решений МРИУС (см. п. 5.3).

Организация научно-исследовательского и учебного процесса на основе МРИУС, как правило, выполняется с использованием специализированных сетевых *web*-лабораторий, представляющих собой комплекс специализированных интерфейсов и интерактивных форм, на основе которых обеспечивается регламентированный авторизованный доступ к ресурсам МРИУС [88, 123, 367, 440, 441 и др.].

Комплексный подход к организации процесса подготовки и переподготовки кадров на основе многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований, разработанных с использованием результатов диссертационной работы, неоднократно отмечен дипломами всероссийских и международных выставок.

За разработку образцов специализированных многопользовательских измерительно-управляющих систем в области автоматизации экспериментальных исследований и технических решений по улучшению их характеристик автор был награжден Дипломом лауреата премии главы города Красноярска молодым талантам в 2012 году, Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года» в 2015 году (см. приложение В).

Результаты экспериментальных исследований параметров и характеристик ряда разработанных промышленных образцов МРИУС как систем массового обслуживания в ходе их эксплуатации на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» рассматриваются далее.

6.2 Экспериментальные исследования технических характеристик МРИУС

Экспериментальные исследования параметров и характеристик МРИУС проведены в рамках апробации методики адаптации, рассмотренной в параграфе 5.5, на этапе опытной эксплуатации промышленных образцов многопользовательских АПК УД (таблица 6.1.1), внедренных в процесс подготовки кадров Института инженерной физики и радиоэлектроники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет. Аппаратно-программное обеспечение ряда многопользовательских АПК УД было дополнено специализированной подпрограммой регистрации и накопления статистических данных, осуществляющей фиксацию и автоматическое централизованное накопление на измерительно-управляющей ЭВМ для каждого обслуживаемого задания соответ-

ствующей информации о ходе его выполнения (см. п. 5.5). Фрагмент экспериментальных данных о функционировании промышленного образца МРИУС (многопользовательский АПК УД «Электроника») приведен на рисунке 6.2.1.

IP	IP	IP	IP	IP
RTF8(10.2.73.96)	RTF8(10.2.73.96)	RTF8(10.2.73.96)	RTF8(10.2.73.96)	RTF8(10.2.73.96)
ID	ID	ID	ID	ID
2044319	2044319	2044319	2044319	2044319
N модуля	N модуля	N модуля	N модуля	N модуля
3	3	3	3	3
N submodule	N submodule	N submodule	N submodule	N submodule
0	0	0	0	0
Задание	Задание	Задание	Задание	Задание
Задание 1	Задание 1	Задание 1	Задание 1	Задание 1
Время отправки	Время отправки	Время отправки	Время отправки	Время отправки
9:04:45,828 30.11.2017	9:05:05,500 30.11.2017	9:05:20,734 30.11.2017	9:05:28,937 30.11.2017	9:05:36,328 30.11.2017
Время начала выполнения	Время начала выполнения	Время начала выполнения	Время начала выполнения	Время начала выполнения
9:04:46,921 30.11.2017	9:05:06,609 30.11.2017	9:05:21,843 30.11.2017	9:05:30,031 30.11.2017	9:05:37,437 30.11.2017
Тобсл,с	Тобсл,с	Тобсл,с	Тобсл,с	Тобсл,с
1,14	1,168	1,115	1,18	1,125
Тож,с	Тож,с	Тож,с	Тож,с	Тож,с
1,191	1,22	1,171	1,232	1,181

Рисунок 6.2.1 – Фрагмент экспериментальных статистических данных о функционировании многопользовательского АПК УД «Электроника»

В частности, за период с марта 2015 по октябрь 2018 г. включительно, на основе многопользовательского АПК УД «Электроника» в целом было выполнено свыше 132 000 конфигурационных и измерительных заданий пользователей. Общая статистическая сводка по принадлежности заданий к соответствующим объектным модулям, входящих в его состав, представлена на рисунке 6.2.2.

За рассматриваемый период зафиксировано свыше 90 различных IP-адресов терминалов пользователей, расположенных на территории кампуса образовательного учреждения, что демонстрирует востребованность возможности доступа к компонентам разделяемого ресурса МРИУС и выполнения экспериментальных исследований в произвольный момент времени, в том числе вне времени учебных занятий.

Диаграмма общего числа выполненных заданий, сформированных пользователями в течение выделенного периода мониторинга функционирования МРИУС, нарастающим итогом приведена на рисунке 6.2.3. На рисунке 6.2.3 можно выделить явные периоды возрастания загрузки многопользовательского АПК УД в начале семестра, а также характерные периоды «простоя», связанные с академическими каникулами.

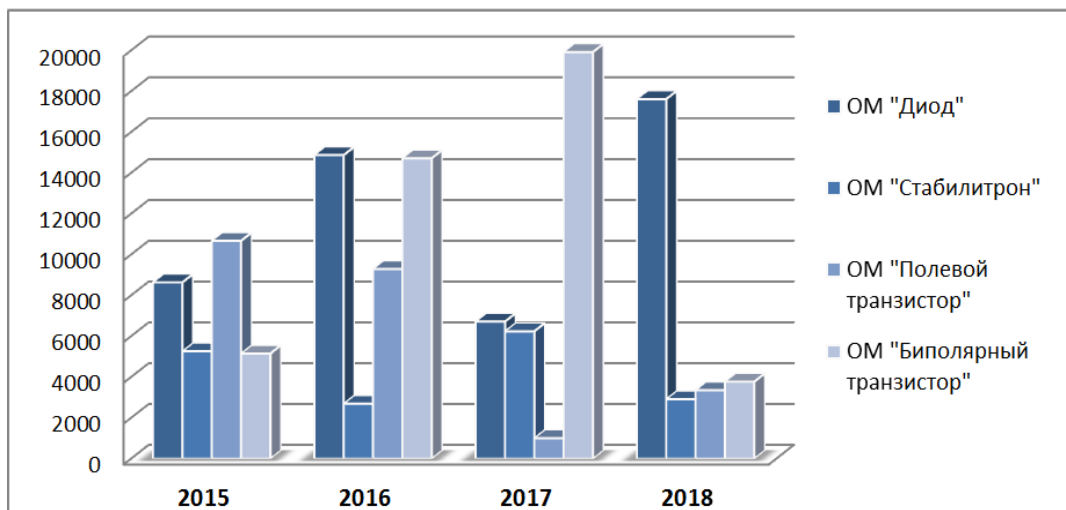


Рисунок 6.2.2 – Гистограмма распределения числа выполненных заданий на основе объектных модулей АПК УД «Электроника» в период с марта 2015 по октябрь 2018 г.



Рисунок 6.2.3 – Диаграмма общего числа выполненных заданий на основе многопользовательского АПК УД «Электроника» в период с марта 2015 по октябрь 2018

Дальнейшая детализация участков приведенной зависимости (по месяцам, неделям, дням, часам и пр.) может быть использована, например, при принятии решений о необходимости реализации соответствующих организационных мероприятий, подробно рассмотренных в параграфе 5.5. Фрагменты временных диаграмм функционирования многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» при 22 одновременно работающих терминалах пользователей, полученные на основе накопленных статистических данных, представлены на рисунке 6.2.4.

На основе приведенных на рисунке 6.2.4 зависимостей в дальнейшем выполняется оценка параметров и характеристик исследуемого образца МРИУС, как СМО.

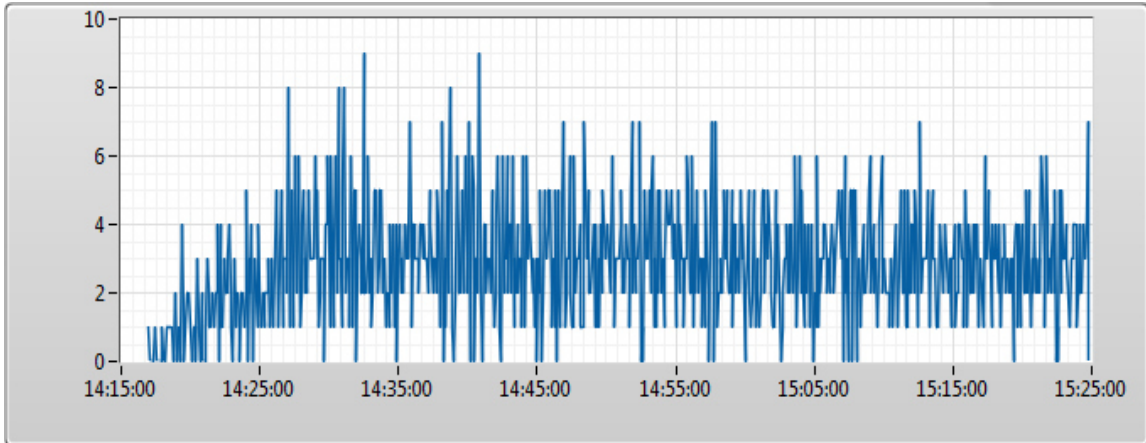
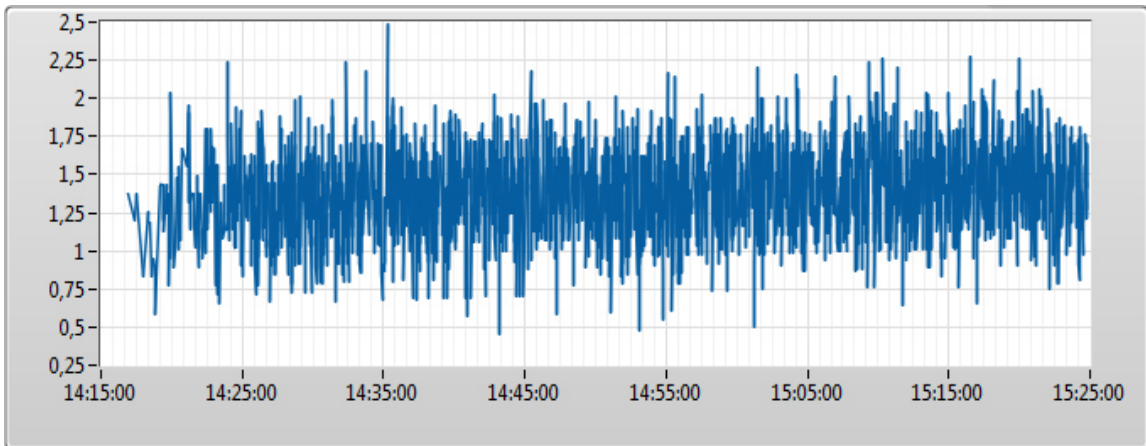
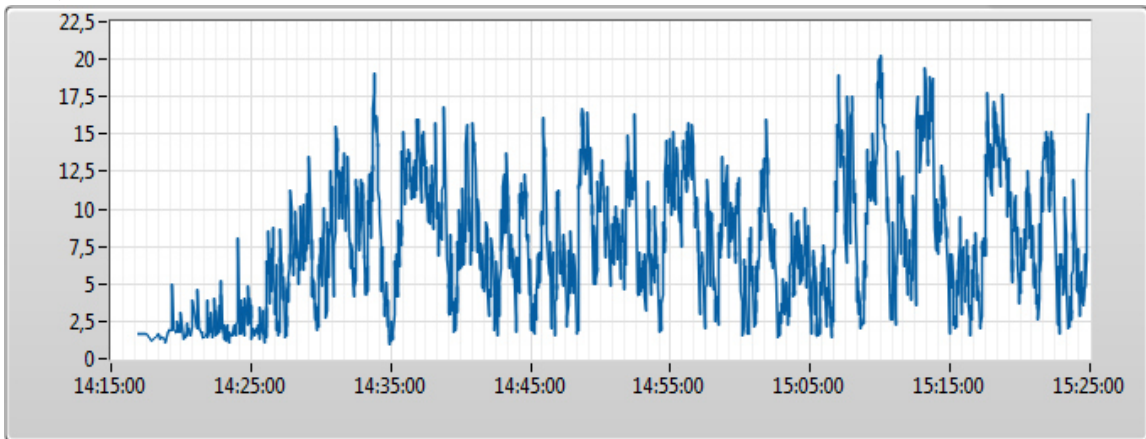
\tilde{x} , заданий
*a**t*
 $\tilde{t}_{\text{обсл}}$, с
*б**t*
 $\tilde{t}_{\text{ож}}$, с
*в**t*

Рисунок 6.2.4 – Временные диаграммы функционирования многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»: *a* – число заданий, поступающих на ИУ ЭВМ в интервал времени 5 секунд; *б* – время выполнения поступающих заданий; *в* – время ожидания результатов выполнения заданий на терминалах пользователей

В последующих параграфах рассматриваются результаты исследований эмпирических распределений длительностей интервалов размышления пользователей, распределений времени обслуживания заданий, а также оперативности функционирования ряда промышленных образцов МРИУС (см. таблицу 6.1.1), полученные на основе накопленных массивов статистических данных.

6.2.1 Экспериментальные исследования параметров модели поведения пользователей в МРИУС

В рамках диссертации под моделью поведения пользователей в МРИУС, как в эргатической системе, понимается распределение длительностей интервалов размышления пользователей между повторным формированием заданий и его основные параметры, которые характеризуют *входящий поток заданий* при представлении МРИУС как системы массового обслуживания (см. п. 3.4). Расчет экспериментальных значений длительностей интервалов размышления пользователей выполнен на основе накопленного массива статистических данных (см. рисунок 6.2.1) с использованием следующего общего выражения:

$$t_{\text{разм}_k} = T_k^{\text{отпр}} - (T_{k-1}^{\text{отпр}} + t_{\text{ож}_{k-1}}), k = 1, 2, \dots, K^c, \quad (6.2.1)$$

где $T_k^{\text{отпр}}$ – момент времени отправки с терминала пользователя текущего задания; $T_{k-1}^{\text{отпр}}$ и $t_{\text{ож}_{k-1}}$ – момент времени отправки и длительность ожидания на терминале пользователя результатов выполнения предыдущего задания соответственно; K^c – общее число выполненных заданий в течение одного сеанса работы соответствующего терминала пользователя.

Результаты расчета значений $t_{\text{разм}_k}$ на основе выражения (6.2.1) для каждого сеанса работы пользователей с разделяемым ресурсом МРИУС формируют общую совокупность экспериментальных значений длительностей интервалов их размышления в виде массива $\mathbf{T}_{\text{разм}_э}$:

$$\mathbf{T}_{\text{разм}_э} = \bigcup_{s=1}^{S^c} \bigcup_{k=1}^{K_s^c} t_{\text{разм}_k}, \quad (6.2.2)$$

где K_s^c – число выполненных заданий пользователя в течение s -го сеанса; S^c – число анализируемых сеансов работы пользователей.

На рисунке 6.2.5 приведена гистограмма абсолютных эмпирических частот (n_i) распределения времени размышления пользователей $\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma$ при работе с многопользовательским АПК УД «Электроника», построенная на основе анализа сеансов работы, в течение которых с каждого терминала было сформировано не менее 50 заданий. Значения интервалов размышления, превышающие 15 минут, в анализ не включались. Объем полученной выборки экспериментальных данных составил более 22000 значений. Для сформированной совокупности экспериментальных значений времени размышления определены оценки выборочного среднего и среднеквадратичного отклонения: $\bar{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma = 27$ с, $\sigma_{\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma} = 75$ с. Полученное экспериментально значение коэффициента вариации $V = \frac{\sigma_{\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma}}{\bar{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma} = 3$ характеризует неоднородность анализируемой статистической совокупности [442].

Для дальнейшего анализа проведена сортировка длительностей интервалов размышления по принадлежности сеансов работы пользователей к разным объектным модулям, входящих в состав исследуемого многопользовательского АПК УД «Электроника». На рисунке 6.2.6 в логарифмическом масштабе приведены графики хвостов эмпирических распределений времени размышления пользователей в виде функций $\bar{F}^{\text{ом}j}(\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}) = 1 - F^{\text{ом}j}(\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}})$, а также график хвоста экспоненциального распределения, построенного на основе рассчитанного среднего выборочного значения $\bar{t}_{\text{разм}_\text{э}}^\Sigma = 27$ с, где $F^{\text{ом}j}(\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}})$ – эмпирический закон распределения времени размышления пользователей при работе с j -м объектным модулем многопользовательского АПК УД «Электроника».

Результаты расчета средних выборочных значений $\bar{t}_{\text{разм}_\text{э}}^{\text{ом}j}$, среднеквадратичных отклонений $\sigma_{\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}^{\text{ом}j}}$ и квартилей распределения $Q_1^{\text{ом}j}, Q_2^{\text{ом}j}, Q_3^{\text{ом}j}$ времени размышления пользователей при работе с соответствующим j -м объектным модулем многопользовательского АПК УД «Электроника» приведены в таблице 6.2.1.

Результаты оценки, представленные в таблице 6.2.1, характеризуют неоднородность статистической совокупности времени размышления пользователей в течение различных сеансов работы с одним объектным модулем ($\tilde{t}_{\text{разм}_\text{э}}^{\text{ом}j}$), а также отличие средних выборочных значений времени размышления $\bar{t}_{\text{разм}_\text{э}}^{\text{ом}j}$ для разных объектных модулей.

n_i , интервалов

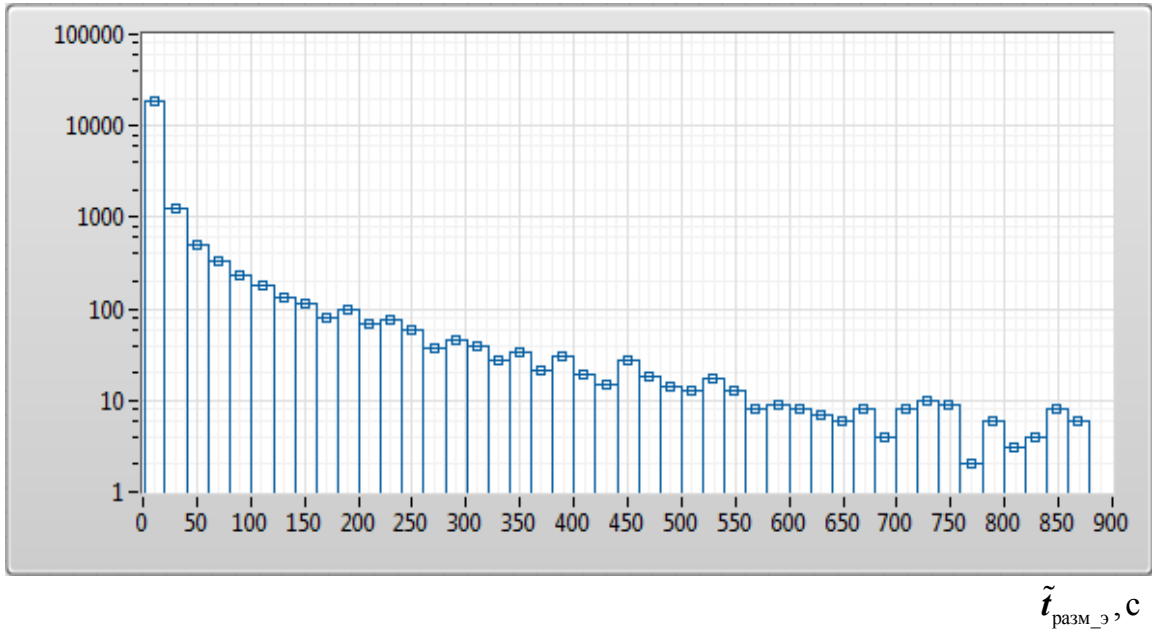


Рисунок 6.2.5 – Гистограмма абсолютных эмпирических частот распределения времени размышления пользователей в многопользовательском АПК УД «Электроника»

$\log(\overline{F}^{\text{ом}_j}(\tilde{t}_{\text{разм}_э}))$

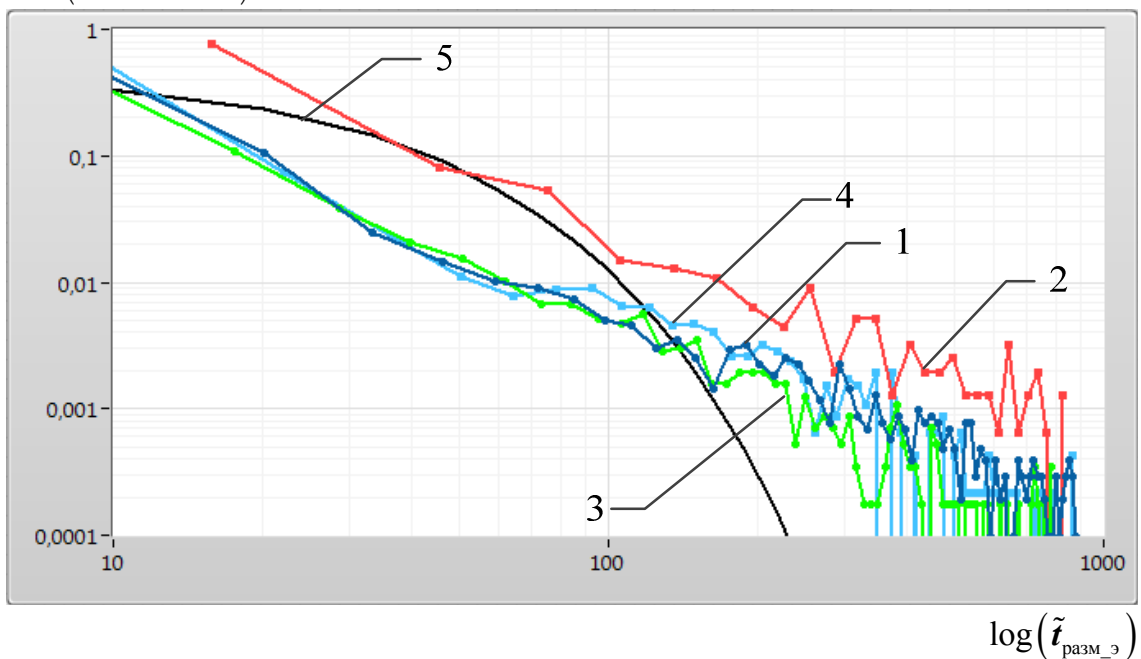


Рисунок 6.2.6 – Графики гистограммы хвостов эмпирических распределений времени размышления пользователей при работе с различными объектными модулями многопользовательского АПК УД «Электроника»: 1 – объектный модуль «Диод»; 2 – объектный модуль «Стабилитрон»; 3 – объектный модуль «Полевой транзистор»; 4 – объектный модуль «Биполярный транзистор»; 5 – график экспоненциального распределения

Таблица 6.2.1 – Экспериментальные значения числовых характеристик времени размышления пользователей между повторным формированием заданий для различных объектных модулей многопользовательского АПК УД «Электроника»

№ п/п	Объектный модуль	Результаты опытной эксплуатации					
		Объем выборки	$\bar{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}j}, \text{с}$	$\sigma_{\bar{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}j}}, \text{с}$	$Q_1^{\text{ом}j}, \text{с}$	$Q_2^{\text{ом}j}, \text{с}$	$Q_3^{\text{ом}j}, \text{с}$
1	«Диод»	10320	28	82	6	8	13
2	«Стабилитрон»	1550	41	102	5	7	24
3	«Полевой транзистор»	5700	21	57	5	7	12
4	«Биполярный транзистор»	4650	25	68	6	7	12

В таблице 6.2.2 приведены примеры средних выборочных значений индивидуального времени размышления, полученные на примере анализа фрагмента накопленных статистических данных при одновременной работе 12 терминалов пользователей с объектным модулем «Диод» многопользовательского АПК УД «Электроника».

Таблица 6.2.2 – Экспериментальные значения средних выборочных значений для индивидуальных распределений времени размышления пользователей

Результаты оценки	Терминал пользователя											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\bar{t}_{\text{разм}_эn}, \text{с}$	23	44	30	25	36	21	27	23	23	26	31	20
СКО	75	120	73	63	98	53	87	71	63	67	77	59
Объем выборки	192	97	140	153	96	109	142	99	82	150	147	55

Для сравнения в таблице 6.2.3 представлены значения среднего времени размышления пользователей, полученные для ряда многотерминальных интерактивных вычислительных систем [7, 29, 161].

Таблица 6.2.3 – Экспериментальные значения $\bar{t}_{\text{разм}}$ для некоторых вычислительных систем коллективного пользования

Параметр	Название системы			
	CTSS	TCB	IBM TSO	Notorius Northgate
$\bar{t}_{\text{разм}}, \text{ с}$	35	24	28	20–30

Графики представленных на рисунке 6.2.6 зависимостей позволяют сделать вывод о том, что полученные эмпирические распределения времени размышления пользователей при работе с многопользовательским АПК УД «Электроника» имеют тяжелые хвосты (Heavy Tailed), так как они убывают медленнее, чем хвост экспоненциального распределения [443, 444]. Данный факт демонстрируется наличием экстремальных «выбросов» увеличения времени размышления пользователей, то есть снижением «активности» их работы с разделяемым ресурсом МРИУС в течение текущего сеанса.

По мнению автора, наличие данных «выбросов» обусловлено спецификой прикладных работ, выполняемых в интерактивном диалоговом режиме на основе МРИУС, а также особенностями реализации ее аппаратно-программного обеспечения.

В общем, разброс времени размышления пользователей может быть обусловлен следующими факторами:

- характер и объем выполняемых исследований и испытаний;
- сложность исследуемого устройства, процесса или явления;
- наличие встроенных или необходимость использования внешних средств для дополнительной обработки экспериментальных данных;
- уровень квалификации и/или подготовки пользователей [180];
- субъективное восприятие графического интерфейса пользователя;
- индивидуальные биоритмы пользователей и пр.

Также в ходе выполнения экспериментальных исследований в ряде случаев может возникать необходимость «отвлечения» от процесса интерактивного формирования заданий, например:

- для предварительной обработки и анализа полученных экспериментальных данных;
- для работы с научной, технической или методической литературой;
- для выполнения ряда эскизных расчетов в связи с необходимостью корректировки хода выполняемых исследований и пр.

Наличие тяжелых хвостов эмпирических распределений случайных величин $\tilde{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}_j}$ обуславливает необходимость исследования их влияния на характеристики потока заданий, формируемых с терминалов пользователей, и, соответственно, параметры оперативности функционирования МРИУС. Так, например, в работах [306, 445], обобщающих результаты ряда прикладных исследований для замкнутых систем массового обслуживания (*finite-source queuing system*) [304, 305 и др.], показано, что стационарные вероятности состояний неоднородной замкнутой СМО $\vec{G}/M//k/N$, которая может быть рассмотрена как обобщенная модель МРИУС (см. п. 3.4), зависят от распределений времен размышления пользователей только через их математические ожидания. Аналогичный результат в дальнейшем был получен для замкнутой системы массового обслуживания $\vec{G}/\vec{M}//k/N$ с дисциплиной обслуживания *SIRO* (*service in random order*) [446].

Соответственно, для МРИУС, которые могут быть представлены в виде системы массового обслуживания $\vec{G}/M//k/N$ (см. рисунок 3.4.11), среднее время ожидания результатов выполнения заданий $\bar{t}_{\text{ож}}$ и коэффициент замедления ϵ (см. п. 1.2.3, 3.4.1) также зависят только от математических ожиданий соответствующих распределений, которые могут характеризовать времена размышления пользователей индивидуально или на основе некоторых выделенных групп.

Результаты расчета средних выборочных значений для исследованного промышленного образца МРИУС (см. табл. 6.2.1, 6.2.2) в целом согласуются со средними значениями, приводимыми для многотерминальных интерактивных вычислительных систем (см. табл. 6.2.3) [7, 29, 161, 169]. Таким образом, полученные на основе результатов экспериментальных исследований значения $\tilde{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}_j}$ и/или квантили распределения могут быть использованы в качестве данных первого приближения при оценке параметров реализуемого сценария диалога в процессе разработки МРИУС на базе предложенной в диссертации методологии (см. п. 2.5, 3.3, 5.4).

Детальный анализ видов распределений случайных величин $\tilde{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}j}$, оценка тяжести хвостов и т.д. могут быть выполнены на основе известных подходов, например, рассмотренных в работах [290, 292–294, 296, 443, 444, 447, 448 и пр.]. При необходимости выявленные характеры экспериментальных распределений случайных величин $\tilde{t}_{\text{разм}_э}^{\text{ом}j}$ могут быть приняты во внимание при детализации применяемой для прогнозирования математической модели динамики функционирования МРИУС (см. п. 3.4).

Установленное в результате экспериментальных исследований отличие средних выборочных значений времени размышления пользователей для разных объектных модулей многопользовательского АПК УД «Электроника» (см. таблица 6.2.1) необходимо учитывать при прогнозировании поведения системы при совместной работе пользователей с различными объектными модулями в пересекающиеся интервалы времени.

Дальнейшее исследование свойств и выявления возможных статистических закономерностей для интервалов размышления пользователей и их зависимостей от времени суток, дней недели, характера выполняемой работы или от категорий работающих пользователей [180, 449] и пр. целесообразно осуществить в рамках отдельных работ.

Учитывая разброс «активности» работы пользователей, характеризуемой средним временем размышления, а также ее возможную зависимость от времени суток, дня недели и т.д. при эксплуатации МРИУС в режиме 24 часа в сутки 7 дней в неделю, на основе разработанной в диссертации подпрограммы регистрации и накопления статистических данных предлагается реализация адаптивной системы управления контролем подключения дополнительных терминалов пользователей, например, на основе текущего мониторинга заданных параметров оперативности функционирования МРИУС и прогноза длительности работы текущих пользователей. При этом, например, увеличение «активности» работы уже ранее подключенных терминалов пользователей не приводит к переполнению очереди заданий на измерительно-управляющей ЭВМ и неконтролируемому росту времени ожидания результатов, так как в соответствии с обобщенным алгоритмом функционирования (см. рисунок 1.2.5) общее число циркулирующих заданий в МРИУС не превышает число одновременно работающих терминалов пользователей.

Таким образом, оценки параметров времени размышления пользователей и выявленные характеры их распределения (при необходимости), получаемые на основе обработки накопленных в ходе опытной эксплуатации соответствующей МРИУС статистических данных, в дальнейшем используются при идентификации параметров математической модели динамики функционирования (см. п. 3.4, 5.5).

В рамках предложенной методологии анализ динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания при наличии явно выраженных групп и/или категорий терминалов пользователей, характеризующих произвольно задаваемыми видами распределений времени размышления, выполняется на основе разработанной в диссертации имитационной модели (см. п. 3.4).

Результаты экспериментальных исследований оперативности функционирования МРИУС в интервалы времени наибольшей нагрузки и их сравнение с результатами математического моделирования на основе экспериментальных средних выборочных значений времени размышления пользователей и времени выполнения заданий описываются в пункте 6.2.3. Экспериментальные исследования параметров распределения времени выполнения заданий в МРИУС рассматриваются в следующем пункте.

6.2.2 Экспериментальные исследования параметров распределения времени выполнения заданий в МРИУС

Оценка экспериментальных значений числовых характеристик времени выполнения заданий осуществляется на основе соответствующей выборки из массива статистических данных (см. рисунок 6.2.1), накопленного с использованием разработанной специализированной подпрограммы в ходе этапа опытной эксплуатации (см. п. 5.5).

На рисунке 6.2.7 приведены гистограммы относительных эмпирических частот w_i распределения значений времени выполнения заданий пользователей для различных объектных модулей для многопользовательского АПК УД «Электроника». Результаты расчета выборочных средних значений, среднеквадратичных отклонений для каждого модуля $(\bar{t}_{обсл,э}^k, \sigma_{\bar{t}_{обсл,э}^k})$ и комплекса в целом $(\bar{t}_{обсл,э}^\Sigma, \sigma_{\bar{t}_{обсл,э}^\Sigma})$ представлены в таблице 6.2.4, где k – вид объектного модуля, а случайная величина $\tilde{t}_{обсл,э}^\Sigma$ определена в соответствии с выражением

$$\tilde{t}_{\text{обсл}_э}^{\Sigma} = \bigcup_k \tilde{t}_{\text{обсл}_э}^k \quad (6.2.3)$$

Таблица 6.2.4 – Экспериментальные значения числовых характеристик времени выполнения заданий для объектных модулей многопользовательского АПК УД «Электроника»

№ п/п	Объектный модуль	Результаты опытной эксплуатации				
		Объем выборки, заданий	$\bar{t}_{\text{обсл}_э}^k$, с	$\sigma_{\tilde{t}_{\text{обсл}_э}^k}$, с	$\bar{t}_{\text{обсл}_э}^{\Sigma}$, с	$\sigma_{\tilde{t}_{\text{обсл}_э}^{\Sigma}}$, с
1	«Диод»	18100	1,1	0,5	1	0,5
2	«Стабилитрон»	4000	0,8	0,3		
3	«Полевой транзистор»	7000	0,9	0,1		
4	«Биполярный транзистор»	6300	1,2	0,4		

Дальнейшая проверка статистических гипотез о законах распределения случайных величин $\tilde{t}_{\text{обсл}_э}^k$ и $\tilde{t}_{\text{обсл}_э}^{\Sigma}$ и выбор наиболее близкого аппроксимирующего распределения выполняется на основе известных подходов [290, 293, 294, 442 и др.].

Для рассмотренного образца МРИУС, реализованного на основе многообъектовой базовой структуры (см. п. 3.1), с учетом полученных в результате опытной эксплуатации экспериментальных оценок средних значений и среднеквадратичных отклонений времени выполнения заданий как для отдельных объектных модулей, так и для системы в целом (см. таблицу 6.2.4) процесс выполнения соответствующих групп заданий на основе различных объектных модулей может упрощенно рассматриваться как *однородный* с $\bar{t}_{\text{обсл}} = \bar{t}_{\text{обсл}_э}^{\Sigma} = 1$ с, а в качестве обобщающего аппроксимирующего распределения величины $\tilde{t}_{\text{обсл}}$ может быть использовано, например, Гамма-распределение (см. рисунок 6.2.7) [162, 272, 316].

По результатам анализа массива статистических данных, накопленных на этапе опытной эксплуатации, база данных инженерных решений МРИУС дополняется полученными экспериментальными значениями длительностей функциональных операций управления и измерения, выполняемых на основе соответствующего аппаратно-программного обеспечения (см. п. 5.3, рисунок 5.3.2).

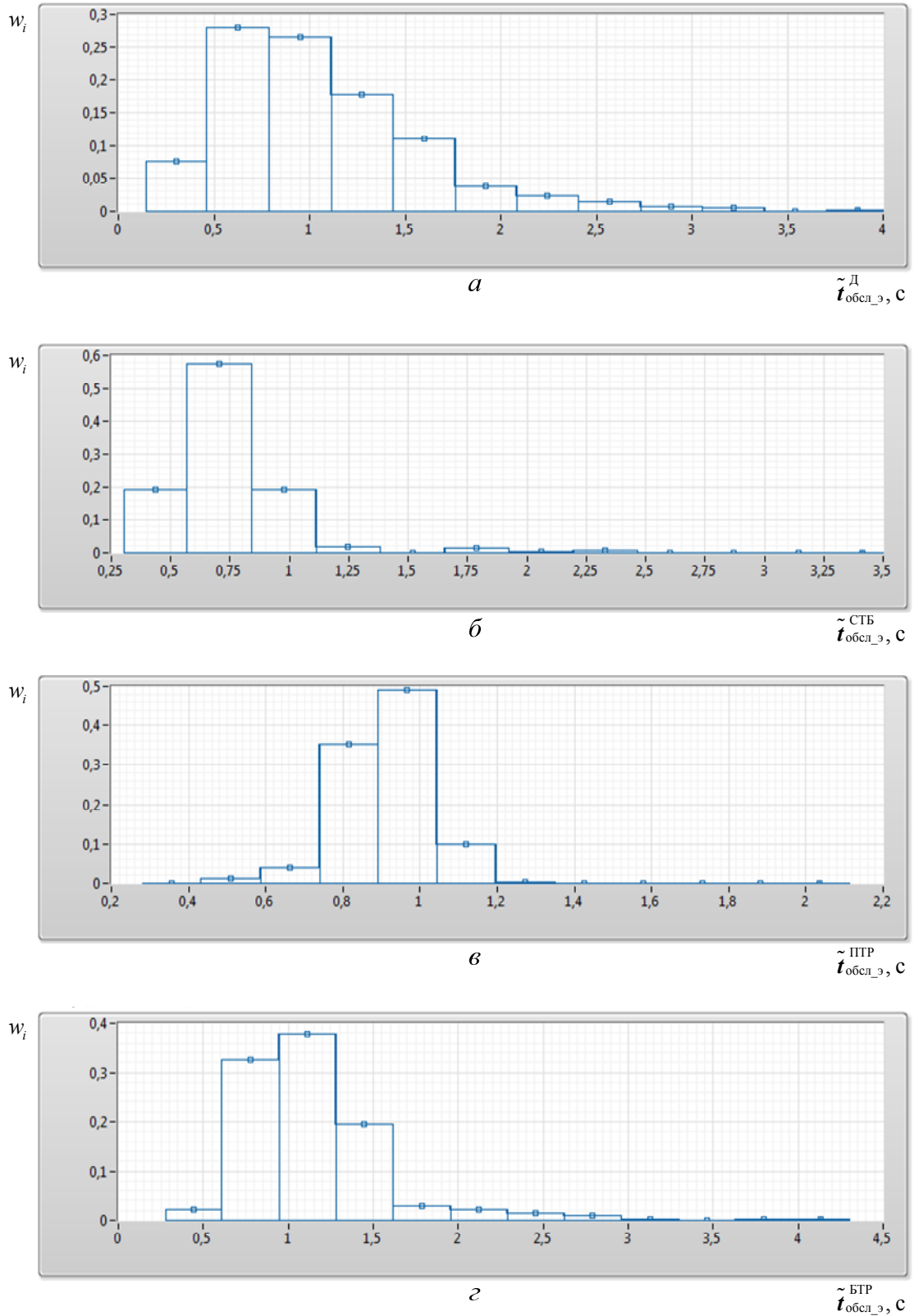


Рисунок 6.2.7 – Гистограммы относительных эмпирических частот распределения времени выполнения заданий для различных объектных модулей многопользовательского АПК УД «Электроника»: *a* – объектный модуль «Диод»; *б* – объектный модуль «Стабилитрон»; *в* – объектный модуль «Полевой транзистор»; *г* – объектный модуль «Биполярный транзистор»

При этом следует также отметить, что при изменении методик исследований, осуществляемых на базе рассмотренного многопользовательского АПК УД, возможно изменение эмпирических частот распределений величин $\bar{t}_{\text{обсл.э.}}^k$. В данном случае при проявлении *неоднородности* длительностей выполнения заданий на основе соответствующих объектных модулей (см. рисунок 6.2.7) она впоследствии должна быть учтена в математической модели динамики функционирования, применяемой в рамках методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации (см. рисунок 5.5.2).

Экспериментальные исследования оперативности функционирования МРИУС как системы массового обслуживания рассматриваются в следующем пункте.

6.2.3 Экспериментальные исследования оперативности функционирования МРИУС

Полученные ранее числовые характеристики времени размышления пользователей (см. п. 6.2.1) и времени обслуживания заданий (см. п. 6.2.2), а также возможные аппроксимирующие распределения используются для параметрической верификации соответствующей математической модели динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания (см. п. 3.4). Верифицированная математическая модель в дальнейшем применяется при прогнозировании поведения МРИУС в рамках ее адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации (см. п. 5.5).

Оценки среднего времени ожидания результатов выполнения заданий для многопользовательских АПК УД «Электроника» и «Тракт усиления звуковой частоты», рассчитанные на основе полученных в процессе опытной эксплуатации массивов статистических данных и разработанных в диссертации математических моделей, приведены в таблицах 6.2.5 и 6.2.6 на примере ряда ограниченных ($\approx 30\text{--}60$ минут) временных интервалов наибольшей нагрузки [29, 151, 161].

Результаты расчета значений $\bar{t}_{\text{ож}}$ средствами математического моделирования приведены для аппроксимации эмпирического распределения времени обслуживания заданий при помощи Гамма-распределения и гипотезы о показательном распределении времени размышления пользователей. Оценка пропускной способности МРИУС выполнена с учетом выражения (3.6.1).

Таблица 6.2.5 – Результаты экспериментальных исследований оперативности функционирования многопользовательского АПК УД «Электроника»

№ п/п	Параметры МРИУС	Среднее время ожидания результатов выполнения заданий ($\bar{t}_{ож}$), с		Пропускная способность (γ^c), заданий/мин	
		Эксперимент	Математическое моделирование	Эксперимент	Математическое моделирование
1	$N_T = 10$ терминалов; $\bar{t}_{разм_э} = 36$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 1,4$ с	1,8	1,9	16	16
2	$N_T = 14$ терминалов; $\bar{t}_{разм_э} = 37$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 1,1$ с	1,8	1,6	15	16
3	$N_T = 30$ терминалов; $\bar{t}_{разм_э} = 30$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 1$ с	6	5	50	51

Таблица 6.2.6 – Результаты экспериментальных исследований оперативности функционирования многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»

№ п/п	Параметры МРИУС	Среднее время ожидания результатов выполнения заданий ($\bar{t}_{ож}$), с		Пропускная способность (γ^c), заданий/мин	
		Эксперимент	Математическое моделирование	Эксперимент	Математическое моделирование
1	$N_T = 8$ терминалов; $\bar{t}_{разм_э} = 25$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 3,2$ с	7,4	6,8	15	15
2	$N_T = 8$ терминалов; $\bar{t}_{разм_э} = 25$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 2,4$ с	4,4	4,4	16	16
3	$N_T = 22$ терминала; $\bar{t}_{разм_э} = 25$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 1,4$ с	8,4	7	39	41
4	$N_T = 22$ терминала; $\bar{t}_{разм_э} = 25$ с; $\bar{t}_{обсл_э} = 1,5$ с	10,5	9	37	39

Полученные результаты экспериментальных исследований показали приемлемую для инженерных расчетов точность оценки среднего времени ожидания результатов выполнения заданий в МРИУС на основе предложенных в диссертации математических моделей. Максимальное значение погрешности расчета значений $\bar{t}_{ож}$ не превышает 17 % (см. таблицы 6.2.5, 6.2.6).

Дальнейшее повышение точности оценки значений $\bar{t}_{ож}$ возможно посредством уточнения в соответствующих аналитических моделях динамики функционирования МРИУС законов распределения времени выполнения заданий для каждого объектного модуля. Также возможно использование гистограмм относительных эмпирических частот распределения, полученных экспериментально (например, см. рисунок 6.2.7), в качестве дискретных законов распределения величины $\tilde{t}_{обсл}$ при исследовании динамики функционирования на базе разработанной имитационной модели (см. п. 3.4.2). При необходимости оценка дисперсии величины $\tilde{t}_{ож}$ в МРИУС выполняется на основе разработанной в диссертации имитационной модели динамики функционирования с учетом имеющейся эмпирической информации о характерах распределений времени размышления пользователей (см. п. 6.2.1) и времени обслуживания (см. п. 6.2.2).

Результаты экспериментальных исследований показали, что при функционировании МРИУС в режимах за точкой ее «насыщения» (то есть при $N_T > N_T^*$, см. выражение (1.2.3)) к быстрдействию измерительно-управляющей ЭВМ предъявляются повышенные требования относительно режимов функционирования до «насыщения», так как при возникновении дополнительных задержек $\bar{t}_{зад}^{доп}$ (например, обусловленных переключением ЭВМ между функциональными операциями заданий, процессами поиска номера следующего обрабатываемого задания из очереди, извлечения задания из очереди и пр.) среднее время ожидания в МРИУС, описываемой одноканальной системой массового обслуживания, возрастает на величину $N_T \cdot \bar{t}_{зад}^{доп}$ (см. выражение (3.4.10)).

Например, увеличение среднего времени выполнения заданий в многопользовательском АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» на 100 мс при общем числе одновременно работающих терминалов пользователей $N_T = 22$ (см. таблицу 6.2.6) привело к увеличению среднего времени ожидания результатов выполнения заданий приблизительно на 2 секунды. При выявлении на этапе опытной эксплуатации соответствующей проблемы (см. рисунок 5.5.2), она может быть решена

посредством выделения для работы *диспетчера разделяемого ресурса* и *программного комплекса управления и измерения* (см. рисунок 1.2.1) отдельных ЭВМ.

Опытная эксплуатация и полученные в ходе ее статистические данные об оперативности функционирования многопользовательского АПК УД «Электроника» (см. таблица 6.2.5) показали возможность увеличения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей до 35–40 терминалов. Таким образом, были организованы дополнительные локации доступа (см. п. 5.5) в целях *параллельного* использования данного многопользовательского АПК УД несколькими потоками обучаемых, в том числе в рамках смежных дисциплин и направлений подготовки.

Опытная эксплуатация и результаты экспериментальных исследований оперативности функционирования многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» выявили необходимость увеличения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей (см. п. 1 в таблице 6.2.6). Результаты экспериментальных исследований эффективности применения разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования на примере многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» рассматриваются в следующем параграфе.

6.3 Экспериментальные исследования методов повышения оперативности функционирования МРИУС

В рамках реализации комплекса мероприятий, предусмотренных методикой адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации (см. п. 5.5, рисунок 5.5.2), на примере многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты», проведены экспериментальные исследования эффективности применения ряда разработанных в диссертации методов повышения оперативности МРИУС.

В рамках проводимых экспериментальных исследований на первоначальном этапе выполнялась направленная модификация алгоритма работы *диспетчера разделяемого ресурса* в соответствии с одним из реализуемых методов (см. глава 4), на следующем этапе осуществлялась опытная эксплуатация модернизированного образца МРИУС и проводился повторный анализ ее оперативности функционирования на основе накопленного в процессе эксплуатации массива статистических данных.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием программных модулей, установленных на удаленных терминалах и имитирующих работу пользователей при среднем времени размышления $\bar{t}_{\text{разм}} = 25$ с.

6.3.1 Экспериментальные исследования метода временного разделения многократных измерений

Первоначальный вариант реализации аппаратно-программного обеспечения многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» предусматривал выполнение 9 циклов ($n_y = 9$) измерения осциллограмм сигналов и их усреднение на измерительно-управляющей ЭВМ.

В результате выполненной доработки соответствующего прикладного программного обеспечения МРИУС был реализован метод временного разделения многократных измерений путем ограничения числа выполняемых измерительных циклов одним циклом ($n_y = 1$) и выполнения усреднения результатов измерения на терминалах пользователя на основе рекуррентного алгоритма (см. выражение (4.3.4), рисунок 4.3.2) [334, 335]. Результаты экспериментальных исследований эффективности реализации метода временного разделения на примере многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» приведены в таблице 6.3.1.

Реализация метода временного разделения многократных измерений обеспечила сокращение среднего времени выполнения заданий на 1 секунду за счет снижения средней длительности функциональной операции измерения $\bar{t}_{\text{изм}}$ с 1,2 с до 0,2 с. Непропорциональное сокращение величины $\bar{t}_{\text{изм}}$ в 6 раз относительно исходного значения при $n_y = 9$ обусловлено соответствующим влиянием длительности выполнения программной процедуры конфигурирования измерительных каналов (временем работы драйвера многофункционального устройства сбора данных).

Проведенный анализ составляющих времени выполнения заданий в многопользовательском АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» (см. выражение (3.4.3)) показал, что с учетом реализации метода временного разделения многократных измерений основной вклад в величину $\bar{t}_{\text{обсл}}$ вносит время выполнения функциональной операции управления $\bar{t}_{\text{упр}}$ ($\frac{\bar{t}_{\text{упр}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}} \approx 15$).

Таблица 6.3.1– Результаты экспериментальных исследований эффективности применения метода временного разделения многократных измерений

Параметры и характеристики МРИУС	Базовый алгоритм диспетчеризации <i>FIFO</i>	Метод временного разделения многократных измерений	Достигнутый эффект
Среднее время выполнения заданий ($\bar{t}_{обсл}$), с	3,2	2,2	Сокращение на 31 %
Среднее время ожидания результатов ($\bar{t}_{ож}$), с, при $N_T = 8$	7,4	4,3	Сокращение на 42 %
Пропускная способность (γ^C), заданий/мин	14,8	16,4	Увеличение на 11 %
Число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей, при $\bar{t}_{ож_пор} = 8$ с	8	13	Увеличение на ≈ 63 %

Таким образом, в дальнейшем в целях увеличения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей целесообразна реализация мероприятий, направленных на сокращение величины $\bar{t}_{упр}$.

Результаты экспериментальных исследований эффективности применения разработанного в диссертации метода оптимизации операций управления рассматриваются в следующем пункте.

6.3.2 Экспериментальные исследования метода оптимизации операций управления

В качестве объекта исследования в рассматриваемом многопользовательском АПК УД является тракт усиления звуковой частоты, состоящий из предварительного усилителя и усилителя низкой частоты (см. таблицу 6.1.1, приложение А). Изменение типономиналов элементов электрических схем устройств, установка тока покоя выходного каскада, изменение номинала сопротивления нагрузки, моделирование отказов, коммутация входов/выходов и т.д. выполняются на основе ряда реле [358].

Установка требуемой конфигурации тракта усиления звуковой частоты, формализовано описываемой массивом позиций контактных групп реле \mathbf{R} , производится посредством последовательной адресной подачи импульсов напряжения на соответствующие обмотки реле согласно обрабатываемому заданию [358].

В целях реализации метода оптимизации операций управления в промышленном образце МРИУС «Тракт усиления звуковой частоты» в результате доработки его аппаратно-программного обеспечения было реализовано сохранение аппаратных состояний реле и массива значений позиций \mathbf{R} для последнего выполненного задания, а также произведена соответствующая модификация алгоритма работы *диспетчера разделяемого ресурса* (см. рисунок 4.2.3). В соответствии с примененным методом (см. п. 4.2) в рамках модифицированного алгоритма работы *диспетчера разделяемого ресурса* реализован анализ массивов позиций контактных групп реле для имеющихся в очереди заданий \mathbf{R}_q и извлечение следующим из очереди того задания, для которого число несовпадений значений позиций контактных групп реле относительно текущей конфигурации $\mathbf{R}^{\text{тек}}$ является минимальным [327, 328]:

$$\forall \mathbf{R}_q, \mathbf{L}_q := \mathbf{R}^{\text{тек}} \vee \mathbf{R}_q, q = 1, 2, \dots, Q;$$

$$i := q, \text{ при } \sum_{l \in \mathbf{L}_q} l \rightarrow \min, \quad (6.3.1)$$

где Q – число имеющихся заданий в очереди; i – номер следующего извлекаемого задания из очереди.

Результаты экспериментальных исследований эффективности реализации метода оптимизации операций управления относительно варианта модификации многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты», реализующего метод временного разделения многократных измерений (см. таблицу 6.3.1), представлены в таблице 6.3.2.

Достигнутое в результате применения метода оптимизации операций управления сокращение среднего времени выполнения заданий на 36 % за счет сокращения средней длительности выполнения функциональной операции управления $\bar{t}_{\text{упр}}$ с 2 с до 1,2 с обеспечило возможность повышения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей на 60 % (см. таблица 6.3.2).

Таблица 6.3.2 – Результаты экспериментальных исследований эффективности применения метода оптимизации операций управления

Параметры и характеристики МРИУС	Метод временного разделения многократных измерений	Метод оптимизации операций управления	Достигнутый эффект
Среднее время выполнения заданий ($\bar{t}_{\text{обсл}}$), с	2,2	1,4	Сокращение на 36 %
Среднее время ожидания ($\bar{t}_{\text{ож}}$), с, при $N_T = 8$	4,3	2,4	Сокращение на 28 %
Пропускная способность (γ^C), заданий/мин	16,4	17,5	Увеличение на 7 %
Число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей, при $\bar{t}_{\text{ож_пор}} = 8$ с	13	21	Увеличение на ≈ 60 %

Совместное применение разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования (см. глава 4, п. 4.5) для многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» позволило увеличить число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей приблизительно в 2,6 раза (см. таблицы 6.3.1, 6.3.2), что экспериментально подтверждает эффективность предложенных методов. Внедрение результатов диссертационных исследований в области автоматизации экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров обобщается в параграфе 6.4.

6.4 Внедрение результатов диссертации

Разработанные в диссертации программное обеспечение, алгоритмы, модели, методы, методики, база данных инженерных решений, а также методология в целом проверялись в процессе разработки опытных образцов МРИУС автоматизации экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей, в процессе разработки и эксплуатации промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований.

Методика адаптации МРИУС в процессе их эксплуатации, рассмотренная в параграфе 5.5, разработана в рамках диссертации и является дополнением к предложенной методологии проектирования МРИУС (не входя в ее состав). В таблице 6.4.1 приведены сводные данные внедрения результатов диссертации. Внедрение составных компонентов методологии, а также методологии в целом в практику создания автоматизированных систем экспериментальных исследований позволило:

- разработать ряд принципиально новых МРИУС на основе временного разделения аппаратно-программных ресурсов, применение которых дало возможность снизить материальные затраты на обеспечение процесса испытаний и/или повысить в несколько раз производительность выполняемых на их основе работ;
- создать ряд промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований, обеспечивающих сокращение затрат на необходимое оснащение лабораторно-исследовательской базы в несколько раз;
- сократить общие сроки разработки новых образцов МРИУС за счет унификации подходов и технических решений при разработке компонентов их аппаратно-программного обеспечения;
- в целом реализовать инструментарий, способствующий внедрению цифровых инноваций в процесс переподготовки и подготовки кадров в рамках адаптации обучаемых к новым профессиям и бизнес-моделям предоставления услуг, базирующихся на современных цифровых и информационно-коммуникационных технологиях.

Технический эффект от внедрения результатов диссертационных исследований в области автоматизации экспериментальных исследований обусловлен:

- существенным снижением временных и материальных затрат в процессе разработки МРИУС за счет систематизации, обобщения и унификации подходов и вариантов решений комплекса проектных задач;
- увеличением технического уровня создаваемых образцов МРИУС за счет применения разработанных методов повышения оперативности функционирования, учитывающих состав и содержание выполняемых заданий пользователей на их основе;
- осуществлением комплексного подхода к сопровождению процесса эксплуатации МРИУС и реализации механизмов их адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации на основе регистрации, накопления и анализа статистических данных о процессе их функционирования как СМО.

Таблица 6.4.1 – Внедрение результатов диссертационного исследования

№ п/п	Результат диссертационных исследований	Объект внедрения	Характер внедрения	Эффект от внедрения
1	Методология проектирования МРИУС	Процесс создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований	Усовершенствование процесса разработки МРИУС на основе разработанной методологии	<p>1. Сокращение до 30 % и более общих сроков разработки проектных решений за счет унификации подходов к решению комплекса проектных задач.</p> <p>2. Создание ряда образцов опытных и промышленных МРИУС с улучшенными в среднем на 20–30 % и более показателями технического уровня</p>
2	Базовые структуры аппаратного построения МРИУС (п. 3.1)	Промышленные образцы МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований	Разработано аппаратное обеспечение ряда многообъектовых МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований на основе многофункциональных устройств сбора данных	Сокращение до 30 % затрат на реализацию аппаратного обеспечения МРИУС за счет применения структур аппаратного построения с внутренним разделением каналов
		Аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения БРЭА систем управления КА	Разработана архитектура аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения БРЭА КА	Сокращение в несколько раз материальных и до 50% временных затрат на ресурсное обеспечение процесса тестирования ПО вычислительного модуля БРЭА КА
3	Методическое обеспечение; математические модели динамики функционирования; базовые структуры аппаратного построения МРИУС (п. 3.1–3.7)	Опытные образцы МРИУС автоматизации экспериментальных исследований	Выполнение поисковых исследований в части реализации опытных образцов МРИУС в области автоматизации экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей	Разработанные опытные образцы МРИУС обеспечивают до 10 и более раз повышение производительности выполняемых на их основе работ (испытаний, экспериментальных исследований) при использовании одного комплекта специализированного оборудования

№ п/п	Результат диссертационных исследований	Объект внедрения	Характер внедрения	Эффект от внедрения
4	Имитационная модель динамики функционирования МРИУС (п. 3.4)	Процесс разработки и эксплуатации МРИУС автоматизации экспериментальных исследований	Анализ результативности применения разработанных методов повышения оперативности функционирования МРИУС	Сокращение числа обратных связей в процессе разработки и общих сроков разработки за счет повышения информативности анализа динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания
5	Методы повышения оперативности функционирования (п. 4.2–4.4)	Промышленные образцы МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований	Модификация алгоритма работы диспетчера разделяемого ресурса на основе анализа содержания и состава выполняемых в МРИУС заданий, особенностей реализации аппаратно-программного обеспечения	Повышение более чем в 2 раза числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей в МРИУС (АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты») относительно базового алгоритма диспетчеризации
6	Базовое измерительное обеспечение МРИУС (п. 5.1); базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС (п. 5.2)	Промышленные образцы МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований	На основе унифицированных решений комплекса проектных задач разработано прикладное программное обеспечение для ряда промышленных образцов МРИУС (АПК УД «Основы теории цепей», «Полупроводниковые приборы», «Электропроводность биологических объектов», «Устройства приема и обработки сигналов» и др.)	<p>1. Сокращение в 2 и более раз длительности функциональных операций измерения вольт-амперных, частотных и других характеристик ряда объектов исследования.</p> <p>2. Сокращение до 50 % временных затрат на разработку прикладного программного обеспечения МРИУС</p>
7	Методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации (п. 5.5)	Процесс опытной и промышленной эксплуатации МРИУС автоматизации экспериментальных исследований	Реализация механизма адаптации МРИУС посредством целевой реализации комплекса технических и организационных мероприятий на основе регистрации и накопления статистических данных о процессе их функционирования как СМО	Поддержание в процессе эксплуатации технических характеристик МРИУС на требуемом расчетном уровне с учетом изменяющихся условий

Разработанные в рамках исследований методы повышения оперативности функционирования МРИУС защищены патентами РФ на изобретение [325, 328, 335, 337]. Применяемые математические модели динамики функционирования МРИУС доведены до программной реализации и зарегистрированы в Роспатенте [318–320]. Корректность предложенных математических моделей динамики функционирования МРИУС проверена экспериментально (см. п. 6.2). Достоверность разработанных программных модулей соответствующих математических моделей проверена посредством сопоставления частных результатов, полученных на их основе, с результатами моделирования, полученными другими авторами [162, 209, 271, 312, 313 и др.].

Разработанные на основе предложенной в диссертации методологии промышленные и опытные образцы МРИУС автоматизации экспериментальных исследований успешно внедрены в производственные процессы и учебный процесс ряда учреждений высшего образования. Документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационного исследования, приведены в приложении Б.

В соответствии с вышеизложенным разработанная методология проектирования МРИУС (глава 2), в состав которой вошли рассмотренные в главах 3–5 методы, модели, методики, алгоритмы и комплекс решений, и представленные в главе 6 результаты апробации и экспериментальных исследований, решают все задачи диссертационного исследования, поставленные в главе 1.

6.5 Выводы по главе 6

1. Проведена апробация компонентов предложенной методологии проектирования в процессе разработки образцов МРИУС в области автоматизации прикладных экспериментальных исследований изделий ракетно-космической техники и их составных частей. Показано, что применение разработанных образцов МРИУС обеспечивает сокращение материально-технических и временных затрат на проведение и оснащение процессов экспериментальных исследований.

2. На основе предложенных в рамках диссертационных исследований методов, моделей, методик, алгоритмов, программного обеспечения разработан и создан ряд промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований с улучшенными в среднем на 20–30 % и более

показателями технического уровня относительно применяемых ранее аналогов и прототипов. Созданные образцы успешно внедрены в процесс подготовки и переподготовки кадров ряда учреждений высшего образования.

3. Внедрение результатов диссертационных исследований в практику создания МРИУС обеспечило сокращение до 30 % и более общих сроков разработки новых образцов за счет унификации подходов и решений ряда проектных задач, посредством применения: разработанного комплекса методического обеспечения, базовых структур построения, алгоритмов диспетчеризации, комплекса базового измерительного обеспечения и др.

4. Проведены экспериментальные исследования динамики функционирования ряда промышленных образцов МРИУС как СМО в процессе их опытной и промышленной эксплуатации. Результаты математического моделирования на основе предложенных математических моделей с приемлемой для инженерных расчетов точностью согласуются с полученными результатами экспериментальных исследований. Дальнейшее повышение точности моделирования выполняется посредством уточнения параметров и принятых гипотез на основе накапливаемых статистических данных о параметрах процесса функционирования соответствующих МРИУС.

5. На основе апробации и опытной эксплуатации разработанной подпрограммы регистрации и централизованного накопления статистических данных о процессе функционирования МРИУС определен перечень регистрируемых данных, необходимых и достаточных для осуществления экспериментальной оценки их технических характеристик как СМО, выполнения процедуры идентификации и верификации математической модели ее динамики функционирования, а также принятия решения о реализации соответствующего комплекса мероприятий в рамках анализа функционирования данных систем или их адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации.

6. В процессе опытной эксплуатации ряда многопользовательских АПК УД апробирована предложенная методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям их эксплуатации. В ходе реализации данной методики на основе накопленных статистических данных о параметрах процесса функционирования для АПК УД «Электроника» проведены изменения организационного обеспечения в части развертывания дополнительных локаций доступа к нему, для АПК УД «Тракт усиления

звуковой частоты» выполнена направленная модификация прикладного программного обеспечения и реализуемого алгоритма диспетчеризации.

7. На примере многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» проведена экспериментальная проверка эффективности применения разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования МРИУС. Последовательное применение предложенных методов временного разделения многократных измерений и метода оптимизации управления позволило увеличить для данного АПК УД число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей более чем в 2 раза (с 8 до 21 терминала).

8. Обобщен и представлен в виде сводной таблицы эффект, полученный от внедрения результатов диссертационного исследования в области автоматизации экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научно-техническая проблема рационального использования технических ресурсов в процессе интенсификации производства в ракетно-космической промышленности и отраслевой системе подготовки кадров, имеющая важное народнохозяйственное значение. Обозначенная проблема решена за счет усовершенствования научных основ создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований, а также за счет разработки, внедрения и эксплуатации образцов данных систем.

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования, заключаются в решении следующих представленных на рисунке 1.3.1 задач:

1. Исследованы основные подходы прикладного применения метода разделения времени в ряде прикладных областей. На основе проведенного их анализа, обобщения и систематизации конкретизировано определение термина МРИУС.

2. Разработан обобщенный критерий оценки технического уровня МРИУС автоматизации экспериментальных исследований (см. п. 2.3, выражение (2.3.1)), характеризующий эффективность организации режима коллективного пользования единичными экземплярами оборудования (разделяемыми ресурсами), выделены направления совершенствования МРИУС и комплекс целевых мероприятий (см. п. 2.4), реализация которых в процессе разработки проектных решений позволила улучшить показатели технического уровня созданных образцов данных систем в среднем на 20–30 % и более относительно ранее известных их аналогов и/или прототипов.

3. Разработаны и реализованы в виде адаптируемых программных модулей базовые аналитические модели (см. п. 3.4) и дополненная базовая имитационная модель динамики функционирования МРИУС как СМО, учитывающая структуру аппаратного построения, длительности функциональных операций управления и измерения, их зависимость от параметрического и функционального содержания выполняемых заданий, задержку прохождения заданий по сети, вариативность реализуемых алгоритмов диспетчеризации, а также гетерогенность размышления и обслуживания пользователей (см. п. 3.4, рисунки 3.4.8, 3.4.9), которые обеспечили сокращение до 30% и более сроков решения частных проектных задач и объема натурных испытаний.

4. Разработаны новые методы повышения оперативности функционирования МРИУС (метод оптимизации операций управления, метод временного разделения многократных измерений, метод распараллеливания функциональных операций) и алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса, их реализующие (см. п. 4.2–4.4, рисунки 4.2.3, 4.3.2, 4.4.3). На способы функционирования МРИУС в соответствии с предложенными методами получен ряд патентов РФ на изобретение. Применение данных методов позволило в 3–6 раз расширить множество проектных решений МРИУС, синтезируемых на этапе разработки согласно заданным требованиям ТЗ, а также увеличить с 8 до 21 число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей для созданного промышленного образца МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований. Решение о реализации разработанных методов для уже созданных и внедренных в эксплуатацию МРИУС может быть принято на основе анализа статистических данных о параметрах процесса их функционирования как СМО, регистрируемых и накапливаемых посредством разработанной, созданной и апробированной в диссертации специализированной подпрограммы (см. п. 4.1, 5.5).

5. Разработан комплекс решений ряда проектных задач, возникающих в процессе разработки МРИУС, который представлен набором базовых структур аппаратного построения (п. 3.1); алгоритмами диспетчеризации разделяемого ресурса на основе предложенных методов (п. 4.2–4.4); комплексом базового измерительного обеспечения (п. 5.1); базовыми шаблонами проектирования графического интерфейса пользователя (п. 5.2), и обеспечивший для ряда созданных образцов МРИУС сокращение до 30% и более временных затрат на разработку аппаратных и программных компонентов, а также сокращение более чем 2 раза длительностей функциональных операций измерения (п. 6.1).

6. Разработана методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками (см. п. 5.4, рисунок 5.4.1), обеспечивающая сокращение в среднем на 20–25 % сроков разработки образцов данных систем и возможность повышения их технического уровня, основанная как на известных, так и на разработанных математических моделях, методах повышения оперативности функционирования, комплексе решений и использовании разработанных частных методик:

- методика проектирования аппаратно-программного обеспечения (п. 3.2);
- методика оценки параметров сценария диалога в МРИУС (п. 3.3);

- методика формирования граничных значений параметров сценария диалога (п. 3.5);
- методика оценки технических характеристик (п. 3.6);
- методика расчета функций параметрической чувствительности для параметров оперативности функционирования (п. 3.7) и др.

Предложенная методика также реализует процедуру поиска проектного решения МРИУС с наилучшим значением разработанного критерия оценки технического уровня, аккумуляцию и возможность применения положительного опыта предыдущих разработок на основе итерационно формируемой и актуализируемой базы данных инженерных решений (см. п. 5.3, рисунки 5.3.1, 5.3.2).

7. Разработана методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям их эксплуатации на основе созданного специализированной подпрограммы регистрации и накопления статистических данных (см. п. 5.5, рисунок 5.5.2), обеспечивающая сопровождение и анализ процесса функционирования, а также последующую адаптацию на этапах опытной и промышленной эксплуатации в соответствии с заданными и фактическими значениями ее технических характеристик функционирования как системы массового обслуживания, что в конечном счете повышает результативность применения создаваемых и существующих образцов систем.

8. Проведены экспериментальная проверка и апробация предложенных методов, моделей, методик, алгоритмов и решений, подтвердившие адекватность применяемых математических моделей, эффективность использования разработанных методов, методик, алгоритмов и программного обеспечения в процессе разработки и эксплуатации образцов МРИУС (см. п. 6.1–6.4, таблица 6.4.1). Результаты диссертационного исследования внедрены в области автоматизации экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров, а также в учебный процесс ряда высших учебных заведений. Разработанное в диссертации и на основе ее результатов прикладное и специализированное программное обеспечение доведено до уровня программных продуктов и зарегистрировано в Роспатенте.

9. На основе отдельных компонентов методологии и методологии в целом разработан и создан ряд новых опытных и промышленных образцов МРИУС в области автоматизации промышленного, научного и учебного эксперимента, в том числе защищенных патентами РФ на изобретение, с улучшенным в среднем на 20–30 % и

более техническим уровнем относительно применяемых ранее аналогов и прототипов (см. п. 6.1, таблица 6.1.1).

10. Разработанные в результате решения поставленных в диссертации задач методы, модели, методики и комплекс решений в целом формируют предметно-ориентированную методологию проектирования МРИУС (см. п. 2.5), которая содержит научные основы построения автоматизированных систем экспериментальных исследований с временным разделением аппаратно-программных ресурсов. Принципиальным отличием методологии от известных является фокусировка в ней на специфике МРИУС, характеризуемой выполнением в интерактивном диалоговом режиме индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий нескольких пользователей на основе одного разделяемого аппаратно-программного ресурса, что позволяет создавать образцы МРИУС автоматизации экспериментальных исследований с улучшенными показателями технического уровня.

Дальнейшее перспективное развитие тематики диссертационных исследований возможно в следующих направлениях:

- разработка и исследование методов повышения пропускной способности и унифицированных решений компонентов аппаратно-программного обеспечения МРИУС автоматизации экспериментальных исследований с учетом особенностей их прикладного применения;
- разработка и исследование алгоритмов адаптивного управления конфигурацией аппаратно-программного обеспечения МРИУС автоматизации экспериментальных исследований на основе нейросетевого подхода;
- разработка экспертной системы информационной поддержки процесса создания МРИУС автоматизации экспериментальных исследований на основе формализованного описания имеющегося и вновь получаемого опыта и результатов разработки, а также эксплуатации.

Разработанные и апробированные результаты диссертационной работы могут быть также положены в основу формирования *платформы* Интернета вещей (*Internet of Thing*) на основе Международного стандарта ISO/IEC 30141:2018 [450], ориентированной на реализацию сервисной модели доступа к единичным экземплярам специализированного оборудования для проведения эксперимента (*Laboratory as a service*) на базе современной высокотехнологичной образовательной среды.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ТЕРМИНОВ

- АПК УД – аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом
- АРМ – автоматизированное рабочее место
- АСЭИ – автоматизированная система экспериментальных исследований
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- Б – буфер
- БД – база данных
- БВО – блок вторичных оценок
- БКМП – блок коррекции методической погрешности
- БПО – блок первичных оценок
- БРЭА – бортовая радиоэлектронная аппаратура
- БУ – блок управления
- БЦВК – бортовой цифровой вычислительный комплекс
- ВМ – вычислительный модуль
- ВПИ – внутрисприборный интерфейс
- ВФ – весовая функция
- ВхП – входной переключатель
- ГИП – графический интерфейс пользователя
- ГНП – групповой нормирующий преобразователь
- Д – датчик
- ДПФ – дискретное преобразование Фурье
- ИМС – интерфейсный модуль сопряжения
- ИППП – измеритель параметров полупроводниковых приборов
- ИС – измерительная система
- ИУ ЭВМ – измерительно-управляющая электронная вычислительная машина
- КА – космический аппарат
- КВПИ – контроллер внутрисприборного интерфейса
- КИ – измерительный канал
- КУ – канал управления
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура
- РЭС – радиоэлектронные средства
- НП – нормирующий преобразователь

НОК БРЭА – наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры

ММ – математическая модель

МРИУС – многопользовательская распределенная измерительно-управляющая система

МРЛС – многоканальная радиолокационная станция

ОУиК – объект управления и контроля

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

ПО – программное обеспечение

ПЭВМ – персональная электронная вычислительная машина

СМО – система массового обслуживания

СПО – системное программное обеспечение

ТП – терминал пользователя

ТПП – тестируемый полупроводниковый прибор

УВП – унифицированные виртуальные приборы

ФПЧ – функция параметрической чувствительности

ФУ – функциональный узел

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЭРИ – электрорадиоизделия

FTDMA – Frequency/Time Division Multiple Access – многостанционный доступ с частотным и временным разделением

IoT – Internet of Things – Интернет Вещей

TDM – Time Division Multiplexing – временное мультиплексирование

TDMA – Time Division Multiple Access – многостанционный доступ с временным разделением каналов

- Аспект моделирования – отдельное свойство или совокупность свойств объекта моделирования, являющихся предметом исследования с помощью моделирования [254].
- Диалоговый режим – режим взаимодействия человека с системой обработки информации, при котором человек и система обмениваются информацией в темпе, который соизмерим с темпом обработки информации человеком [132].
- Знания – закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области [385].
- Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины путем ее измерения с требуемой точностью в данных условиях измерений [125].
- Интерактивный режим – режим взаимодействия процесса обработки информации системы обработки информации с человеком, выражающийся в разного рода воздействиях на этот процесс, предусмотренных механизмом управления конкретной системы и вызывающих ответную реакцию процесса [132].
- Информационная модель – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде совокупности элементов данных и отношений между ними [254].
- Компьютерная модель – модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными [254].

- Математическая модель – модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений. [254].
- Многопользовательский режим работы системы автоматизированного лабораторного практикума – режим работы системы автоматизированного лабораторного практикума (АЛП), при котором несколько субъектов системы АЛП работают с одним изучаемым объектом в режиме реального времени по запросу со стороны пользователя системы. Синоним – «режим коллективного пользования системы АЛП» [221].
- Многопользовательская распределенная измерительно-управляющая система – автоматизированная система экспериментальных исследований, функционирующая с внешним асинхронным временным разделением ресурсов между несколькими пользователями и обеспечивающая выполнение их индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий в удаленном интерактивном диалоговом режиме.
- Мультиарендность (англ. multitenancy) – подход совместного независимого использования одного экземпляра программного приложения несколькими «арендаторами» путем предоставления каждому «арендатору» выделенного общего ресурса [59].
- Поле знаний – описание основных понятий предметной области и свойств всех отношений, используемых для установления связей между понятиями [386].
- Проектное решение – описание в заданной форме объекта проектирования или его части, необходимое и достаточное для определения дальнейшего направления проектирования [234].

- Режим разделения времени – мультипрограммирование, при котором ресурсы системы обработки информации предоставляются каждому процессу из группы процессов обработки информации, находящихся в системе обработки информации, на интервалы времени, длительность и очередность представления которых определяется управляющей программой этой системы с целью обеспечения одновременной работы процессов этой группы в интерактивном режиме [132].
- Режим реального времени – режим обработки информации, при котором обеспечивается взаимодействие системы обработки информации с внешними по отношению к ней процессами в темпе, соизмеримом со скоростью протекания этих процессов [132].
- Симплификация – форма стандартизации, направленная на сокращение применяемых при разработке и производстве изделий числа типов комплектующих до такого количества, которое является достаточным для удовлетворения существующей потребности [261].
- Технический уровень продукции – относительная характеристика качества продукции, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство оцениваемой продукции, с базовыми значениями соответствующих показателей [237].
- Типизация – разновидность стандартизации, заключающаяся в разработке и установлении типовых решений (конструктивных, технологических, организационных и пр.) [261].
- Шаблон проектирования (англ. design pattern) – повторяемая архитектурная конструкция программного обеспечения, представляющая собой решение проблемы проектирования в рамках некоторого часто возникающего контекста [376].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абилов, А. В. Сети связи и системы коммутаций / А. В. Абилов. – М.: Радио и связь, 2004. – 288 с.
2. Ступин, Ю. В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ / Ю. В. Ступин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 288 с.
3. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958 с.
4. Олишевский, Д. П. Моделирование и анализ организации и управления центром коллективного пользования / Д. П. Олишевский, Б. Ю. Сербиновский; Южный федеральный университет. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2009. – 135 с.
5. Карплюс, У. Системы с разделением времени / У. Карплюс. – М.: Мир, 1969. – 456 с.
6. Аверина, Т. А. Алгоритм статистического моделирования динамических систем с разделением времени / Т. А. Аверина // Труды международной конференции по вычислительной математике. МКВМ-2004. Ч. 1. – Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004. – С. 226–231.
7. Шерр, А. Анализ вычислительных систем с разделением времени / А. Шерр. – М.: Мир, 1970. – 136 с.
8. Артемьев, В. М. Управление в системах с разделением времени / В. М. Артемьев, В. А. Ганэ, В. Л. Степанов. – Минск: Вышэйшая школа, 1982. – 223 с.
9. Хелд, Г. Технологии передачи данных / Г. Хелд. – 7-е изд. – СПб.: Питер, Издательская группа BVH, 2003. – 720 с.
10. Пат. US7505891 США, МПК G06F 9/455. Multi-user server system and method / Lin Sharon Sheau-Pyng. – № 2004/0236556 A1; заявл. 25.11.2004; опубл. 17.03.2009.
11. Пат. US7496666 США, МПК G06F 15/173, G06F 15/16. Multi-user computer system / Bates Ph. et al. – № 2004/0236556 A1; заявл. 03.01.2006; опубл. 24.02.2009.
12. Самойленко, В. И. Управление фазированными антенными решетками / В. И. Самойленко, Ю. А. Шишов – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
13. Уилкс, М. Системы с разделением времени / М. Уилкс. – М.: Мир, 1972. – 124 с.

14. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
15. Пат. EP0859241B1 Европа, МПК G01S 13/42, G01S 13/34. Time-Sharing Radarsystem / Komatsu S., Ashihara J. – № 2004/0236556 A1; заявл. 31.08.1993; опубл. 10.01.2001.
16. Аболиц, А. И. Системы спутниковой связи. Основы структурно-параметрической теории и эффективность / А. И. Аболиц. – М.: ИТИС, 2004. – 426 с.
17. Многотерминальные системы для учебно-исследовательской работы в техническом вузе / А. И. Дружинин, А. Г. Козачок, А. В. Логинов, В. Н. Сарнадский // Автометрия. – 1982. – № 4. – С. 13–17.
18. Асфаль, Р. Роботы и автоматизация производства: пер. с англ. / Р. Асфаль–М.: Машиностроение, 1989. – 448 с.
19. El-Araby, E. Space and time sharing of reconfigurable hardware for accelerated parallel processing / E. El-Araby, V. K. Narayana, T. El-Ghazawi // Reconfigurable Computing: Architectures, Tools and Applications. ARC 2010. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – P. 219–230.
20. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование / М. П. Цапенко. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
21. Baecker, R. Readings in human computer interaction: Towards the Year 2000 / R. Baecker, J. Grudin, B. Buxton, S. Greenberg. – San Francisco: Morgan Kaufman, 1995. – 950 p.
22. Бронер, Ю. Д. Математическое обеспечение систем с разделением времени / Ю. Д. Бронер. – М.: Статистика, 1976. – 61 с.
23. Ходаков, В. Е. Научные школы компьютеростроения: история отечественной вычислительной техники / В. Е. Ходаков. – Херсон: Из-во ХНТУ, 2010. – 290 с.
24. Bemer, R. W. How to consider a computer / R. W. Bemer // Automatic Control Magazine. – 1957. – March. – P. 66–69.
25. Поспелов, Д. А. Введение в теорию вычислительных систем / Д. А. Поспелов. – М.: Советское радио, 1972. – 280 с.
26. Estrin, G. Measures, models and measurements for time-shared computer utilities / G. Estrin, L. Kleinrock // Proceeding – A.C.M. National Meeting. – August 1967. – P. 85–96.

27. Kleinrock, L. Certain analytic results for time-shared processors // IFIP Congress 1968. – Amsterdam. – 1968. – P. 838–845.
28. Lipsky L. R. Queueing Theory. A linear algebraic approach / L. R. Lipsky. – 2 ed. – New York: Springer, 2009.
29. Rosen, S. Lectures on the measurement and evaluation of the performance of computing systems / S. Rosen. – Philadelphia: Society for industrial and applied mathematics, 1976. – 138 p.
30. Авен, О. И. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем / О. И. Авен, Н. Н. Гурин, Я. А. Коган. – М.: Наука, 1982. – 464 с.
31. Campbell-Kelly, M. Economic perspectives on the history of the computer time-sharing industry, 1965–1985 / M. Campbell-Kelly, D. D. Garcia-Swartz // IEEE Annals of the History of Computing. – 2008. – Vol. 30, no. 1. – P. 16–36.
32. Grochow, J. M. Utility functions for time-sharing system performance evaluation / J. M. Grochow // IEEE Computer. – 1972. – Vol. 5, no. 5. – P. 16–19.
33. Greenberger, M. The computers of tomorrow / M. Greenberger // Atlantic Monthly. – 1964. – Vol. 213, no. 5. – P. 63–67.
34. Parkhill, D. F. The Challenge of the computer utility / D. F. Parkhill. – Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1966. – 208 p.
35. Phister, M. Jr. Data processing: technology and economics / M. Jr. Phister. – 2nd ed. – Digital Press and Santa Monica Publishing Co., 1979. – 720 p.
36. Белоногов, Г. Г. Автоматизированные информационные системы / Г. Г. Белоногов, В. И. Богатырев; под ред. К. В. Тараканова. – М.: Сов. радио, 1973. – 326 с.
37. Nemani, R. The journey from computer time-sharing to cloud computing: a literature review // International Journal of Computer Science & Engineering Technology. – 2011. – Vol. 1, no. 6. – P. 267–273.
38. Campbell-Kelly, M. From mainframes to smartphones. A history of the international computer industry / M. Campbell-Kelly, D. D. Garcia-Swartz. – Cambridge: Harvard University Press, 2015. – 248 p.
39. Информационное общество: тенденции развития: аналитический обзор / Г. И. Абдархманова и др. – М.: Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2012. – 104 с.

40. Норенков, И. П. Информационные технологии в образовании / И. П. Норенков, А. М. Зимин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 352 с.
41. Шваб, К. Четвертая промышленная революция: пер. с англ. / К. Шваб – М.: Эксмо, 2019. – 209 с.
42. Паспорт приоритетного проекта «Современная цифровая образовательная среда в Российской Федерации» 2016–2021 (утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам 25 октября 2016 г., протокол № 9).
43. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 июня 2017 г. № 1632-р).
44. Smart home will drive Internet of Things to 50 billion devices, says Strategy Analytics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.strategyanalytics.com/strategy-analytics/news/strategy-analytics-press-releases/2017/10/26/smart-home-will-drive-internet-of-things-to-50-billion-devices-says-strategy-analytics>.
45. Meeker, M. Internet trends 2018 [Электронный ресурс] / M. Meeker. – Режим доступа: https://www.kleinerperkins.com/files/INTERNET_TRENDS_REPORT_2018.pdf.
46. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.pdf>
47. State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>.
48. Судов, Е. В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России / Е. В. Судов, А. И. Левин. – М.: НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2002. – 28 с.
49. Forbus, K. Intelligent computer-aided engineering / K. Forbus // Journal AI Magazine. – 1988. – Vol. 9, no. 3. – P. 23–36.
50. Stephanopoulos, G. Intelligent systems in process engineering: a review / G. Stephanopoulos, C. Han / Computers and Chemical Engineering. – 1996. – Vol. 20, no. 6–7, P. 743–791.
51. Sheer, A. W. ARIS – Business Process Modeling / A. W. Scheer. – 3rd ed. – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 218 p.

52. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
53. Hayes, B. Cloud computing / B. Hayes // Communications of the ACM. – 2008. – Vol. 51, no. 7. – P. 9–11.
54. Ma, S. A Review on cloud computing development / S. Ma // Journal of networks. – 2012. – Vol. 7, no. 2. – P. 305–310.
55. Медведев, А. А. Облачные технологии: тенденции развития, примеры исполнения / А. А. Медведев // Современные технологии автоматизации. – 2013. – № 2. – С. 6–9.
56. Облачные технологии и образование / З. С. Сейдаметова и др.; под общ. ред. З. С. Сейдаметовой. – Симферополь: Диайпи, 2012. – 204 с.
57. Mell, P. The NIST definition of cloud computing. NIST SP 800-145 / P. Mell, T. Grance. – Gaithersburg: National Institute of Standards & Technology, 2011. – 7 p.
58. Паус, А. С. Тенденции развития облачных технологий на российском рынке / А. С. Паус, О. А. Целовальникова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2014. – № 17. – С. 486–492.
59. Krebs, R. Architectural concerns in multi-tenant SaaS applications / R. Krebs, C. Momm, S. Kounev // CLOSER 2012. Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing and Services Science. – Porto, 2012. – P. 426–431.
60. Durairaj, M. A study on virtualization techniques and challenges in cloud computing / M. Durairaj, P. Kannan // International journal of scientific & technology research. – 2014. – Vol. 3, no. 11. – P. 147–151.
61. Каган, Б. М. Электронные вычислительные машины и системы / Б. М. Каган. – 3-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 592 с.
62. Загорский, В. П. Информационно-измерительные системы коллективного пользования / В. П. Загорский, И. С. Пугачев, А. Г. Ярусов. – Минск: Наука и техника, 1987. – 104 с.
63. Шишов, Ю. А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов / Ю. А. Шишов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.
64. Нечаев, Е. Е. Ретроспективный обзор создания и развития наземных радиолокационных станций целеуказания в России (часть 2) / Е. Е. Нечаев, Ю. П. Большаков // Научный вестник МГТУ ГА. – 2007. – № 117. – С. 117–136.

65. Chorman, P. COBRA DANE space surveillance capabilities // 2000 Space Control Conference (April 11-13, 2000) / Massachusetts Institute of Technology – Lexington, 2000. – P. 159–168.
66. Stansbery, E. G. Growth in the number of SSN tracked orbital objects / E. G. Stansbery // 55th International Astronautical Congress, 4–8 Oct, Vancouver, 2004.
67. Постановка задачи оптимизации пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой путем управления длительностью интервала времени между радиоконтактами / А. А. Ковальчук, Ю. Э. Парфенов, А. А. Сосунов, В. Ш. Хисматулин // Системи обробки інформації. – 2004. – Вып. 1. – С. 76–83.
68. Васильев, К. К. Теория электрической связи / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
69. Теория электрической связи / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В. И. Коржик, М. В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
70. Спилкер, Дж. Цифровая спутниковая связь: пер. с англ. / Дж. Спилкер; под ред. В. В. Маркова. – М.: Связь, 1979. – 592 с.
71. Ратынский, М. В. Основы сотовой связи / М. В. Ратынский; под ред. Д. Б. Зимина. – М.: Радио и связь, 1998. – 248 с.
72. Широкополосные беспроводные сети передачи информации // В. М. Вишневский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
73. A finite-source queuing model for the IEEE 802.11 DCF / E. M. M. Winands, T. J. J. Denteneer, J. A. C. Resing, R. Rietman // European Transaction on Telecommunications. – 2005. – Vol. 16. – P. 77–89.
74. Башарин, Г. П. Анализ вероятностно-временных характеристик математической модели передачи восходящего потока трафика в TDMA PON / Г. П. Башарин, Н. В. Русина // Т-Comm. – 2014. – № 8. – С. 4–7.
75. Аганесов, А. В. Модель сети спутниковой связи на основе протокола случайного множественного доступа S-Aloha // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 2. – С. 99–134.
76. Пат. US8723650 США, МПК G06K 7/01. Electronic tag time-sharing control system and method thereof / Tseng et al. – № 2012/0326846 A1; заявл. 22.09.2011; опубл. 13.05.2014.

77. Жаров, А. Н. Многофункциональная система персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М»: состояние и перспективы развития / А. Н. Жаров // Технологии и средства связи. – 2013. – № 6, ч. 2. – С. 72–78.

78. Пат. US3890574 США, МПК H04B 1/32. Time-sharing scanning receiver / Nekano M., Imazeki K. – № 394120; заявл. 04.09.1973; опубл. 17.06.1975.

79. Пат. US5501702 США, МПК A61N 1/36. Time sharing multipolar rheography apparatus and method / Plicchi G, Seccarelli M. – № 277051; заявл. 19.07.1994; опубл. 26.03.1996.

80. Пат. US4100412 США, МПК G01N 21/34. Selective multichannel optical time-shared detector for chromatography / Hausdorff Harry H. – № 737106; заявл. 29.10.1976; опубл. 11.07.1978.

81. Пат. US3811777 США, МПК G01N 21/00, G01J 3/30, G01J 3/48. Time-sharing fluorometer and reflectometer / Chance B. – № 330041; заявл. 06.02.1973; опубл. 21.05.1974.

82. Ляликов, Ю. С. Физико-химические методы анализа / Ю. С. Ляликов. – 5-е изд. – М.: Химия, 1974. – 536 с.

83. Пат. US3963351 США, МПК G01J 03/30, G01J 3/48. Multichanel optical time-sharing apparatus having a rotating filter wheel witch position-encoding means / Chance B. et al. – №567946; заявл. 14.04.1975; опубл. 15.06.1976.

84. Банкет, В. Л. Цифровые методы в спутниковой связи / В. Л. Банкет, В. М. Дорофеев. – М.: Радио и связь, 1998. – 240 с.

85. Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы / Г. Г. Раннев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.

86. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.

87. Белоусов, И. Р. Методы моделирования и дистанционного управления движением роботов: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.01 / Белоусов Игорь Рафаилович. – М., 2003. – 32 с.

88. Евдокимов, Ю. К. Дистанционные автоматизированные учебные лаборатории и технологии дистанционного учебного эксперимента в техническом вузе /

Ю. К. Евдокимов, А. Ю. Кирсанов, А. Ш. Салахова // Открытое образование. – 2009. – №5. – С. 101–116.

89. Кузьмичев, Д. А. Автоматизация экспериментальных исследований / Д. А. Кузьмичев, И. А. Радкевич, А. Д. Смирнов. – М.: Наука. 1983. – 392 с.

90. Рябов, Ю. Ф. Многомашинные системы автоматизации экспериментальных исследований / Ю. Ф. Рябов // Автоматизация экспериментальных исследований. – Горький: ИПФ АН СССР, 1985. – С. 85–99.

91. Основы метрологии и электрические измерения / Б. Я. Авдеев, Е. М. Антонюк, Е. М. Душин и др.; под ред. Е. М. Душина. – 6-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

92. Федотова, Н. Д. Проблемно-ориентированный комплекс длинноволновой ИК- и КР-спектроскопии / Н. Д. Федотова, Б. И. Штейман // Системы коллективного пользования научным оборудованием. – Кишинев: Штиинца, 1986. – С. 17–21.

93. Певчев, Ю. Ф. Автоматизация физического эксперимента / Ю. Ф. Певчев, К. Г. Финогенов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 368 с.

94. Новак, Й. Количественный анализ методом газовой хроматографии: пер. с англ. / Й. Новак. – М.: Мир, 1978. – 180 с.

95. Виноградов, В. И. Информационно-вычислительные системы. Распределенные модульные системы автоматизации / В. И. Виноградов. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 335 с.

96. Красько, А. И. Система коллективного пользования НИИАРа на основе ЭВМ БЭСМ-4М / А. И. Красько, Ю. Ф. Свиридова, Ю. Д. Федоров // Препринт НИИАР-9 (386), 1979. – 15 с.

97. Клопфенштейн, Ч. Е. Применение ЭВМ в химических и биохимических исследованиях. Том 1 / под ред. Ч. Е. Клопфенштейна и Ч. Л. Уилкинса; пер. с англ. под ред. А. Ф. Васильева. – М.: Химия, 1976. – 294 с.

98. Пытьев, Ю. П. Методы анализа и интерпретации эксперимента / Ю. В. Пытьев. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 288 с.

99. Баклашев, Н. И. Натурный эксперимент: информационное обеспечение экспериментальных исследований / Н. И. Баклашов, А. Н. Белонов, Г. М. Солодихин; под ред. Н. И. Баклашева. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.

100. Краус, М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Е. Вошни. – М.: Мир, 1975. – 312 с.
101. Выставкин, А. Н. Процесс научного исследования как объект автоматизации / А. Н. Выставкин // Автоматизация экспериментальных исследований. – Горький: ИПФ АН СССР, 1985. – С. 4–47.
102. Акопов, Г. А. Испытательные комплексы космических аппаратов. Состояние и перспективы / Г. А. Акопов, А. Г. Шехтман, А. Б. Платонов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2001. – Т. 100. – С. 42–53.
103. Автоматизация проектирования устройств измерительной техники / Ю. М. Туз и др. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1988. – 288 с.
104. Кривандина, Н. Многоканальные АЦП с синхронной выборкой фирмы Maxim для промышленных систем сбора и обработки данных // Электронные компоненты. – 2010. – № 2. – С. 47–52.
105. Новоселов, О. Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1991. – 336 с.
106. DAQ M Series. M series user manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/3710221.pdf>.
107. Пат. 2118848 Российская Федерация, МПК G06F 17/40. Система для сбора, преобразования и обработки измерительной информации / Самхарадзе Т. Г. – № 94019459/09; заявл. 09.06.1994; опубл. 10.09.1998.
108. Скрипник, Ю. А. Коммутационные цифровые измерительные приборы / Ю. А. Скрипник. – М.: Энергия, 1973. – 136 с.
109. Chumbley, L. S. A new paradigm – multi-user scanning electron microscopy / L. S. Chumbley, M. Meyer, K. Fredrickson, F. C. Laabs // JOM. – 1995. – vol. 47 (9). – P. 13–17.
110. БАРТm16-БСА (Базовый автоматизированный радиотелескоп многопользовательский на основе 16-ти лучевой диаграммы антенны БСА) (рабочий макет) / В.И. Власов и др. // Препринт ФИАН, 2002. – № 31. – 28 с.
111. Власов, В. И. Прогнозирование геофизических возмущений по наблюдениям межпланетных мерцаний космических радиоисточников / В. И. Власов, И. В. Чашей, П. М. Свидский // Препринт ФИАН, 2009. – № 2. – 29 с.

112. Пат. US7467187 США, МПК G06F 15/16. Control and observation of physical devices by multiple users over computer network / Hesselink L. et al. – №2003/0051006; заявл. 09.10.2002; опубл. 16.12.2008.

113. Заявка на изобретение US20050021712, США МПК G06F 15/173. Multi-user, multi-device remote access system / Chassapis C. et al. – №2005/0051006; заявл. 23.01.2004; опубл. 27.01.2005.

114. Fujii, N. Multi-user/Multi-test-bed remote hardware laboratory with job management system / N. Fujii, N. Koike // International Conference on Microelectronic Systems Education (San Diego, June 3–4 2007) / San Diego, 2007. – P. 39–40.

115. Баран, Е. Д. Web-лаборатория «Микроконтроллеры и сигнальные процессоры» / Е. Д. Баран, П. Ю. Захаров, А. Ю. Любенко // Современные технологии автоматизации. – 2005. – № 1. – С. 64–68.

116. Fujii, N. Work in progress-a new time-sharing remote laboratory e-learning system for hardware design and experiment of digital circuits / N. Fujii, N. Koike // Proc. 35th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference (October 19–22, 2005) / Indianapolis, 2005. – P. F3J-11–F35-12.

117. Esche, S. K. An architecture for multi-user remote laboratories / S. K. Esche, C. Chassapis, J. W. Nazalewicz, D. J. Hromin // World Transaction on Engineering and Technology Education. – 2003. – Vol. 2, no.1. – P. 7–11.

118. Экспериментальный лабораторный стенд с удалённым доступом / А. С. Крылова и др. // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. – 2006. – Вып. 40. – С. 191–194.

119. Kutlu, A. MicroLab: a Web-based multi-user remote microcontroller laboratory for engineering education / A. Kutlu // Inter. J. of Engng. Educ. – 2004. – Vol. 20, no. 5. – P. 879–885.

120. Жуков В. Г. Лабораторный практикум по изучению радиопеленгатора, с использованием виртуальной среды разработки LabVIEW 7.1 / В. Г. Жуков // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии *National Instruments*: V Международная науч.-практ. конференция. – М.: Изд-во РУДН, 2006.

121. Исследование параметров и характеристик полупроводниковых приборов с применением интернет-технологий / А. С. Глинченко, Н. М. Егоров, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 352 с.

122. Кирсанов, А. Ю. Автоматизированный дистанционный лабораторный практикум по курсу «Электроника» на платформе NI ELVIS II / А. Ю. Кирсанов, А. Ш. Салахова, Д. В. Шахтурин // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сборник трудов X Международной научно-практической конференции / РУДН. – Москва, 2011. – С. 337–339.

123. Сетевой учебно-исследовательский центр коллективного пользования уникальным лабораторным оборудованием на базе веб-портала как элемент системы дистанционного образования / А. С. Глинченко, М. Л. Дектерев, В. А. Комаров и др. // Открытое образование. – 2009. – № 5. – С. 18–29.

124. Кондратов, В. Т. Определения и базовая классификация измерительных систем / В. Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 3. – С. 85–100.

125. РМГ 29–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014.

126. ГОСТ Р 8.596–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2008.

127. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок; пер. с англ. под ред. Б. С. Цибакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.

128. Кипрушкин, С. А. Дистанционный лабораторный практикум на базе распределенной информационно-измерительной и управляющей системы / С. А. Кипрушкин, С. Ю. Курсков // Информационные технологии моделирования и управления. – 2006. – № 2(27). – С. 163–168.

129. Ковалев, С. П. Применение онтологий при разработке распределенных автоматизированных информационно-измерительных систем / С. П. Ковалев // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 41–49.

130. Загвоздкин, М. В. Вопросы реализации дистанционного управления радиотехническими устройствами при многопользовательском режиме доступа / М. В. Загвоздкин, Д. В. Филиппов // Радиотехника. – 2012. – № 6. – С. 87–90.

131. Учебный и научный эксперимент в сети Интернет / И. Б. Федоров и др. // Труды XIII Всерос. науч.-методич. конф. «Телематика 2006». – СПб., 2006. – Т. 1. – С. 74–76.
132. ГОСТ 15971–90. Системы обработки информации. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1991.
133. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. / П. П. Орнатский. – 2-е изд. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 455 с.
134. ГОСТ 19781-90. Обеспечение систем обработки информации программное. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2010.
135. Бурдонов, И.Б. Операционные системы реального времени / И. Б. Бурдонов, А.С. Косачев, В. Н. Пономаренко // Препринты Института системного программирования РАН, 2006. – Препринт 14. – 98 с.
136. Олифер, В. Г. Сетевые операционные системы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб.: Питер, 2002. – 544 с.
137. Fjeldly, T. A. Lab on the web. Running real electronic experiment via the Internet / Eds. T. A. Fjeldly, M. S. Shur. – New York: John Willey & Sons, Inc., 2003.
138. Опыт проектирования и эксплуатации учебной многопользовательской системы на базе открытого ПО / В. Л. Бурцев и др. // Открытое образование. – 2011. – № 5. – С. 60–69.
139. Virtual instrument systems in reality (VISIR) for remote wiring and measurement of electronic circuits on breadboard / M. Tawfik et al. // IEEE Transactions on Learning Technologies. – 2013. – Vol. 6, no. 1. – P. 60–72.
140. Scalable multiuser remote laboratories provide on-demand hands-on laboratory experience / C. M. Markan et al. // 2012 IEEE Conference on Technology and Society in Asia (T&SA). – Singapore, 2012. – P. 1–7.
141. Experiment lab server architecture: a web services approach to supporting interactive LabVIEW-based remote experiments under MIT's iLab shared architecture / Mendes, L. A. et al. // 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). – Madrid, 2016. – P. 293–305.

142. Markan, C. M. Remote laboratories - a cloud based model for teleoperation of real laboratories / C. M. Markan, S. Gupta, S. Mittal, G. Kumar // *International Journal of Online Engineering*. – 2013. – Vol. 9, no. 2. – P. 36–43.

143. Баран, Е. Д. Лабораторный практикум для дистанционного обучения общетехническим дисциплинам / Е. Д. Баран, А. Ю. Любенко // *Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments*: сб. тр. Междунар. научн.-практич. конф. 15 ноября 2004 г. – М.: РУДН, 2004.

144. Система дистанционного управления стендом для проведения лабораторных работ по изучению движения тела, подвешенного на струне / Д. С. Иванов, Д. Ю. Нуждин, М. Ю. Овчинников, С. С. Ткачев // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*, 2012. – № 59. – 32 с.

145. Евдокимов, Ю. К. Экспериментальное исследование и статистическая модель системы дистанционного управления / Ю. К. Евдокимов, А. Ю. Кирсанов // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. – 2006. – № 3. – С. 31–36.

146. Aziz, E-S. A scalable platform for remote and virtual laboratories / E-S. Aziz, S. K. Esche, C. Chassapis // *World Transactions on Engineering and Technology Education*. – 2006. – Vol. 5, no. 3. – P. 445–448.

147. Limpraptono, F. Y. New architecture of remote laboratories multiuser based on embedded web server / F. Y. Limpraptono, A. A. P. Ratna, H. Sudibyo // *International Journal of Online Engineering*. – 2013. – Vol. 9, no. 6. – P. 4–11.

148. Перегудов, Ф. И. Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.

149. Горохов, В. Г. Методологический анализ системотехники / В. Г. Горохов. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.

150. Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок; пер. с англ. под ред. В. И. Нейман. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

151. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – 3-е изд. – М.: КомКнига, 2005. – 400 с.

152. Комаров, В. А. Метод квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи / В. А. Комаров, С. О. Паздерин, А. В. Сарафанов // *Измерительная техника*. – 2016. – № 1. – С. 8–11.

153. Komarov, V. A. Method for qualification testing of satellite-communication earth stations / V. A. Komarov, S. O. Pazderin, A. V. Sarafanov // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 59, no. 1. – P. 8–11.
154. Саати, Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложение / Т. Л. Саати. – М.: Сов радио, 1965. – 510 с.
155. Джейсуол, Н. Очереди с приоритетами / Н. Джейсуол. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
156. Хинчин, А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания / А. Я. Хинчин. – М.: Физматгиз, 1963. – 236 с.
157. Юрин, П. В. Системная реализация дистанционного лабораторного практикума / П. В. Юрин // *Прикладная информатика*. – 2007. – № 3. – С. 38–47.
158. Евдокимов, Ю. К. Моделирование динамики системы дистанционного управления автоматизированной учебной лабораторией / Ю. К. Евдокимов, А. Ю. Кирсанов // *Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments» (15 ноября, 2004)*. – Москва, 2004. – С. 51–57.
159. Информатизация инженерного образования: электронные образовательные ресурсы МЭИ / Ю. В. Арбузов и др. – Вып. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 314 с.
160. Сарафанов, А. В. Разработка математической модели многопользовательского режима функционирования аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом / А. В. Сарафанов, В. А. Комаров // *Информационные технологии*. – 2009. – № 3. – С. 67–74.
161. Allen, A. O. Probability, statistics, and queueing theory with computer science applications / A. O. Allen. – 2nd ed. – New York: Academic Press, 1990. – 740 p.
162. Takagi, H. Queueing analysis. A foundation of performance evaluation. Volume II. Finite Systems / H. Takagi. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1993. – 560 p.
163. Stecke, K. E. Review of operator/machine interference models / K. E. Stecke, J. E. Aronson // *International Journal of Production Research*. – 1985. – no. 23. – P. 129–151.
164. Haque, L. A survey of the machine interference problem / L. Haque, M. J. Armstrong // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – vol. 179, no. 2. – P. 469–482.

165. A survey on in machining system: progress from 2010 to 2017 / C. Shekhar, A. A. Raina, A. Kumar, J. Iqbal // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2017. – Vol. 27, no. 4. – P. 391–413.
166. Вероятностные методы в вычислительной технике / А. В. Крайников и др. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.
167. Sztrik, J. Basic queueing theory: Foundation of system performance modeling / J. Sztrik. – Saarbrücken: GlobeEdit, 2016. – 200 p.
168. Denning, P. J. The operational analysis of queueing network models / P. J. Denning, J. P. Buzen // ACM Computing Surveys. – 1978. – Vol. 10, no. 3. – P. 225–261.
169. Тихомиров, О. К. Временные характеристики решения задач в условиях диалога человека с ЭВМ / О. А. Тихомиров, Войскунский А. Е. // Вопросы психологии. – 1980. – №6. – С. 155–161.
170. Бабаева, Ю. Д. Теоретико-экспериментальное исследование ритма коммуникации в системах «человек-ЭВМ» / Ю. Д. Бабаева, Р. Г. Белавша, А. Е. Войскунский // Человеко-машинные системы: сб. – М., 1977. – С. 130–135.
171. Miller, R. B. Response time in man-computer conversational transactions / R. B. Miller // Fall Joint Computer Conf. AFIPS Conf. Proc. – 1968. – Vol. 33, pt. 1. – P. 267–277.
172. Miller, L. A. Behavioral issues in the use of interactive systems / L. A. Miller, J. C. Thomas Jr. // International Journal of Man-Machine Studies – 1977. – Vol. 9, no. 5. – P. 509–536.
173. Sackman, H. Computers, system science and evolving society. The challenge of man-machine digital systems / H. Sackman. – New York: John Wiley and Sons, 1967. – 638 p.
174. Streeter, D. N. Productivity of computer-dependent workers / D. N. Streeter // IBM Systems Journal. – 1975. – Vol. 14, no. 3. – P. 292–305.
175. Carbonell, J. R. On the psychological importance of time in a time sharing system / J. R. Carbonell, J. I. Elkind, R. S. Nickerson // Human Factors. – 1968. – Vol. 10, no. 2. – P. 135–142.
176. Nickerson, R. S. Human factors and the design of time sharing computer systems / R. S. Nickerson, J. I. Elkind, J. R. Carbonell // Human Factors. – 1968. – Vol. 10, no. 2. – P. 127–134.

177. Grossberg, M. An experiment on problem solving with delayed computer responses / M. Grossberg, R. A. Wiesen, D. R. Interna // IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics. – 1976. – Vol. 6, no. 3. – P. 219–222.
178. Morfield, M. A. Initial experiments on the effects of system delay on on-line problem-solving / M. A. Morfield, R. A. Wiesen, M. Grossberg, D. Yntema. – Lexington, Mass. Inst. of Technol., June 1969. – 61 p.
179. Boehm, B. W. Interactive problem-solving – an-experimental study of "lockout" effects / B. W. Boehm, M. J. Seven, R. A. Watson // AFIPS'71. – New York, 1971. – P. 205–210.
180. Коутс, Р. Интерфейс «человек-компьютер»: пер. с англ. / Р. Коутс, И. Влейминк. – М.: Мир, 1990. – 501 с.
181. Советов, Б. Я. Моделирование систем / Б. Я Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
182. Кристалинский, Р. Е. Преобразования Фурье и Лапласа в системах компьютерной математики / Р. Е. Кристалинский, В. Р. Кристалинский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 216 с.
183. Суранов, А. Я. LabVIEW 8.20: Справочник по функциям / А. Я. Суранов. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
184. Дьяконов, В. П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 800 с.
185. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М.: ДМК-Пресс, 2004. – 320 с.
186. Карпов, Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
187. Лоу, А. М. Имитационное моделирование / А. М. Лоу, В. Д. Кельтон. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 846 с.
188. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Н. А. Кузнецов, В. В. Кульба, С. С. Ковалевский, С. А. Косяченко – М.: Физматлит, 2002. – 800 с.
189. Приборно-модульные универсальные автоматизированные измерительные системы / В. А. Кузнецов и др.; под ред. В. А. Кузнецова. – М.: Радио и связь, 1993. – 304 с.

190. Новый подход к инженерному образованию: теория и практика открытого доступа к распределенным информационным и техническим ресурсам / Ю. В. Арбузов и др. – М.: Центр-Пресс, 2000. – 238 с.
191. Яшков, С. Ф. Математические модели систем с разделением времени: дис. ... д-ра физ.-мат. наук в форме научного доклада: 05.13.17 / Яшков Сергей Федорович. – М., 2002. – 85 с.
192. Бронштейн, О. И. Модели приоритетного обслуживания в информационно-вычислительных системах / О. И. Бронштейн, И. М. Духовный. – М.: Наука, 1976. – 220 с.
193. Башарин, Г. П. Анализ очередей в вычислительных сетях / Г. П. Башарин, П. П. Бочаров, Я. А. Коган. – М.: Наука, 1989. – 336 с.
194. Sztrik, J. Simulation of the machine interference in randomly changing environments / J. Sztrik, O. Moller // Yugoslav Journal of Operations Research. – 2002. – Vol. 12, no. 2. – P. 237–246.
195. Чисар, И. Теория информации: теоремы кодирования для дискретных систем без памяти: пер. с англ. / И. Чисар, Я. Кернер. – М.: Мир, 1985. – 400 с.
196. Коган, Я. А. Модель системы с разделением времени, работающей в переменном режиме / Я. А. Коган, В. Г. Литвин // Автоматика и телемеханика. – 1978. – вып.10. – С. 184–191.
197. Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems: a two-phase approach / J.-M. Park et al. // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2005. – Vol. 54, no. 1. – P. 177–190.
198. Бубнов, В. П. Модели и методы исследования характеристик нестационарных процессов в системах массового обслуживания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18 / Бубнов Владимир Петрович. – СПб., 2012. – 32 с.
199. Зорин, А. В. Оптимальное управление немарковскими потоками в системах с разделением времени: автореферат дис. ... канд. физ. мат. наук: 05.13.05 / Зорин Андрей Владимирович. – Н. Новгород, 2005. – 24 с.
200. Яшков, С. Ф. Анализ очередей в ЭВМ / С. Ф. Яшков. – М.: Радио и связь, 1989. – 216 с.
201. Kleinrock, L. On optimal scheduling algorithms for time-shared systems / L. Kleinrock, A. Nilsson // Journal of the Association for Computing Machinery. – 1981. – Vol. 28, no. 3. – P. 477–486.

202. Симонян, Э. А. Закон сохранения в модели коллективного пользования / Э. А. Симонян // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2003. – Т. LVI, № 3. – С. 486–489.

203. Максимов, А. В. Многопользовательские информационные системы: основы теории и методы исследования / А. В. Максимов, Н. М. Оскорбин. – 2-е изд. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. – 264 с.

204. Казаков, И. Е. Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М.: Физматлит, 1993. – 272 с.

205. Конвей, Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

206. Дудченко, И. П. Автоматизированные электротехнические комплексы с элементами управления и контроля удаленного доступа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Дудченко Илья Павлович. – Комсомольск-на-Амуре. – 2006. – 24 с.

207. Крылов, С. М. Многофункциональные дистанционные лаборатории для проведения реальных лабораторных работ и экспериментов / С. М. Крылов, В. Н. Толчев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 85–91.

208. Кирсанов, А. Ю. Экспериментальное исследование статистической динамики системы дистанционного управления экспериментом в многопользовательском режиме / А. Ю. Кирсанов, А. Ш. Салахова // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7, № 5, вып. 2. – С. 87–91.

209. Кирсанов А. Ю. Дистанционный эксперимент на основе совмещения телекоммуникационных и измерительно-управляющих систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Кирсанов Александр Юрьевич. – Казань, 2007. – 186 с.

210. Салахова, А. Ш. Статистические закономерности временных задержек и оценка быстродействия удаленного эксперимента в совмещенных телекоммуникационных и измерительно-управляющих системах в многопользовательских системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Салахова Альфия Шаукатовна. – Уфа, 2013. – 16 с.

211. Li, Y. A Scheduling system for shared online laboratory resources / Y. Li, S. K. Esche, C. Chassapis // 38th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, October 22–25, 2008. – New York, 2008 – P. T2B-1–T2B-6.

212. Hey, T. Cyber infrastructure for e-Science / T. Hey, A.E. Trefethen // Science. – 2005. – no. 308. – P. 817–821.
213. Подлесный, С. А. Электронное обучение и обеспечение его качества / С. А. Подлесный // Инженерное образование. – 2013. – № 12. – С. 104–111.
214. Грушвицкий, Р. И. Аналого-цифровые периферийные устройства микропроцессорных систем / Р. И. Грушвицкий, А. Х. Мурсаев, В. Б. Смолов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
215. Артемова, С. В. Методология построения интеллектуальных информационно-управляющих систем тепло-технологическими аппаратами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.16 / Артемова Светлана Валерьевна. – Тамбов, 2014. – 35 с.
216. Федеральная целевая программа развития образования на 2016–2020 годы (утверждена постановлением Правительства РФ от 23 мая 2015 г. №497).
217. Федеральный закон № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» (Принят Государственной думой РФ 29 декабря 2012 г.).
218. Чумаченко, А. Ю. Разработка автоматизированного лабораторного комплекса обучению энергосберегающим технологиям / А. Ю. Чумаченко, Е. А. Сыропятов, С. В. Федорова // Новые информационные технологии в образовании. Материалы международной научно-практической конференции. Ч. 2. / РГППУ. – Екатеринбург, 2011. – С. 118–122.
219. Мазурицкий, М. И. Интерактивные сетевые научно-образовательные ресурсы для естественно-научного образования / М. И. Мазурицкий, А. В. Солдатов // Высшее образование в России. – 2014. – № 1. – С. 80–87.
220. Липай, Б. Р. Интернет-лаборатория «Основы электротехники и электроники» как пример современного учебного комплекса с удалённым доступом для открытого инженерного образования / Б. Р. Липай, С. И. Маслов // Вестник Московского энергетического института. – 2017. – № 2. – С. 71–76.
221. Отраслевой стандарт 9.2–98. Система разработки и постановки продукции на производство. Учебная техника для образовательных учреждений. Системы автоматизированного лабораторного практикума. Основные положения. – М.: Росстандарт, 1998.

222. Cyber-physical laboratories in engineering and science education / Eds. M. E. Auer, A. K. M. Azad, A. Edwards, T. De Jong. – Springer International Publishing, 2018. – 434 p.
223. Рачков, М. Ю. Физические основы измерений / М. Ю. Рачков, М. П. Гришин. – М.: МГИУ, 2007. – 160 с.
224. Koike, N. Cyber laboratory for hardware logic experiments: A seamless integration of actual laboratory and remote laboratory / N. Koike // International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET), June 2012. – P. 21–23.
225. McCracken, S. Real laboratories for distance education / S. McCracken, Z. Zilic, H. Y. H. Chan // Journal of Computing and Information Technology. – 2003. – Vol. 11, no. 1. – P. 67–76.
226. Системы коллективного пользования научным оборудованием: сб. науч. статей / отв. ред. З.И. Зеликовский. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 148 с.
227. Wei-Feng, Y. Realization of distributed remote laboratory and remote debug software for embedded system / Y. Wei-Feng, R. Sun, Z. Wan // WSEAS transaction on systems. – 2008. – Vol. 7, no. 12. – P. 1433–1442.
228. Комаров, В. А. Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов / В. А. Комаров, А. В. Пичкалев // Интеллект и наука: труды XI Междунар. научн.-практ. конф. г. Железногорск, 28–29 апреля 2011 г. – Красноярск: Центр информации, 2011. – С. 146–148.
229. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. № 2227-р).
230. Стратегия развития отрасли информационных технологий на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 1 ноября 2013 г. № 2036-р).
231. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технологического развития комплекса России на 2014–2020 годы» (утверждена постановлением Правительства РФ от 21 мая 2013 г. № 426).

232. Государственная программа Российской Федерации "Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности" (утверждена постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г №328).

233. Интеллектуальные системы принятия проектных решений / А. В. Алексеев и др. – Рига: Зинатне, 1997. – 320 с.

234. ГОСТ 34.003–90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2009.

235. Проектирование внешних средств автоматизированного контроля радиоэлектронного оборудования / Н. Н. Пономарев и др.; под ред. Н. Н. Пономарева. – М.: Радио и связь, 1984. – 296 с.

236. Акимов, С. В. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза / С. В. Акимов // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24), ч. 2. – С. 202–211.

237. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2009.

238. Куратовский, К. Теория множеств / К. Куратовский, А. Мостовский. – М.: Мир, 1970, – 416 с.

239. Месарович, М. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахага; пер. с англ. Э. Л. Наппельбаума; под ред. В. С. Емельянова. – М.: Мир, 1978. – 312 с.

240. Алиев, Т. М. Измерительная техника / Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

241. Зедгинидзе, Г. П. Математические методы в измерительной технике / Г.П. Зедгинидзе, Р. Ш. Гогсадзе. – М.: Изд-во Стандартов, 1970. – 615 с.

242. Юрагов, Е. А. Программное обеспечение измерительных процессов. Часть 2. Программирование плат сбора данных и разработка измерительных приложений / Е. А. Юрагов. – М.: МГОУ, 2012. – 211 с.

243. Пронин, Е. Г. Проектирование бортовых систем обмена информации / Е. Г. Пронин, О. В. Могуева. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.

244. Боглаев, Ю. П. Вычислительная математика и программирование / Ю. П. Боглаев. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.

245. Андриянов, А. В. Цифровая обработка информации в измерительных приборах и системах / А. В. Андриянов, И. И. Шпак. – Минск: Высшая школа, 1987. – 176 с.
246. Таненбаум, Э. Современные операционные системы / Э. Таненбаум, Х. Бос. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2015. – 1120 с.
247. Лаврищева, Е. М. Software Engineering компьютерных систем. Парадигмы, технологии и CASE-средства программирования / Е. М. Лаврищева. – Киев: Наук. думка, 2013. – 283 с.
248. Бей, И. Взаимодействие разноразличных программ. Руководство программиста: пер. с англ. / И. Бей. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 880 с.
249. Глинченко, А. С. Особенности алгоритмов измерения компьютерных измерительных систем с удаленным доступом / А. С. Глинченко, В. А. Комаров // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов / ред. А. И. Громыко, А. В. Сарафанов. – М.: Радио и связь, 2006. – С. 329–332.
250. Кофанов, Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств / Ю. Н. Кофанов. – М.: Радио и связь, 1991. – 360 с.
251. Кофанов, Ю. Н. Автоматизация проектирования печатных плат / Ю. Н. Кофанов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 2001. – 220 с.
252. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О. В. Алексеев и др.; под ред. О. В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
253. Фудзисава, Т. Математика для радиоинженеров: теория дискретных структур: пер. с япон. / Т. Фудзисава, Т. Касами. – М.: Радио и связь, 1984. – 240 с.
254. ГОСТ Р 57412–2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. – М.: Стандартинформ, 2017.
255. Комаров, В. А. Повышение эффективности эксплуатации многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов // Вестник Воронежского ГТУ. – 2008. – №10. – С. 186–189.
256. Краус, М. Сбор данных в управляющих вычислительных системах: пер. с нем. / М. Краус, Э. Кучбах, О.-Г. Вошни. – М.: Мир, 1987. – 294 с.

257. Глазунов, Л. П. Проектирование технических систем диагностирования / Л. П. Глазунов, А. Н. Смирнов. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.
258. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
259. Колмогоров, А. Н. Введение в математическую логику / А. Н. Колмогоров, А. Г. Драгалин. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. – 120 с.
260. Ежов, И. И. Элементы комбинаторики: перев. с укр. / И. И. Ежов, А. В. Скороход, М. И. Ядренко. – М.: Наука, 1977. – 80 с.
261. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация / Я. М. Радкевич, А. Г. Схртладзе, Б. И. Лактионов. – М.: Высшая школа, 2004. – 767 с.
262. Фишер-Криппс, А. С. Интерфейсы измерительных систем. Справочное руководство / А. С. Фишер-Криппс. – М.: Издательский дом «Технологии», 2006. – 336 с.
263. Кондратов, В. Т. Классификация интерфейсов измерительных систем и приборов / В. Т. Кондратов, Ю. Т. Кондратов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 4. – С. 85–97.
264. Трэвис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Трэвис, Дж. Кринг. – 4-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
265. Официальный сайт компании National Instruments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com>.
266. Официальный сайт компании Keysight Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com>.
267. Официальный сайт компании ADLINK Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adlinktech.com>.
268. Официальный сайт компании Актаком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aktakom.ru>.
269. Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования / И. П. Норенков. – 4-е изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.
270. Глинченко, А. С. Компьютерные спектральные измерения и их приложения / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 9. – С. 25–29.
271. Евдокимов, Ю. К. LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде

LabVIEW / Ю. К. Евдокимов, В. Р. Линдваль, Г. И. Щербаков. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

272. Комаров, В. А. Синтез многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Комаров Владимир Александрович. – Красноярск, 2009. – 197 с.

273. Ёхин, М. Н. Организация многопользовательского удаленного доступа к распределенной гетерогенной системе лабораторного оборудования на основе схем программируемой логики для дистанционных практикумов по цифровой схемотехнике / М. Н. Ёхин, М. М. Степанов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 4. – С. 65–81.

274. Татур, Т. А. Основы теории электрических цепей / Т. А. Татур. – М.: Высшая школа, 1980. – 271 с.

275. Дистанционные учебные лаборатории на аппаратной платформе NI / Ю. К. Евдокимов, А. Ю. Кирсанов, А. Ш. Салахова, М. В. Петровская // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012: сборник трудов XI международной научно-практической конференции. Москва, 6–7 декабря 2012 г. – М.: ДМК-пресс, 2012. – С. 232–236.

276. Советов, Б. Я. Представление знаний в информационных системах / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский, В. Д. Чертовский. – 2-е изд. – М: Академия, 2012. – 144 с.

277. Авдеев, В. А. Периферийные устройства: интерфейсы, схемотехника, программирование / В. А. Авдеев. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 848 с.

278. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета, справочный материал) / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.

279. Жуков, К. Г. Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW / К. Г. Жуков. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 688 с.

280. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

281. Сабунин, А. Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств / А. Е. Сабунин. – М.: Солон-пресс, 2009. – 432 с.

282. Кеон, Дж. OrCAD PSpice. Анализ электрических цепей / Дж. Кеон. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 640 с.
283. Смирнов, А. Б. Компьютерное моделирование работы двухкоординатного столика с пьезоэлектрическими актюаторами / А. Б. Смирнов, Ф. Зиеп Хоанг, М. Н. Полищук // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 1 (238). – С. 172–182.
284. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М.: Издательский дом «Додека – XXI», 2005. – 528 с.
285. Соммервилл, И. Инженерия программного обеспечения: пер. с англ. / И. Соммервилл – 6-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 624 с.
286. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Схемотехника аналоговых электронных устройств» / А. С. Глинченко и др. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде *LabVIEW* и технологии *National Instruments*: сборник трудов VII науч.-практ. конф. – М.: РУДН, 2008. – С. 494–496.
287. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2008614927 Российская Федерация. Комплекс универсальных компьютерных измерительных приборов / Комаров В. А., Глинченко А. С. – № 2008613852; заявл. 20.08.2008; опубл. 13.10.2008.
288. Глинченко, А. С. Компьютерные спектральные измерения параметров сигналов: монография / А. С. Глинченко, В. А. Комаров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2010. – 176 с.
289. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2008610375 Российская Федерация. Программное обеспечение аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Электроника» / Комаров В. А., Глинченко А. С. – №2007614615; заявл. 21.11.2007; опубл. 18.01.2008.
290. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – 12-е изд. – М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
291. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М.: Наука, 1988. – 448 с.
292. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1998. – 239 с.

293. Петрович, М. Л. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ / М. Л. Петрович, М. И. Давидович. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 191 с.
294. Пугачев, В. С. Теория вероятностей и математическая статистика / В. С. Пугачев. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.
295. Вишневский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем / В. М. Вишневский. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
296. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
297. Шахтурин, Д. В. Фрактальный подход к оценке статистической динамики времени задержек сообщений и ее связи с топологией больших телекоммуникационных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Шахтурин Денис Владимирович. – Казань, 2013. – 18 с.
298. Бахарева, Н. Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания. Исследование компьютерных сетей / Н. Ф. Бахарева, В. Н. Тарасов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2011. – 327 с.
299. Тихвинский, В. О. Перспективы сетей 5G и требования к качеству их обслуживания / В. О. Тихвинский, Г. С. Бочечка // Электросвязь. – 2014. – № 11. – С. 40–43.
300. 5G в России. Перспективы, подходы к развитию стандарта и сетей. Обзор исследования. Май 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pwc.ru/ru/assets/5g-research-short-vers.pdf>.
301. Haryono. Analysis of the machine repair problem: a diffusion process approach / Haryono, B. D. Sivazlian // Mathematics and Computers in Simulation. – 1985. – Vol. 27. – P. 339–364.
302. Wang, K-H. Comparative analysis for the G/G/R machine repair problem / K-H. Wang, B. D. Sivazlian // Computers and Industrial Engineerings. – 1990. – Vol. 18, no. 4. – P. 511–520.
303. Sztrik, J. Finite-source queueing systems and their applications: a bibliography [Электронный ресурс] / J. Sztrik. – Режим доступа: <https://irh.inf.unideb.hu/~jsztrik/research/fsqreview.pdf>.
304. Carmichael, D. G. On the equivalence of the $(E_n/M/c)$ and $(M/M/c)$ finite source queues / D. G. Carmichael // Civil Engineering Systems. – 1987. – Vol. 4. – P. 87–93.

305. Bunday, B. D. The G/M/r machine interference model / B. D. Bunday, R. E. Scraton // *European Journal of Operational Research*. – 1980. – Vol. 4. – P. 399–402.
306. Sztrik, J. On the finite-source $\vec{G}/M/r$ queue / J. Sztrik // *European Journal of Operational Research*. – 1985. – Vol. 20. – P. 261–268.
307. Gupta, U. C. A recursive method to compute the steady state probabilities of machine interference model: M/G/1/K / U. C. Gupta, T. T. S. Srinivasa Rao // *Computers and Operations Research*. – 1994. – Vol. 21, no.6. – P. 597–605.
308. Tehranipour, A. The generalized M/G/C//N-queue as a model for time-sharing systems / A. Tehranipour, L. Lipsky // *Proceedings of the 1990 Symposium on Applied Computing*. – Fayetteville, 1990. – P. 355–362.
309. Cooper, R. B. *Introduction to queueing theory* / R. B. Cooper. – 2nd ed. – New York: Elsevier North Holland, 1981. – 347 pp.
310. Кудрявцев, Е. М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах / Е. М. Кудрявцев. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с.
311. Reiser, M. Mean value analysis of closed multi-chain queueing networks / M. Reiser, S. S. Lavenberg // *Journal of the ACM*. – 1980. – Vol. 27, no. 2. – P. 313–322.
312. *Quantitative system performance – computer system analysis using queueing network models* / E. D. Lazowska, J. Zahorjan, G. S. Graham, K. C. Sevcik. – New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1984. – 417 p.
313. Chandra, M. J. A study of multiple finite-source queueing models / M. J. Chandra // *Operational Research Society*. – 1986, – vol. 37, no. 3. – P. 275–283.
314. Основы теории вычислительных систем / С. А. Майоров и др.; под ред. С. А. Майорова. – М.: Высшая школа, 1978. – 408 с.
315. Wang, H. Experiments with improved approximate mean value analysis algorithms / H. Wang, K. C. Sevcik // *Performance Evaluation*. – 2000. – Vol. 39, no. 1–4. – P. 189–206.
316. Комаров, В. А. Имитационное моделирование процесса функционирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов // *Измерительная техника*. – 2011. – № 2. – С. 16–19.
317. Komarov, V. A. Simulation of the operation of multiuser distributed measurement and control systems / V. A. Komarov, A.V. Sarafanov // *Measurement Techniques*. – 2011. – Vol. 54, no. 2. – P. 129–134.

318. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2009610619 Российская Федерация. Программная среда анализа режимов функционирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем / Комаров В. А. – № 2008615786; заявл. 08.12.2008; опубл. 27.01.2009.

319. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010613330 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем / Комаров В. А. – № 2010611382; заявл. 22.03.2010; опубл. 20.05.2010.

320. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017660103 Российская Федерация. Расчет характеристик оперативности многопользовательских систем испытаний земных станций спутниковой связи / Комаров В. А., Паздерин С. О. – № 2017617064; заявл. 18.07.2017; опубл. 14.09.2017.

321. Комаров, В. А. Расчет характеристик оперативности системы испытаний земных станций спутниковой связи / В. А. Комаров // Сборник трудов XV международной конференции NIDays-2016, Москва, 25 ноября 2016 г. – М.: ДМК-пресс, 2016. – С. 217–219.

322. Жаднов, В. В. Расчёт надёжности электронных модулей / В. В. Жаднов. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 232 с.

323. Черкесов, Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов / Г. Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с.

324. Сарафанов, А. В. Компьютерные технологии в приборостроении. Версия 1.0: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины [Электронный ресурс] / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов, К. Н. Захарьин и др. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 1 электрон. опт. диск (DVD).

325. Пат. 2575410 Российская Федерация, МПК G06F 15/16. Способ функционирования распределенных измерительно-управляющих систем / Комаров В. А., Глинченко А. С. – № 2014124254/08; заявл. 16.06.2014; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 36. – 11 с.

326. Таха, Х. А. Введение в исследование операций / Х. А. Таха. – 7-е изд.: – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.

327. Комаров, В. А. Оптимизация операций управления в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 3. – С. 52–56.

328. Пат. 2468420 Российская Федерация, МПК G06F 15/00. Способ функционирования распределенных измерительно-управляющих систем / Комаров В. А., Глинченко А. С. – № 2011125878/08; заявл. 23.06.2011; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. – 8 с.

329. Липский, В. Комбинаторика для программистов / В. Липский; пер. с польск. под ред. А. П. Ершова. – М.: Мир, 1988. – 213 с.

330. Иглин, С. П. Математические расчеты на базе MATLAB / С. П. Иглин. – СПб.: БВХ-Петербург, 2005. – 640 с.

331. Laporte, G. The traveling salesman problem: an overview of exact and approximate algorithms / G. Laporte // European Journal of Operational Research. – 1992. – Vol. 59, no. 2. – P. 231–247.

332. Solving multiple traveling salesman problem using the gravitational emulation local search algorithm / A. S. Rostami, F. Mohanna, H. Keshavarz, A. A. R. Hosseinabadi // Applied Mathematics & Information Science. – 2015. – Vol. 9, no. 2. – P. 699–709.

333. Larkia, H. Solving the multiple traveling salesman problem by a novel meta-heuristic algorithm / H. Larkia, M. Yousefikhoshbakht // Journal of Optimization in Industrial Engineering. – 2014. – Vol. 16. – P. 55–63.

334. Комаров, В. А. Исследование эффективности временного разделения многократных измерений в распределенных измерительно-управляющих системах / В. А. Комаров, А. С. Глинченко // Информационно-управляющие системы. – 2013. – № 4. – С. 73–77.

335. Пат. 2406140 Российская Федерация, МПК G06G 7/48, G01R 31/00, G06F 19/00. Способ тестирования территориально удаленных объектов / Глинченко А. С., Комаров В. А., Сарафанов А. В. – № 2009136287/07; заявл. 30.09.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 34. – 8 с.

336. Комаров, В. А. Распараллеливание функциональных операций в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах / В. А. Комаров, А. С. Глинченко, А. В. Сарафанов // Датчики и системы. – 2012. – №4. – С. 2–5.

337. Пат. 2481621 Российская Федерация, МПК G06F 15/16, МПК G06F 17/00. Способ функционирования распределенной измерительно-управляющей системы / Комаров В. А., Глинченко А. С., Сарафанов А. В. – № 2012111637/08; заявл. 26.03.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 15 с.

338. Пат. 2681516 Российская Федерация, МПК H04B 17/00. Система испытаний земных станций спутниковой связи / Комаров В. А. – № 2017140366; заявл. 20.11.2017; опубл. 07.03.2019, Бюл. № 7. – 10 с.

339. Пат. 2695539 Российская Федерация, МПК H04B 17/00, G01R 31/00. Способ функционирования системы испытаний земных станций спутниковой связи / Комаров В. А., Паздерин С.О., Королев Д.О. – № 2018122876; заявл. 22.06.2018; опубл. 24.07.2019, Бюл. №21. – 10 с.

340. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. / Р. Лайонс. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.

341. Narduzzi, C. Real-time high accuracy measurement of multifrequency waveforms / C. Narduzzi, C. Offelli // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1987. – Vol. IM-36, no. 4. – P. 964–970.

342. Глинченко, А. С. Исследовательский комплекс спектрально-весаого измерения параметров сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров // Измерительная техника. – 2011. – № 1. – С. 51–55.

343. Glinchenko, A. S. A system for the spectrally-weighted measurement of signal parameters / A. S. Glinchenko, V. A. Komarov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, no. 1. – P. 74–80.

344. Глинченко, А. С. Спектрально-весаовые измерения параметров полигармонических сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 2. – С. 6–12.

345. Глинченко, А. С. Исследование случайных погрешностей спектрально-весаого измерения параметров сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 4. – С. 7–11.

346. Глинченко, А. С. Пороговые отношения сигнал–шум при спектральных измерениях параметров сигналов / А. С. Глинченко, А. М. Алёшечкин, В. А. Комаров // Научные технологии. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 61–65.

347. Глинченко, А. С. Задачи автоматизации спектральных измерений в диапазоне частот / А. С. Глинченко, В. А. Комаров // Измерительная техника. – 2012. – № 6. – С. 60–64.

348. Komarov, V. A. Problems of automating spectral measurements in a frequency band parameters / A. S. Glinchenko, V. A. Komarov // Measurement Techniques. – 2012. – Vol. 55, no. 6. – P. 712–718.

349. Официальный сайт компании Zetlab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://zetlab.com>.

350. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011612344 Российская Федерация. Программный комплекс спектрально-весаго измерения параметров сигналов / Глинченко А. С., Комаров В. А. – № 2011610557; заявл. 01.02.2011; опубл. 21.03.2011.

351. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Основы теории цепей» / Вепринцев В. И. и др. // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сб. трудов VIII Междунар. науч.-практ. конф. – М.: РУДН, 2009. – С. 408–410.

352. Зандер, В. Ф. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Устройство приема и обработки сигналов» / В. Ф. Зандер, Д. Ю. Худоногов, П. О. Сухарев / Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сб. тр. VII науч.-практич. конф. – М.: РУДН, 2008. – С. 139–147.

353. Исследование аналоговых электронных устройств с применением интернет-технологий / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов, В. Д. Скачко. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 159 с.

354. Автоматизированный лабораторный практикум с удаленным доступом для исследования электрических цепей / В. И. Вепринцев, А. С. Глинченко, В. И. Коваленок, В. А. Комаров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. – 188 с.

355. Автоматизация биофизических лабораторных исследований. Изучение метода аудиометрии и электропроводности биологических объектов с использованием Е-инструментария / А. Г. Суковатый и др. – Красноярск: Центр информации, 2011. – 95 с.

356. Исследование полупроводниковых приборов на основе специализированного сетевого аппаратно-программного комплекса: учеб. пособие. Версия 1.0 [Электронный

ресурс] / А. В. Сарафанов и др. Регистрационное свидетельство № 17918 от 4 марта 2010 г. Номер государственной регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320 902555.

357. Зандер, Ф. В. Устройства приема и обработки сигналов: автоматизированный лабораторный практикум с применением Internet-технологий / Ф. В. Зандер, В. И. Коваленок, Д. Ю. Худоногов; под ред. С. А. Подлесного. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 147 с.

358. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Тракт усиления звуковой частоты». Версия 1.2: интерактивное электронное техническое руководство [Электронный ресурс] / Ю. А. Капустин-Богданов, А. В. Сарафанов, Трегубов С. И. и др. Регистрационное свидетельство № 13254 от 24 июня 2008 г. Номер государственной регистрации ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320 801027.

359. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Электроника». Версия 1.2: интерактивное электронное техническое руководство [Электронный ресурс] / Ю. А. Капустин-Богданов, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов и др. Регистрационное свидетельство № 13255 от 25 июня 2008 г. Номер государственной регистрации ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320 801028.

360. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Схемотехника аналоговых электронных устройств»: интерактивное электронное техническое руководство [Электронный ресурс] / Ю. А. Капустин-Богданов, В. Д. Скачко, А. В. Сарафанов и др. Регистрационное свидетельство № 15640 от 25 февраля 2009 г. Номер государственной регистрации ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320 900277.

361. Косников, Ю. Н. Построение интерфейса человек – компьютер для системы автоматизированного управления сложными объектами / Ю. Н. Косников // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 4 (32). – С. 82–92.

362. Раскин, Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем / Д. Раскин. – М.: Символ-Плюс, 2005. – 272 с.

363. Иванова, Г. С. Технология программирования / Г. С. Иванова. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

364. Авербух, В. Л. Метафора интерфейса и метафора визуализации. Какая теория нам нужна? / В. Л. Авербух // ГрафиКон'2006, 1–5 июля 2006. Россия.

Новосибирск, Академгородок. Труды Конференции. – Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики, 2006. – С. 262–267.

365. Анохин, А. Н. Проектирование интерфейсов / А. Н. Анохин, Н. А. Назаренко // Биотехносфера. – 2010. – № 2 (8). – С. 21–27.

366. Соловьев, С. В. Технология разработки прикладного программного обеспечения / С. В. Соловьев, Р. И. Цой, Л. С. Гринкруг. – М.: Академия естествознания, 2011. – 407 с.

367. Remote triggered analog communication laboratory for e-Learning / С. М. Markan et al. // International Journal of Online Engineering. – 2013. – Vol 9, no. 5. – P. 48–55.

368. Колб, Д. Г. Унифицированная модель пользовательских интерфейсов интеллектуальных систем / Д. Г. Колб // Доклады БГУИР. – 2009. – № 7 (45). – С. 52–58.

369. Диковицкий, В. В. Технология формирования адаптивных пользовательских интерфейсов для мультипредметных информационных систем промышленных предприятий / В. В. Диковицкий, М. Г. Шишаев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 12–16.

370. Грибова, В. В. Модель онтологии предметной области «Графический пользовательский интерфейс» / В. В. Грибова, А. В. Тарасов // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1 (9). – С. 80–90.

371. Iglesias, J. R. User interface representation using simple components / J. R. Iglesias, P. M. Teixeira-Faria // Human-Computer Interaction, Part1, HCI International 2011, Lecture Notes in Computer Science 6761. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – P. 278–287.

372. The Handbook of Formal Methods in Human-Computer Interaction / В. Weyers, J. Bowen, A. Dix, P. Palanque. – Springer International Publishing AG, 2017.

373. ГОСТ Р ИСО 14915-1–2016. Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 1. Принципы проектирования и структура. – М.: Стандартинформ, 2016.

374. ГОСТ Р ИСО 14915-2-2016. Эргономика мультимедийных пользовательских интерфейсов. Часть 2. Навигация и управление мультимедийными средствами. – М.: Стандартинформ, 2016.

375. Galitz, W. O. The essential guide to user interface design: An introduction to GUI design principles and techniques / W. O. Galitz. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 888 p.
376. Тидвелл, Дж. Разработка пользовательских интерфейсов / Дж. Тидвелл. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 480 с.
377. Мандел, Т. Разработка пользовательского интерфейса: пер. с англ. / Т. Мандел. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 416 с.
378. Хортсманн, К. С. Java. Библиотека профессионала. Том 1. Основы: пер. с англ. / К. С. Хортсманн. – 10-е изд. – М.: Вильямс, 2016. – 864 с.
379. Laboratoty as a Service (LaaS): a novel paradigm for developing and implementing modular remote laboratories / M. Tawfik et al. // eJOE. – 2014. – vol. 10, no. 4. – P. 13-21.
380. Сарафанов, А. В. Построение сетевых измерительных лабораторий с применением web-технологий / А. В. Сарафанов, Д. Ю. Худоногов // Качество. Инновации. Образование. – 2010. – № 10. – С. 56–62.
381. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению. – М.: Издательство стандартов, 2004.
382. Using augmented reality in remote laboratories / H. Vargas et al. // International Journal of Computers Communication and Control. – 2013. – Vol. 8, no. 4. – P. 622–634.
383. Augmented reality and natural user interface applications for remote laboratories / A. Maiti, M. Smith, A. D. Maxwell, A. A. Kist // Cyber-physical laboratories in engineering and science education. – Springer International Publishing, 2018. – 434 p.
384. Brain interfaced remote laboratory – a novel BCI application for inclusive education / C. M. Markan et al. // Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications. – Ottawa, May 2014.
385. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
386. Искусственный интеллект. Кн. 2. Модели и методы / под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.

387. Рутковский, Л. Методы и технологии искусственного интеллекта: пер. с польск. / Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2010. – 520 с.
388. Нейлор, К. Как построить свою экспертную систему: пер. с англ. / К. Нейлор. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с.
389. Долгих, Э. А. Основы применения CALS-технологий в электронном приборостроении / Э. А. Долгих, А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 130 с.
390. ГОСТ 2.611–2011. Единая система конструкторской документации. Электронный каталог изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2012.
391. Батоврин, В. К. Управление жизненным циклом технических систем: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / В. К. Батоврин, Д. А. Бахтурин; ред. И.С. Мацкевич, М.С. Липецкая; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад». – СПб., 2012. – Вып. 1. – 59 с.
392. ГОСТ Р ИСО МЭК 15288–2005. Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2006.
393. Silver, V. VMPN methods and style / V. Silver. – 2nd ed. – Aptos: Cody-Cassidy Press, 2011. – 286 p.
394. Дегтяренко, И. А. Методика оценки удовлетворенности пользователей интерфейсом интернет-сайта / И. А. Дегтяренко, И. В. Бурмистров, А. Б. Леонова // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. – 2010. – № 1. – С. 94–109.
395. Кантор, Л. Я. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты / Л. Я. Кантор, В. В. Тимофеев. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
396. Elbert, V. R. Introduction to satellite communication / V. R. Elbert. – 3 ed. – Norwood: Artech House Publishers, 2008. – 447 p.
397. Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Ч. 2. / А. В. Засецкий, А. Б. Иванов, С. Д. Постников, И. В. Соколов; под ред. А. Б. Иванова. – М.: Компания «Сайрус Системс», 2001. – 336 с.
398. Бакланов, Г. И. Методы измерений в системах связи / Г. И. Бакланов. – М.: Эко-ТРЕНДЗ, 1999. – 204 с.

399. KazSat обеспечивает Интернетом труднодоступные районы Казахстана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.inform.kz/ru/kazsat-obespechivaet-internetom-trudnodostupnye-rayony-kazahstana_a338184.

400. Экспресс АМ-6 введен в эксплуатацию // Теле-Спутник. – 2015. – № 6. – С. 54.

401. Спутник связи. Ямал 601 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ecoruspace.me/%D0%AF%D0%BC%D0%B0%D0%BB+601.html>.

402. Захаров, М. Н. Оценка эффективности привлечения инвестиций в производство космических систем связи / М. Н. Захаров, И. А. Галькевич // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2014. – № 14. – С. 37–48.

403. Комаров, В. А. Исследование вероятностно-временных характеристик многопользовательской системы квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи / В. А. Комаров // Научные технологии 2015. – Т. 16, №3. – С. 48–51.

404. Комаров, В. А. Анализ эффективности метода квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи / В. А. Комаров, С. О. Паздерин // Измерительная техника. – 2019. – № 4. – С. 9–13.

405. Пат. 2620596 Российская Федерация, МПК Н04В 17/00. Распределенная измерительно-управляющая система / Комаров В. А., Паздерин С. О. – № 2015123000; заявл. 16.12.2015; опубл. 29.05.2017, Бюл. № 16. – 9 с.

406. Пичкалев, А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры / А. В. Пичкалев // Решетневские чтения: материалы XIV Междунар. науч. конф. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2010. – С. 515–516.

407. Комаров, В. А. Аппаратно-программное моделирование модулей сопряжения систем жизнеобеспечения КА / В. А. Комаров // Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments – 2011: сборник трудов X международной научно-практической конференции, Москва 8–9 декабря 2011 г. – М.: ДМК-пресс, 2011. – С. 173–174.

408. Комаров, В. А. Разработка архитектуры эмулятора интерфейсных модулей сопряжения систем жизнеобеспечения космических аппаратов / В. А. Комаров, П. В. Семкин // Сибирский журнал науки и технологий. – 2019. – Т. 20, № 2. – С. 228–235.

409. Применение ПЛИС для моделирования логики функционирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов / Д. А. Недорезов,

О. В. Непомнящий, А. В. Пичкалев, С. С. Красненко // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 1 (53). – С. 133–136.

410. Методология мутационного тестирования для наземных испытаний бортовой аппаратуры космических аппаратов / Д. А. Недорезов и др. // Системы и средства информатики. – 2014. – Т. 24, № 1. – С. 73–79.

411. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011618808 Российская Федерация. IP-ядро контроллера последовательной магистрали / Юдин В. А. – № 2011617024; заявл. 20.09.2011; опубл. 11.11.2011.

412. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013612869 Российская Федерация. Эмулятор интерфейсных модулей сопряжения исполнительных устройств систем жизнеобеспечения КА / Комаров В. А., Юдин В. А., Полещук В. В. – № 2012660149; заявл. 22.11.2012; опубл. 14.03.2013.

413. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013612871 Российская Федерация. Эмулятор интерфейсного модуля сопряжения контрольно-измерительной системы / Комаров В. А., Юдин В. А., Казайкин Д. С. – № 2012660148; заявл. 22.11.2012; опубл. 14.03.2013.

414. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2013612874 Российская Федерация. Эмулятор интерфейсных модулей сопряжения с аналоговыми сигналами / Комаров В. А., Юдин В. А. – № 2012660138; заявл. 22.11.2012; опубл. 15.03.2013.

415. Сазонов, С. П. Анализ государственных программ импортозамещения / С. П. Сазонов, Г. В. Федотова, Л. М. Сibaгатулина // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2016. – № 9 (291). – С. 12–21.

416. Тумковский, С. Р. Разработка web-элементов системы схмотехнического моделирования / С. Р. Тумковский // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. Материалы Международной научно-практической конференции / МИЭМ. – М., 2010. – С. 281–284.

417. Тумковский, С. Р. Идентификация параметров математических моделей элементов РЭС: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.04 / Тумковский Сергей Ростиславович. – М., 2006. – 38 с.

418. Петросянц, К. О. Определение параметров SPICE-моделей биполярных транзисторов в диапазоне температуры (–60...+125 °С) / К. О. Петросянц,

Л. М. Самбурский, И. А. Харитонов // Материалы XIV научно-технической конференции специалистов «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА», 7–9 октября 2015. – М., 2015. – С. 239–243.

419. Современные аппаратно-программные средства анализа полупроводниковых приборов / О. В. Дворников, Б. Н. Лисенков, Ю. Ф. Шульгевич, А. В. Толкун // Новости науки и технологий. – 2007. – № 2 (6). – С. 18–22.

420. Информационно-измерительный комплекс для определения параметров схемотехнических SPICE моделей электронных компонентов с учетом температуры / И. А. Харитонов и др. // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. Материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – С. 274–276.

421. Пилипенко, А. М. Идентификация параметров Spice-моделей радиоэлектронных компонентов на основе технологий National Instruments / А. М. Пилипенко / Образовательные, научные и инженерные приложения в среде *LabVIEW* и технологии National Instruments: сб. тр. VII науч.-практич. конф. – М.: РУДН, 2008. – С. 252–253.

422. Петров, В. Н. Программно-аппаратный комплекс измерения и идентификации параметров схемотехнических моделей полупроводниковых структур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 / Петров Владимир Николаевич. – Новгород, 1998. – 18 с.

423. Капралов, С. А. Программно-аппаратный комплекс измерения и идентификации статических параметров схемотехнических моделей мощных полупроводниковых структур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.01 / Капралов Сергей Анатольевич. – Великий Новгород, 2005. – 22 с.

424. Денисенко, В. В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике / В. В. Денисенко. – М.: Физматлит, 2010. – 408 с.

425. Применение WEB-технологий при построении автоматизированных лабораторных практикумов с удаленным доступом / Б. М. Бидус, Д. Ю. Худоногов, Ф. В. Зандер, А. В. Сарафанов // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов / ред. А. И. Громыко. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – С. 482–485.

426. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2008610374 Российская Федерация. Программное обеспечение аппаратно-программного

комплекса с удаленным доступом «Тракт УЗЧ» / Комаров В. А. – № 2007614614; заявл. 21.11.2007; опублик. 18.01.2008.

427. Комаров, В. А. Системы автоматизированного проектирования и конструирования измерительных приборов: учебно-методическое пособие / В. А. Комаров. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 40 с.

428. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010616546 Российская Федерация. Интернет-управление сетевым учебно-исследовательским аппаратно-программным комплексом «Полупроводниковые приборы» / Дектерев М. Л., Комаров В. А., Сарафанов А. В., Глинченко А. С. – № 2010614670; заявл. 03.08.2010; опублик. 01.10.2010.

429. Полупроводниковые приборы: сетевой учебно-исследовательский аппаратно-программный комплекс: руководство пользователя [Электронный ресурс] / М. Л. Дектерев, К. Н. Захарьин, В. А. Комаров и др. Регистрационное свидетельство № 21781 от 7 апреля 2011 г. Номер госрегистрации ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0321 100709.

430. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2008615444 Российская Федерация. Программное обеспечение аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом «Схемотехника аналоговых электронных устройств» / Комаров В. А., Глинченко А. С. – № 2008613851; заявл. 20.08.2008; опублик. 14.11.2008.

431. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2008610425 Российская Федерация. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Частотный детектор» / Зандер Ф. В., Худоногов Д. Ю. – № 2007614745; заявл. 27.11.2007; опублик. 23.01.2008.

432. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2008610426 Российская Федерация. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Входная цепь» / Зандер Ф. В., Худоногов Д. Ю., – № 2007614746; заявл. 27.11.2007; опублик. 23.01.2008.

433. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2009611881 Российская Федерация. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Фазовая автоподстройка частоты» / Зандер Ф. В., Худоногов Д. Ю., Сухарев П. О. – № 2009610687; заявл. 24.02.2009; опублик. 10.04.2009.

434. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2009611884 Российская Федерация. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Автоматическая регулировка усиления» / Зандер Ф. В., Худоногов Д. Ю., Сухарев П. О. – № 2009610690; заявл. 24.02.2009; опубл. 10.04.2009.

435. Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Устройства приема и обработки сигналов»: интерактивное электронное техническое руководство. Версия 1.0 [Электронный ресурс] / Ю. А. Капустин-Богданов и др. – Номер государственной регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320 900276.

436. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011615253 Российская Федерация. Интернет управление учебно-исследовательским аппаратно-программным комплексом «Электропроводность биологических объектов» / Дектерев М. Л., Комаров В. А., Сарафанов А. В и др. – № 2011613296; заявл. 10.05.2011; опубл. 06.07.2011.

437. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010616337 Российская Федерация. Интернет-управление сетевым учебно-исследовательским аппаратно-программным комплексом «Физика. Электродинамика» / Дектерев М. Л., Комаров В. А., Сарафанов А. В. и др. – № 2010614521; заявл. 27.06.2010; опубл. 23.09.2010.

438. Исследования физических явлений в электрических цепях с применением Интернет-технологий / М. Л. Дектерев и др.; под ред. А. В. Сарафанова. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 432 с.

439. Физика. Электродинамика: сетевой учебно-исследовательский аппаратно-программный комплекс: руководство пользователя. Версия 1.0 [Электронный ресурс] / Дектерев М.Л., Комаров В. А., Преснякова Г. О. и др. Регистрационное свидетельство № 21780 от 6 апреля 2011 г. Номер государственной регистрации ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0321 100708.

440. Изучение физических эффектов с использованием дистанционных технологий / А. В. Сарафанов, А. Г. Суковатый, В. А. Комаров, Д. Ю. Худоногов // Информатизация образования и науки. – 2012. – № 4 (16). – С. 49–63.

441. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2011615252 Российская Федерация. Адаптируемая сетевая учебно-научная

лаборатория / Дектерев М. Л., Комаров В. А., Сарафанов А. В. и др. – № 2011613295; заявл. 10.05.2011; опубл. 06.07.2011.

442. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.

443. Гуда, А. Н. Модели оценки параметров телекоммуникационного трафика в автоматизированных информационно-управляющих системах / А. Н. Гуда, М. А. Бутакова, Н. А. Москат // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2010. – № 4–6 (29). – С. 71–86.

444. Бахарева, Н. Ф. Анализ и расчет непуассоновских моделей трафика в сетях ЭВМ / Н. Ф. Бахарева, И. В. Карташевский, В. Н. Тарасов // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т. 4, № 4. – С. 61–66.

445. Sztrik, J. A queueing model for multiprogrammed computer systems with different I/O times / J. Sztrik // Acta Cybernetica. – 1984. – Vol. 7, no. 1. – P. 127–135.

446. Bunday, B. D. The finite source queueing model for multiprogrammed computer system with different CPU time and different I/O times / B. D. Bunday, E. Khorram // Acta Cybernetica. – 1989. – Vol. 8, no.4. – P. 353–359.

447. Шепель, В. Н. Использование оценки Хилла для различения законов распределения вероятности / В. Н. Шепель, С. С. Акимов // Вестник ОГУ. – 2014. – № 1 (162). – С.75–78.

448. Беврани, Х. Оценка параметров распределений с тяжелыми хвостами с помощью эмпирического распределения / Х. Беврани, К. Аничкин // МКО. – 2005. – Ч. 2. – С. 493–501.

449. Денинг, В. Диалоговые системы «человек – ЭВМ». Адаптация к требованиям пользователя: пер. с англ. / В. Денинг, Г. Эссиг, С. Маас. – М.: Мир, 1984. – 112 с.

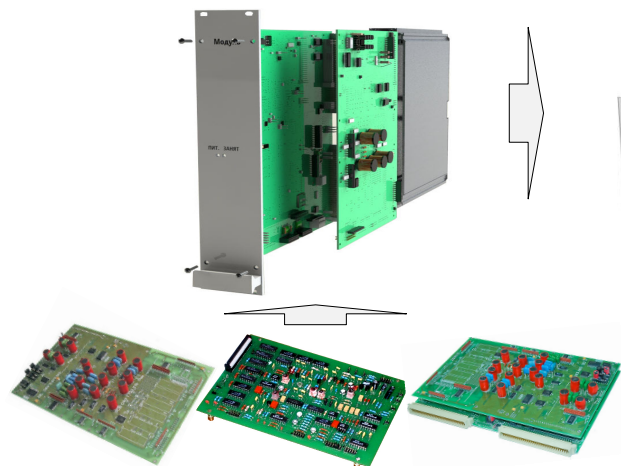
450. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) – Reference Architecture, 2018.

451. ГОСТ Р 8.818–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений и системы измерительные виртуальные. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ОПИСАНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
С УДАЛЕННЫМ ДОСТУПОМ**

Комплекс объектных модулей в виде стандартных кассет 6U

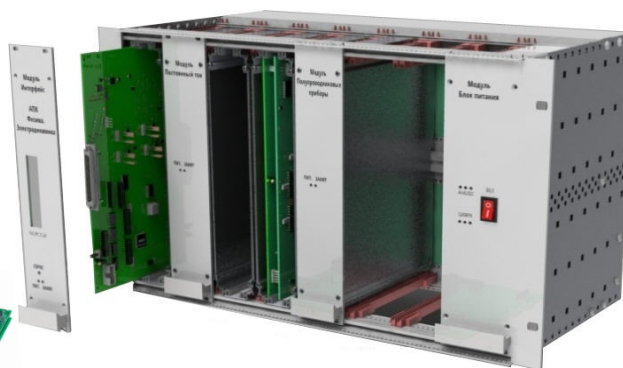


Созданы специализированные объектные модули:

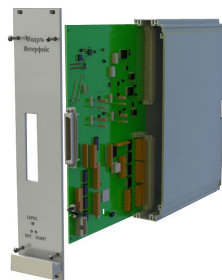
- «Электрические цепи»
- «Диод»
- «Стабилитрон»
- «Полевой транзистор»
- «Биполярный транзистор»
- «Усилитель с обратными связями»
- «Резистивный каскад»
- «Усилитель мощности»
- «Функциональные устройства на ОУ»
- «Входная цепь»
- «Усилитель радиосигнала»
- «Частотный детектор»
- «Автоматическая регулировка усиления» и др.

(всего более 15 различных модулей)

Конструктивное исполнение на базе стационарного крейта 6U



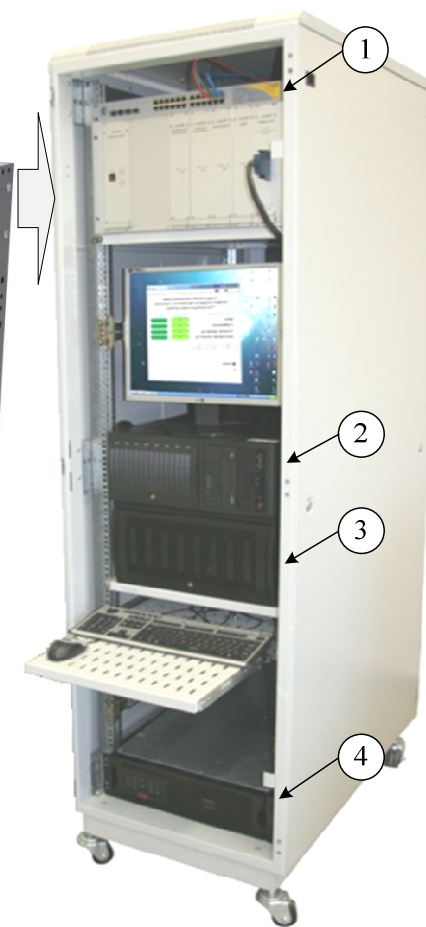
Унифицированные модули в виде стандартных кассет 6U



Функциональный
модуль «Интерфейс»



Функциональный
модуль «Блок питания»



Телекоммуникационный шкаф
системы конструктивов
«Евромеханика» 19"

Рисунок А1 – Унифицированное конструктивное исполнение аппаратных компонентов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований на базе семейства конструктивов стандарта «Евромеханика»: 1 – коммуникационное оборудование;

2 – центральный сетевой сервер; 3 – измерительно-управляющая ЭВМ; 4 – источник бесперебойного питания

АПК УД «ФИЗИКА. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА»

Функциональные возможности

АПК УД «Физика. Электродинамика» обеспечивает:

- изучение зависимости тока от разности потенциалов *при постоянном сопротивлении* R , зависимости силы тока I от сопротивления участка цепи $I(R)$ *при постоянной разности потенциалов* U , сравнение расчетного сопротивления с реальным (найденного графически и математически);
- изучение зависимости полной мощности, мощности, выделенной во внешней цепи, и КПД источника тока от внешнего сопротивления;
- определение внутреннего сопротивления источника тока;
- определение условия, при котором мощность, выделенная во внешней цепи, будет максимальной;
- измерение зависимости силы тока от времени при замыкании RC -цепи;
- измерение времени релаксации RC -цепи;
- определение зависимости времени релаксации от характеристик RC -цепи;
- измерение зависимости силы тока от времени при размыкании RL -цепи;
- измерение времени релаксации RL -цепи;
- определение зависимости времени релаксации от характеристик RL -цепи;
- исследование зависимости периода колебаний от параметров колебательного контура;
- исследование зависимости динамики процесса затуханий от параметров колебательного контура;
- исследование зависимости периода колебаний от параметров колебательного контура;
- исследование зависимости логарифмического декремента затухания и добротности от параметров колебательного контура: сопротивления R , емкости C и индуктивности L ;
- изучение резонансных кривых RLC -контура, измеренных для различных значений сопротивления, индуктивности и емкости;
- изучение фазо-частотных характеристик при различных параметрах RLC -контура;
- определение резонансной частоты RLC -контура;
- изучение зависимости добротности RLC -контура от параметров контура;
- получение вольт-амперной характеристики для германиевого и кремниевого диодов;
- исследование зависимости дифференциального сопротивления диода от приложенного напряжения;

- изучение зависимостей реактивного и полного сопротивлений от параметров цепи переменного тока;
- экспериментальную проверку закона Ома для цепи переменного тока с последовательно соединенными активным сопротивлением, емкостью и индуктивностью;
- изучение амплитудно-частотной характеристики силы тока, измеренной для различных значений сопротивления, емкости, индуктивности в цепи переменного тока;
- изучение фазо-частотных характеристик силы тока, измеренных для различных значений сопротивления, емкости, индуктивности в цепи переменного тока.

Назначение

АПК УД «Физика. Электродинамика» является устройством коллективного применения и может быть рекомендован для выполнения лабораторных исследований в учреждениях общего образования (ОО) и среднего (СПО), начального (НПО), высшего образования (ВО) по дисциплине «Физика», раздел «Электродинамика» (рисунок А2).



Рисунок А2 – Общий вид автоматизированного лабораторного макета АПК УД «Физика. Электродинамика»

АПК УД «Физика. Электродинамика» позволяет выполнять такие экспериментальные исследования, как:

- «Изучение принципов обработки данных физического эксперимента»;
- «Изучение закона Ома для однородного участка цепи»;
- «Измерение мощности и КПД источника тока в зависимости от величины внешнего сопротивления (нагрузки)»;
- «Изучение переходных процессов в цепях с конденсатором»;
- «Изучение переходных процессов в цепях с индуктивностью»;
- «Изучение принципов работы полупроводникового диода»;
- «Изучение свободных затухающих колебаний в последовательном RLC -контуре»;
- «Изучение свободных вынужденных колебаний в последовательном RLC -контуре»;
- «Определение реактивного и полного сопротивлений цепи переменного тока».

При необходимости возможно изменение типоминалов и/или возможных конфигураций объектов исследования, а также увеличение количества лабораторных работ в соответствии с альтернативными вариантами методик проведения лабораторных исследований.

Комплекс виртуальных инструментов

Для исследования физических характеристик используется комплекс виртуальных стендов и измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (рисунок А3).

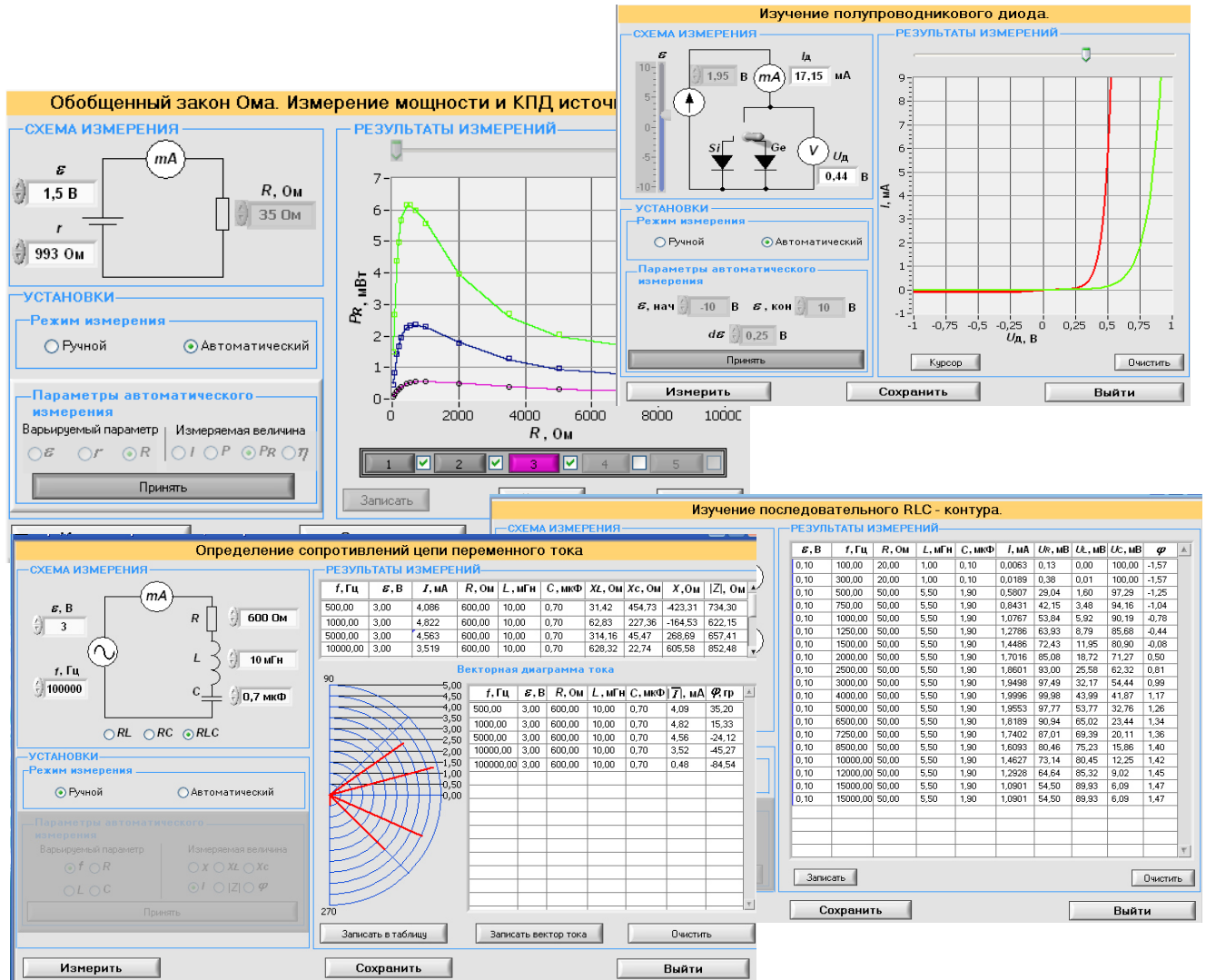


Рисунок А3 – Примеры виртуальных лабораторных стендов
 АПК УД «Физика. Электродинамика»

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для формирования отчетов.

3D-модель АПК УД «Физика. Электродинамика»

3D-модель автоматизированного лабораторного макета (АЛМ) АПК УД «Физика. Электродинамика» (рисунок А4) реализована в программной среде *SolidWorks eDrawings* (<http://www.solidworks.ru/>), предназначенной для автоматизации работ на этапах конструкторской и технологической подготовки производства изделий любой степени сложности и назначения. 3D-модель АЛМ представляет широкий набор возможностей по работе с ней, например, позволяет перемещать выбранные компоненты 3D-модели по плоскости чертежа, вращать 3D-модель, создавать поперечное сечение и т. п.

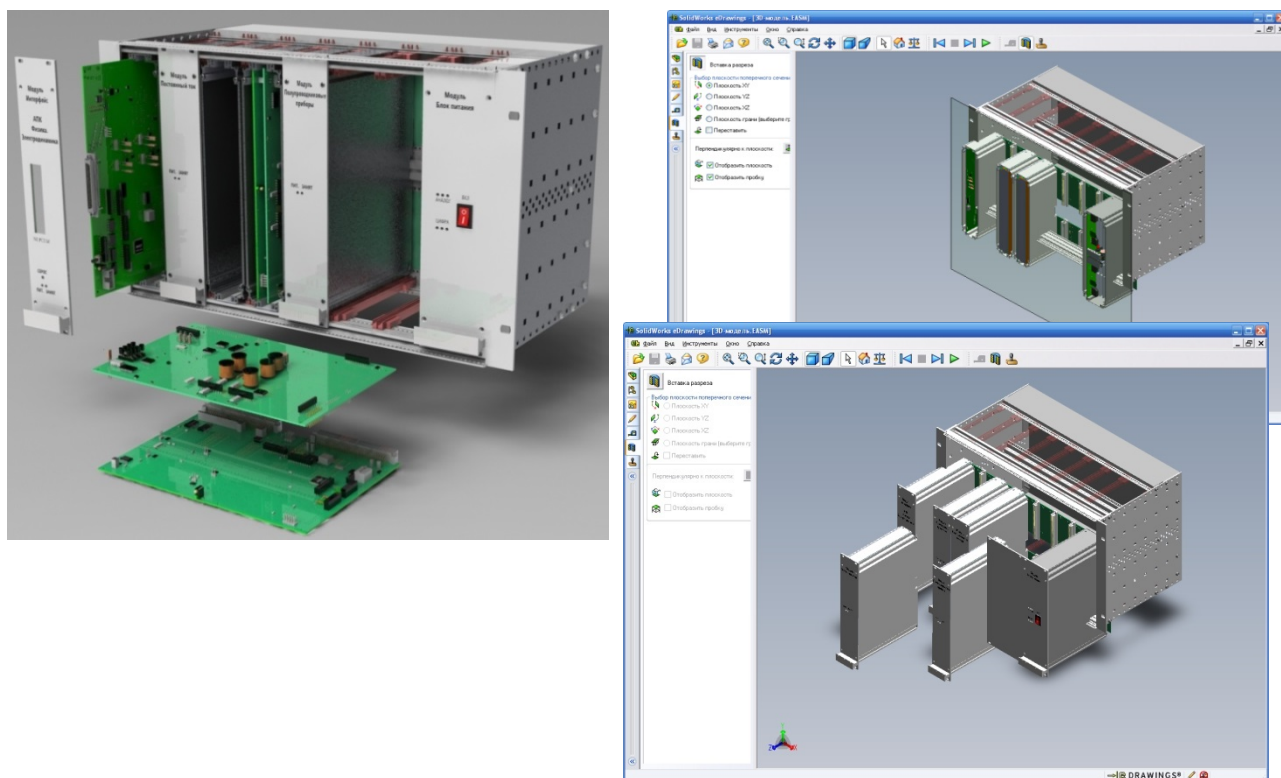


Рисунок А4 – 3D-модель АЛМ «Физика. Электродинамика» и примеры работы с ней

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1,4 с
Пропускная способность	39 заданий в минуту
Масштабируемость	22 – 28 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	520 – 670 пользователей в сутки

АПК УД «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ»

Функциональные возможности

Измерение/исследование (в ручном и автоматическом режимах): прямой и обратной ветвей вольт-амперных характеристик (ВАХ) диода и стабилитрона; нагрузочной характеристики и характеристик стабилизации стабилитрона; статических и динамических передаточных и выходных характеристик полевого транзистора; статических и динамических входных и выходных характеристик биполярного транзистора в схемах включения с общим эмиттером и общей базой; статического и дифференциального сопротивлений диода и стабилитрона, крутизны и выходного сопротивления полевого транзистора, h -параметров биполярного транзистора; технологического разброса ВАХ и параметров диода, стабилитрона, полевого и биполярного транзисторов. Исследование работы: диода на переменном токе при активной и активно-емкостной нагрузках; стабилитрона – в схеме параметрического стабилизатора напряжения; полевого и биполярного транзисторов на переменном токе в линейном и нелинейном режимах при различных сопротивлениях нагрузки. Визуализация установки и изменения положения рабочей точки на ВАХ исследуемых полупроводниковых приборов в динамическом режиме работы.

Назначение

АПК УД «Полупроводниковые приборы» обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* по дисциплинам «Электроника», «Общая электротехника и электроника», «Полупроводниковые приборы», «Схемотехника электронных средств», «Электроника и микроэлектроника» и др., направленным на изучение принципов работы полупроводниковых приборов (рисунок А5).



Рисунок А5 – Общий вид АЛМ АПК УД «Полупроводниковые приборы»

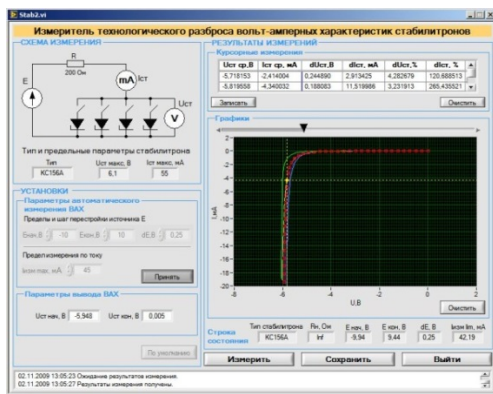
АПК УД «Полупроводниковые приборы» позволяет выполнять такие экспериментальные исследования, как:

- «Исследование выпрямительных диодов»;
- «Исследование стабилитронов»;
- «Исследование полевых транзисторов»;
- «Исследование биполярных транзисторов» и т.п.

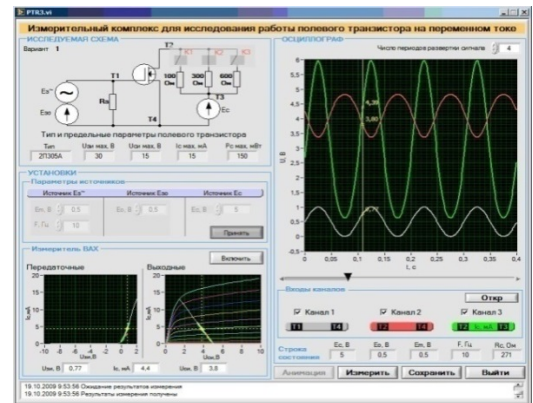
При необходимости возможно изменение типонаименований и/или возможных конфигураций объектов исследования, а также увеличение количества лабораторных работ в соответствии с альтернативными вариантами методик проведения лабораторных исследований.

Комплекс виртуальных инструментов

Для исследования характеристик полупроводниковых приборов, входящих в состав модулей АПК, используется комплекс виртуальных стендов и измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (рисунок А6). Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word*.



а



б

Рисунок А6 – Фрагменты виртуальных лабораторных стендов АПК УД «Полупроводниковые приборы»: а – исследование технологического разброса ВАХ стабилитронов; б – исследование работы полевого транзистора в динамическом режиме

Математическое моделирование

Лабораторные исследования по экспериментальному изучению принципов работы полупроводниковых приборов средствами АПК УД «Полупроводниковые приборы» дополняются моделированием режимов их работы на ПЭВМ с помощью систем сквозного проектирования электронных средств *Orcad*, *Altium Designer* и пр. (рисунок А7).

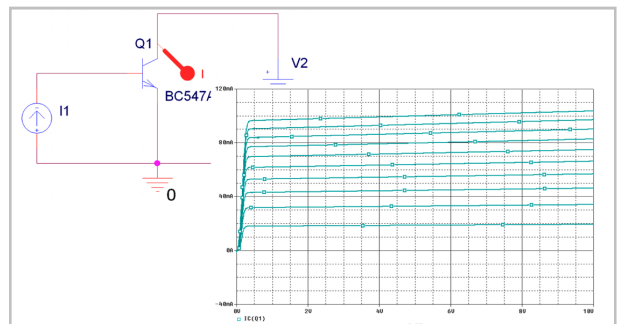


Рисунок А7 – Пример построения выходных ВАХ биполярного транзистора с помощью системы сквозного проектирования электронных средств *Orcad*

Программные средства моделирования позволяют на основе математических моделей объектных модулей АПК УД «Полупроводниковые приборы» выполнить исследования электрических характеристик полупроводниковых приборов, включающие:

- расчет среднестатистических ВАХ и параметров полупроводниковых приборов, оценку соответствия результатов моделирования и измерений, повышение точности

моделирования путем использования экспериментально находимых параметров математической модели;

- анализ режимов работы полупроводниковых приборов по постоянному току;
- анализ параметров и характеристик электронных устройств на основе исследуемых полупроводниковых приборов во временной области;
- анализ параметров и характеристик электронных устройств на основе исследуемых полупроводниковых приборов в частотной области;
- статистический анализ параметров и характеристик полупроводниковых приборов по методу Монте-Карло;
- анализ температурных зависимостей параметров и характеристик полупроводниковых приборов.

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство (ИЭТР), подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет студенту подробную информацию об АЛМ АПК УД (рисунок А8):

- описание структурной схемы АПК УД;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК УД лабораторных исследований;
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК УД, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции и др.).

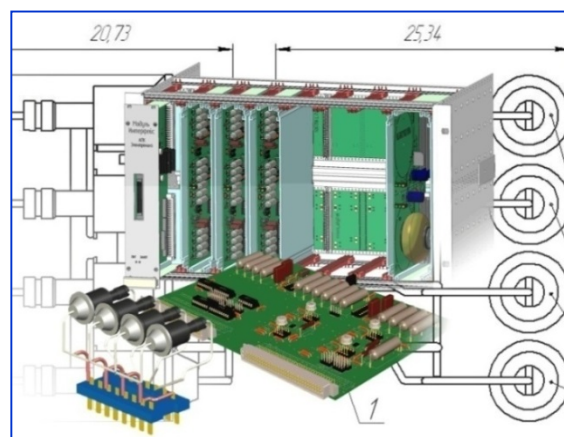


Рисунок А8 – Фрагмент ИЭТР – 3D-модель конструкции АЛМ АПК УД «Полупроводниковые приборы»

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1 с
Пропускная способность	57 заданий в минуту
Масштабируемость	31 – 40 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	740 – 950 пользователей в сутки

АПК УД «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ»

Функциональные возможности

Набор объектных модулей АПК УД и его измерительных средств представляют возможности исследования переходных процессов в RC -, RL - и RLC -цепях, исследования частотных характеристик RC -, RL - и RLC -цепей, исследования частотных характеристик и избирательных свойств последовательного, параллельного и связанного колебательных контуров, исследования частотных характеристик и фильтрующих свойств электрических фильтров нижних, верхних частот, полосовых и заграждающих фильтров, фильтров m -типа, работающих в диапазоне частот 10 Гц – 50 кГц.

Назначение

АПК УД «Основы электротехники и электроники» («Основы теории цепей») обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* по дисциплинам «Основы теории цепей», «Теоретические основы электротехники», «Общая электротехника», «Электроника» и др., направленным на изучение законов электричества и характеристик электрических цепей (рисунок А9).



Рисунок А9 – Общий вид АЛМ АПК УД «Основы электротехники и электроники»

АПК УД «Основы электротехники и электроники» позволяет выполнять такие экспериментальные исследования, как:

- «Исследование простейших цепей переменного тока»;
- «Исследование последовательного и параллельного колебательного контура, а также связанных контуров»;
- «Исследование переходных процессов в RL -, RC -, RLC -цепях»;
- «Исследование характеристик фильтров нижних и верхних частот, полосовых и заграждающих фильтров»;
- «Исследование фильтров нижних и верхних частот типа m » и т.п.

При необходимости возможно изменение типонаименований и/или возможных конфигураций объектов исследования, а также увеличение количества лабораторных работ в соответствии с альтернативными вариантами методик проведения лабораторных исследований.

Комплекс виртуальных инструментов

Экспериментальное исследование электрических цепей осуществляется с помощью комплекса виртуальных стендов и виртуальных измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (рисунок А10): генератора сигналов различной формы, цифрового осциллографа, цифрового вольтметра, анализатора спектра, измерителя АЧХ и ФЧХ.

Измерения АЧХ и ФЧХ могут проводиться в ручном режиме (по точкам) и в автоматическом с помощью тестовых полигармонических сигналов. Предусмотрены экранные (курсорные) измерения по экспериментально полученным графикам. Посредством виртуальных стендов лабораторных работ выполняется взаимодействие пользователя с измерительными приборами и конфигурирование электрических цепей из набора базовых элементов.

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для дальнейшего формирования отчетов.

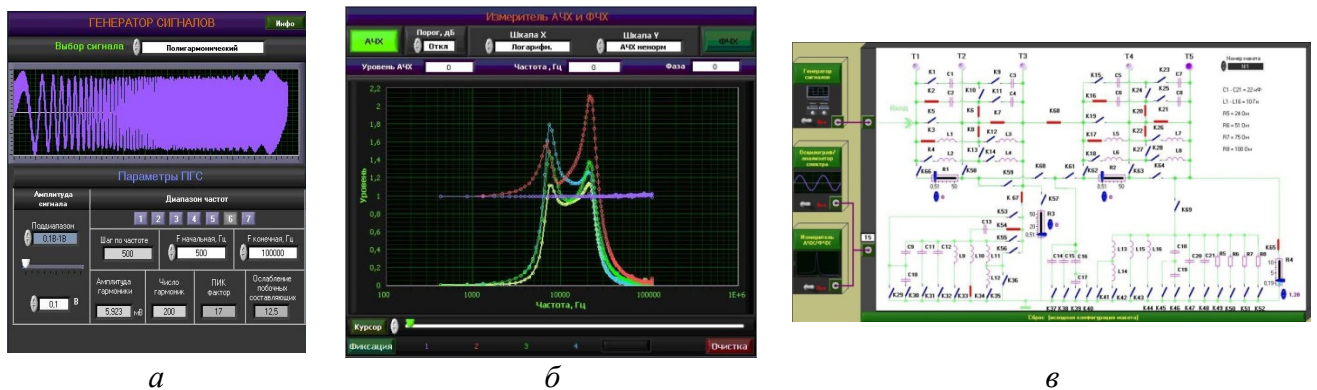


Рисунок А10 – Внешний вид комплекса виртуальных лабораторных стендов и измерительных приборов АПК УД «Основы электротехники и электроники»: *а* – генератор входных сигналов; *б* – измеритель АЧХ/ФЧХ; *в* – виртуальный стенд конфигурирования АПК УД

Математическое моделирование

Лабораторные экспериментальные исследования электрических цепей осуществляются совместно с моделированием их работы на ПЭВМ (рисунок А11) с помощью систем сквозного проектирования электронных средств *Orcad*, *Altium Designer* и пр. Моделирование электронных устройств на ПЭВМ основывается на математических моделях образующих их компонентов.

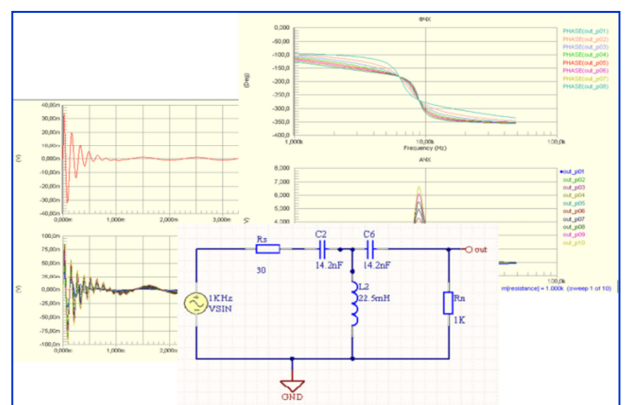


Рисунок А11 – Пример моделирования работы электрических цепей с помощью системы сквозного проектирования электронных средств *Altium Designer*

Моделирование включает весь комплекс исследований, выполняемых экспериментально, а также обеспечивает дополнительно возможности изучения температурных зависимостей и влияния технологического разброса параметров элементов на характеристики исследуемых электрических цепей.

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder* (*Technical Guide Builder*), позволяет получить студенту подробную информацию об АПК УД (рисунок А12):

- описание структурной схемы АПК УД «Основы электротехники и электроники»;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК УД лабораторных исследований;
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов и измерительных приборов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей, чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК УД, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции).

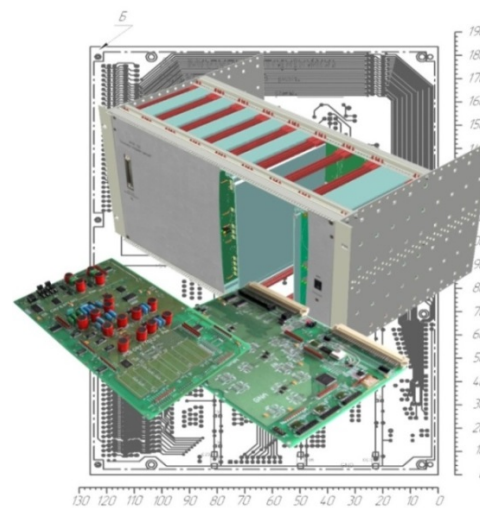


Рисунок А12 – Фрагмент ИЭТР – 3D-модель конструкции АПК УД «Основы электротехники и электроники»

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1,5 с
Пропускная способность	36 заданий в минуту
Масштабируемость	20 – 26 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	520 – 620 пользователей в сутки

АПК УД «СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ»

Функциональные возможности

Исследование методов экспериментального определения основных показателей аналоговых электронных устройств – амплитудных, амплитудно-частотных, фазочастотных и переходных характеристик, коэффициентов усиления и преобразования, линейных и нелинейных искажений, входных и выходных сопротивлений и емкостей; исследование влияния обратных связей на параметры и характеристики усилительных устройств; исследование усилительных и частотных свойств резистивного усилительного каскада; исследование способов коррекции частотных искажений и расширения полосы пропускания усилителей; исследование энергетических показателей и нелинейных искажений усилителей мощности в различных режимах их работы; исследование функциональных характеристик и параметров устройств аналоговой обработки сигналов на основе операционных усилителей: инвертирующего и неинвертирующего усилителей, дифференциатора, интегратора, компаратора, логарифмического усилителя, активных фильтров нижних и верхних частот.

Назначение

АПК УД «Схемотехника аналоговых электронных устройств» обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* по дисциплинам «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Усилительные устройства», «Устройства аналоговой обработки сигналов» и др., направленным на изучение схемотехники аналоговых электронных средств на основе транзисторов и интегральных операционных усилителей (рисунок А13).



Рисунок А13 – Общий вид АЛМ АПК УД «Схемотехника аналоговых электронных устройств»

АПК УД «Схемотехника аналоговых электронных устройств» позволяет выполнять такие экспериментальные исследования, как:

- «Исследование основных параметров и характеристик усилителей»;
- «Исследование влияния обратной связи на параметры и характеристики усилителя»;
- «Исследование резистивного каскада на биполярном транзисторе»;
- «Исследование транзисторного усилителя мощности»;

- «Исследование преобразователей аналоговых сигналов на операционных усилителях» и т.п.

При необходимости возможно изменение типономиналов и/или возможных конфигураций объектов исследования, а также увеличение количества лабораторных работ в соответствии с альтернативными вариантами методик проведения лабораторных исследований.

Комплекс виртуальных инструментов

Экспериментальное исследование аналоговых электронных устройств осуществляется с помощью комплекса виртуальных стендов и виртуальных измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (рисунок А14): генератора гармонических, импульсных, полигармонических и случайных сигналов, цифрового осциллографа, цифрового вольтметра, анализатора спектра, измерителя АЧХ и ФЧХ. Измерения АЧХ и ФЧХ возможны в ручном (по точкам) и автоматическом режимах. Предусмотрены экранные (курсорные) измерения по экспериментально полученным графикам.

Посредством виртуальных стендов лабораторных работ (рисунок А14) осуществляется взаимодействие пользователя с измерительными приборами и конфигурирование исследуемых объектных модулей. Обеспечивается автоматическое формирование отчета и сохранение результатов измерения в формате *MS Word*.

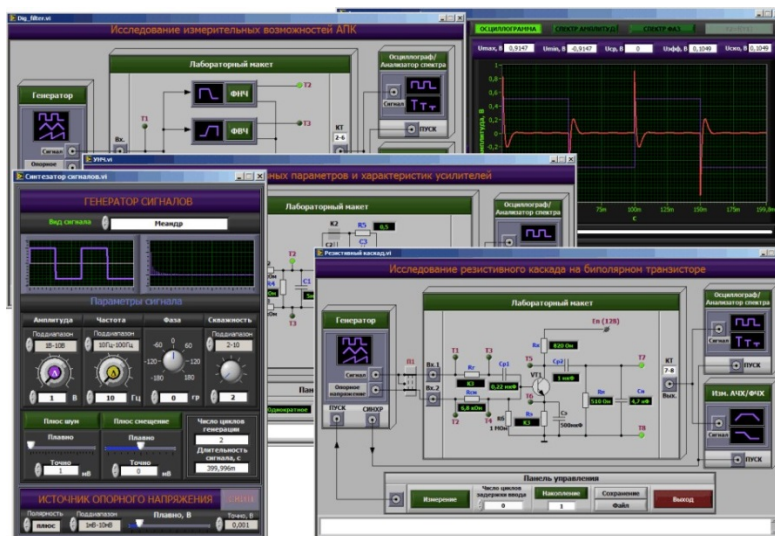


Рисунок А14 – Комплекс виртуальных лабораторных стендов и измерительных приборов АПК УД «Схемотехника аналоговых электронных устройств»

Математическое моделирование

Лабораторные экспериментальные исследования аналоговых электронных устройств осуществляются совместно с моделированием их работы на ПЭВМ с помощью систем сквозного проектирования электронных средств *Orcad*, *Altium Designer* и пр. Моделирование электронных устройств на ПЭВМ основывается на математических моделях, образующих их компоненты (рисунок А15).

Моделирование включает весь комплекс исследований, выполняемых экспериментально, а также дополнительно обеспечивает изучение температурных зависимостей и влияния технологического разброса параметров элементов на характеристики исследуемых устройств, которые невозможно исследовать средствами АПК УД.

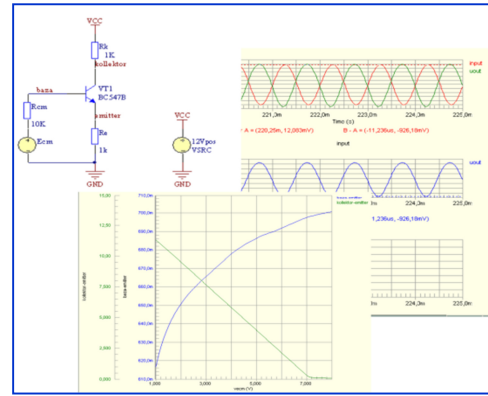


Рисунок А15 – Фрагмент моделирования работы каскада на биполярном транзисторе

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет получить студенту подробную информацию об АПК УД (рисунок А16):

- описание структурной схемы АПК УД;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК лабораторных работ;
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов и измерительных приборов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей, чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции и др.).

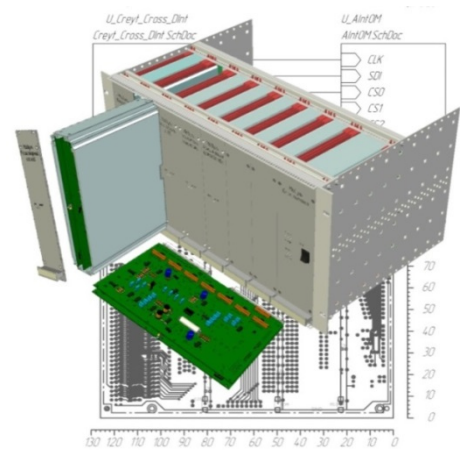


Рисунок А16 – Фрагмент ИЭТР – 3D-модель конструкции АЛМ АПК УД «Схемотехника аналоговых электронных устройств»

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1,4 с
Пропускная способность	39 заданий в минуту
Масштабируемость	22 – 28 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	520 – 670 пользователей в сутки

АПК УД «УСТРОЙСТВА ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ»

Функциональные возможности

АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов» характеризуется следующими функциональными возможностями:

- исследование характеристик трех типов одноконтурных входных цепей;
- исследование характеристик трех типов усилителей радиосигнала;
- исследование процесса детектирования ЧМ-сигналов 3-х типов частотных детекторов;
- исследование процесса частотной автоподстройки частоты (ЧАПЧ), основных характеристик и параметров систем ЧАПЧ;
- исследование процесса фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), основных характеристик и параметров систем ФАПЧ;
- исследование процесса автоматического регулирования усиления в усилителях промежуточной частоты, основных характеристик и параметров систем АРУ.

Назначение

АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов» обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* по дисциплинам «Устройства приема и обработки сигналов», «Прием и обработка сигналов», «Методы и устройства приема сигналов» и др., направленным на изучение принципов работы радиоприемных устройств (рисунок А17).



Рисунок А17 – Общий вид АЛМ АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов»

АПК УД «Устройство приема и обработки сигналов» позволяет выполнять такие экспериментальные исследования, как:

- «Исследование входной цепи»;
- «Исследование частотного детектора»;
- «Исследование фазовой автоподстройки частоты»;
- «Исследование автоматической регулировки усилением»;
- «Исследование усиления радиосигнала»;
- «Исследование частотной автоподстройки частоты».

При необходимости возможно изменение типонаименований и/или возможных конфигураций объектов исследования, а также увеличение количества лабораторных работ в соответствии с альтернативными вариантами методик проведения лабораторных исследований.

Комплекс виртуальных инструментов

Для исследования характеристик и параметров, а также процессов, протекающих в основных модулях устройств приема и обработки сигналов, используется комплекс виртуальных стендов и измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (рисунок А18). Измерительные приборы (генератор сигналов, вольтметр, осциллограф) интегрированы в панель управления АПК УД.

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для дальнейшего формирования отчетов.

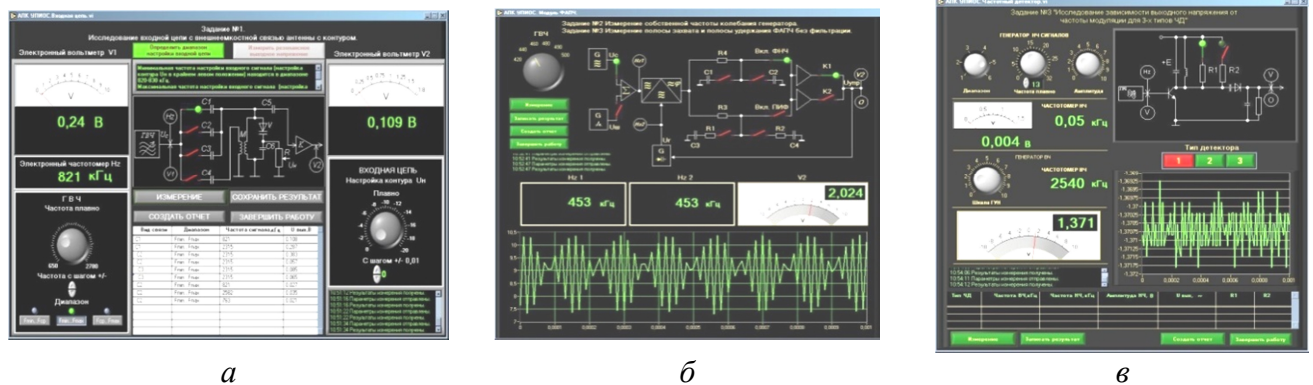


Рисунок А18 – Внешний вид комплекса виртуальных лабораторных стендов

АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов»: *а* – входная цепь; *б* – фазовая автоподстройка частоты; *в* – частотный детектор; *г* – автоматическая регулировка усилением

Математическое моделирование

Лабораторные исследования по изучению принципов работы основных модулей устройств приема и обработки сигналов средствами АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов» дополняются моделированием режимов их работы на ПЭВМ с помощью систем сквозного проектирования электронных средств *Orcad*, *Altium Designer* и пр. (рисунок А19).

Программные средства моделирования позволяют на основе математических моделей объектных модулей АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов» выполнить исследования различных характеристик, аналогичных измеряемым при лабораторных исследованиях, а кроме того, выполнить исследования с учетом технологического разброса параметров ЭРЭ и температурных воздействий, лежащих вне возможностей оборудования.

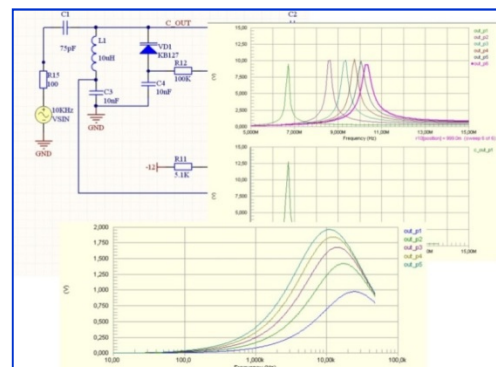


Рисунок А19 – Пример построения резонансных характеристик входных цепей с помощью системы сквозного проектирования электронных средств *Altium Designer*

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет получить студенту подробную информацию об АПК УД (рисунок А20):

- описание структурной схемы АПК УД;

- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК УД лабораторных исследований;

- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов;

- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей, чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК УД, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции и др.).

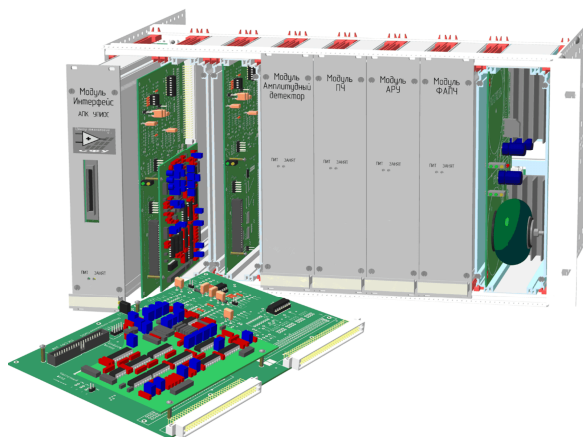


Рисунок А20 – Фрагмент ИЭТР – 3D-модель конструкции АПК УД «Устройства приема и обработки сигналов»

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1,5 с
Пропускная способность	36 заданий в минуту
Масштабируемость	20 – 26 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	520 – 620 пользователей в сутки

АПК УД «ТРАКТ УСИЛЕНИЯ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ»

Функциональные возможности

Исследование характеристик предварительного усилителя и усилителя низкой частоты: амплитудной и амплитудно-частотной характеристик, коэффициента усиления, ширины полосы пропускания, коэффициента нелинейных искажений, спектра выходного сигнала. При этом для предварительного усилителя возможно трехпозиционное регулирование амплитудно-частотной характеристики на трех частотах (50, 1000, 12000 Гц), установка трех значений коэффициента усиления.

Исследование выходного каскада усилителя низкой частоты: при нескольких типоминналах транзисторов выходного каскада, нескольких значениях тока покоя и различных сопротивлениях нагрузки; измерение напряжения в ряде контрольных точек для расчета коэффициентов электрической нагрузки ЭРЭ, используемых при анализе показателей надежности.

Исследование отказов: моделирование параметрических и структурных изменений в различных каскадах предварительного усилителя и усилителя низкой частоты.

Исследование совместной работы предварительного усилителя и усилителя низкой частоты.

Назначение

АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* по дисциплинам «Диагностика радиоэлектронной аппаратуры»; «Надежность радиоэлектронной аппаратуры»; «Системы автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры» и др. (рисунок А21).



Рисунок А21 – Общий вид АЛМ АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»

При необходимости возможно изменение типоминналов и/или перечня возможных конфигураций объектов исследования.

Комплекс виртуальных инструментов

Для исследования характеристик предварительного усилителя и УНЧ используется комплекс виртуальных стендов (рисунок А22) и измерительных приборов, разработанных в среде *LabVIEW* (измеритель АЧХ, генератор, осциллограф, анализатор спектра).

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для дальнейшего формирования отчетов.

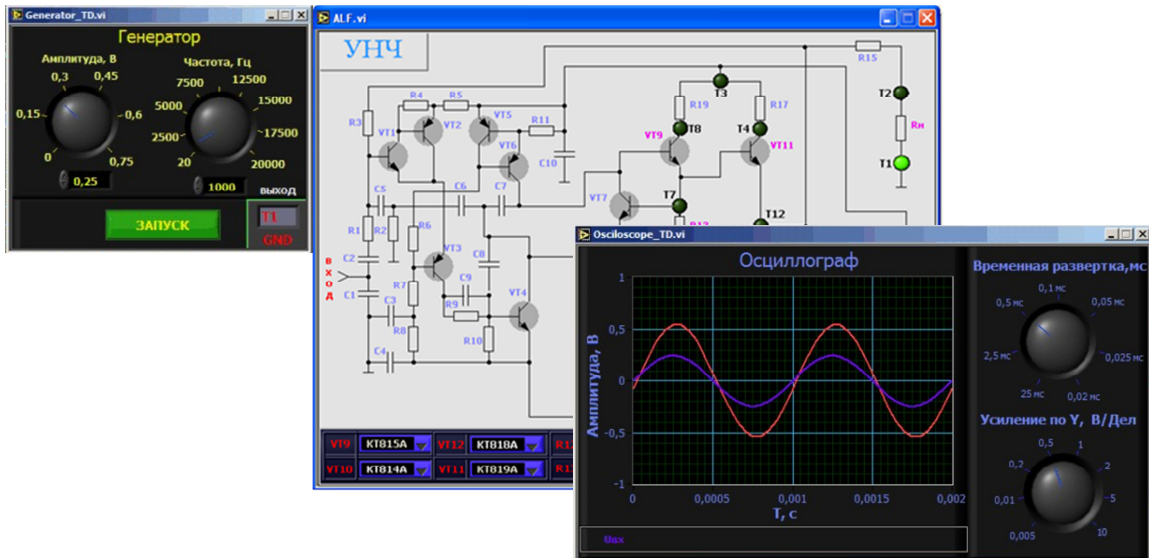


Рисунок А22 – Комплекс виртуальных лабораторных стендов и измерительных приборов АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»

Математическое моделирование

Программные средства моделирования позволяют на основе иерархической математической модели, сформированной средствами *OrCAD*, выполнить исследования различных характеристик, аналогичных измеряемым при лабораторных исследованиях, а кроме того, выполнить исследования с учетом технологического разброса параметров ЭРИ и температурных воздействий, лежащих вне возможностей оборудования (рисунок А23).

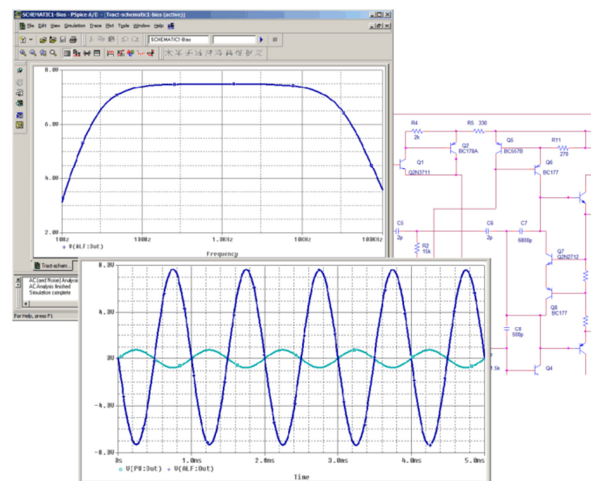


Рисунок А23 – Пример моделирования режимов работы усилителя низкой частоты средствами системы сквозного проектирования электронных средств *OrCAD*

Интерактивное электронное техническое руководство

Интерактивное электронное техническое руководство, подготовленное в системе *TG Builder (Technical Guide Builder)*, позволяет получить студенту подробную информацию об АПК УД (рисунок А24):

- описание структурной схемы АПК УД;
- описание функциональных возможностей, включая перечень выполняемых на основе АПК УД лабораторных работ;
- описание принципов работы с комплексом виртуальных стендов и измерительных приборов;
- комплект электронной конструкторской документации (схемы электрические принципиальные модулей, чертежи и 3D-модели конструктивных узлов АПК, 3D-модель конструкции АПК УД в целом с реализацией функций ее декомпозиции и др.).

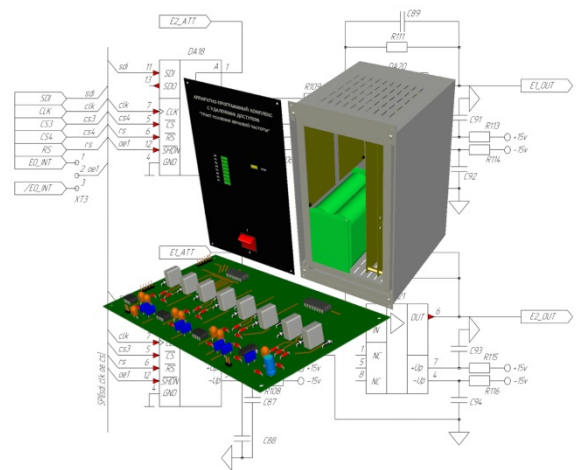


Рисунок А24 – Фрагмент ИЭТР – 3D-модель конструкции АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	1,4 с
Пропускная способность	39 заданий в минуту
Масштабируемость	22 – 28 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	520 – 670 пользователей в сутки

АПК УД «ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ»

Функциональные возможности

Использование АПК УД «Электропроводность биологических объектов» дает возможность исследовать частотные зависимости полного, активного и реактивного сопротивлений тканей образцов биологических объектов, имеющих различную степень термообработки.

Назначение

АПК УД «Электропроводность биологических объектов» (рисунок А25) обеспечивает выполнение лабораторных исследований в многопользовательском режиме с удаленным доступом по сетям *Internet/Intranet* в рамках подготовки обучаемых по направлениям «Физика» и «Биология».

Образцы исследуемых биологических объектов размещаются в специальных кюветах.

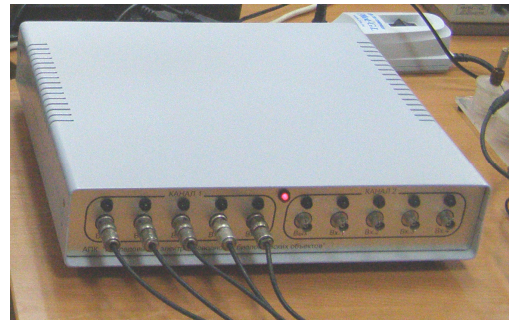


Рисунок А25 – Общий вид АЛМ АПК УД «Электропроводность биологических объектов»

Комплекс виртуальных инструментов

Выполнение лабораторных исследований электропроводности биологических объектов осуществляется посредством взаимодействия обучаемого с АПК УД через виртуальный лабораторный стенд, разработанный в среде *LabVIEW* (рисунок А26).

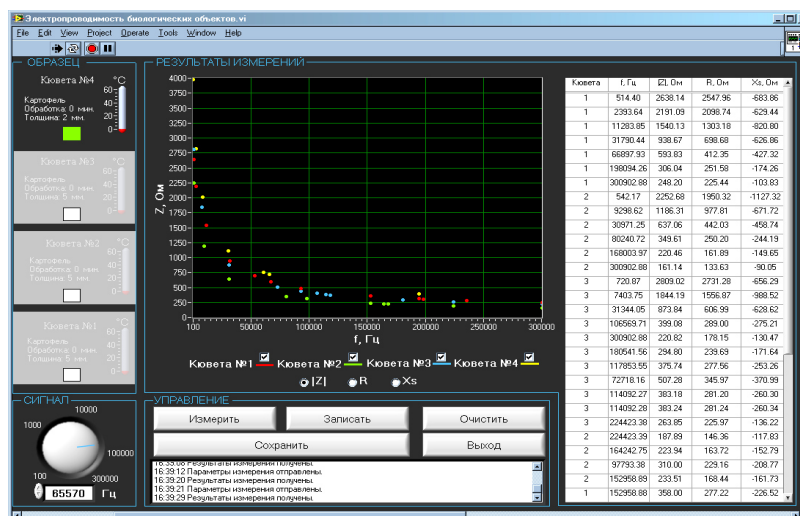


Рисунок А26 – Виртуальный лабораторный стенд АПК УД «Электропроводность биологических объектов»

Программное обеспечение виртуального стенда позволяет сохранять результаты измерений в формате *MS Word* для дальнейшего формирования отчетов.

Математическое моделирование

Комплексный характер импеданса биологических объектов средствами математического моделирования исследуется на основе ряда эквивалентных электрических схем замещения и сравнивается с полученными результатами экспериментальных исследований (рисунок А23).

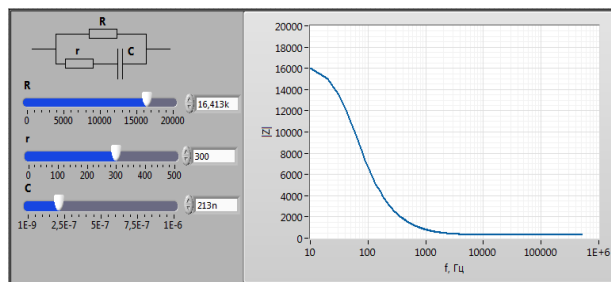


Рисунок А23 – Пример моделирования импеданса биологических объектов на основе эквивалентной электрической схемы замещения

Основные технические характеристики

Техническая характеристика	Значение
Среднее время выполнения заданий	2 с
Пропускная способность	25 заданий в минуту
Масштабируемость	14 – 18 одновременно работающих терминалов пользователей
Максимальная нагрузочная способность	330 – 430 пользователей в сутки

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВНЕДРЕНИЕ ОСНОВНЫХ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
и международному сотрудничеству

Верховен С. В.
«20»



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Комарова В. А.

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в рамках диссертационной работы Комаровым В. А. методика проектирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем и комплекс универсальных компьютерных измерительных приборов (синтезатор сигналов, анализатор сигналов, измеритель амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик) внедрены в практику проектирования и разработки систем автоматизированного лабораторного практикума с удаленным доступом регионального инновационного центра «Центр технологий *National Instruments*» при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

С использованием указанных методики и комплекса универсальных компьютерных измерительных приборов, в центре были разработаны следующие аппаратно-программные комплексы с удаленным доступом: «Тракт усиления звуковой частоты», «Электроника», «Схемотехника аналоговых электронных устройств». Перечисленные АПК УД используются в учебном процессе Института инженерной физики и радиоэлектроники в следующих курсах: «Электроника», «Техническая диагностика и надежность авиационного радиоэлектродоборудования», «Системы автоматизированного проектирования и конструирования измерительных приборов». Перечисленные комплексы введены в промышленную эксплуатацию по сетям Internet/Intranet и доступны по адресам: www.alpsib.ru, www.lab.sfu-kras.ru.

Директор РИЦ
«Центр технологий *National Instruments*»

Дектерев М. Л.
_____ Дектерев М. Л.

Зав. отделением «Радиотехника»
Института инженерной физики
и радиоэлектроники

Сушкин И. Н.
_____ Сушкин И. Н.

А.В. САРГАЕВ



УТВЕРЖДАЮ
Ректор МИЭМ, д.т.н., проф.
Быков Д. В.
2008 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Комарова Владимира Александровича

Комиссия в составе: председатель Пожидаев Е. Д. , члены комиссии: Кечиев Л.Н. , Тумковский С.Р.,

составили акт о том, что системы автоматизированного лабораторного практикума, построенные на основе разработанных в рамках диссертационной работы аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом «Тракт усиления звуковой частоты» и «Электроника» внедрены в систему электронного обучения факультета «Информатики и телекоммуникаций» Московского государственного института электроники и математики по направлениям 551100 и 654300 – «Проектирование и технология электронных средств», что позволило реализовать в рамках системы электронного обучения проведение лабораторных исследований в режиме многопользовательского удаленного доступа по сетям Internet/Intranet.

Председатель комиссии
Декан ФИТ, д.т.н., профессор

Пожидаев Е. Д.

Члены комиссии:

Зав. кафедрой РТУиС, д.т.н., профессор

Кечиев Л.Н.

Зав. кафедрой ИТАС, д.т.н., доцент

Тумковский С.Р.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «Фестон»

А.С. Яралова

2009 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ***результатов диссертационных исследований**Комарова Владимира Александровича*

Настоящим актом подтверждается, что в рамках выполнения хозяйственной темы № 20171 «Разработка сетевого аппаратно-программного и сетевых программных комплексов для обеспечения учебно-научной деятельности по инженерно-физическим специальностям» от 1 октября 2009 г. между ООО «Фестон» и Федеральное государственное образовательное высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» в процессе создания сетевого учебно-исследовательского аппаратно-программного комплекса «Полупроводниковые приборы» были использованы, разработанные Комаровым В. А., методика проектирования и модель режимов функционирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем. Вышеперечисленные методика и модель позволили сократить сроки разработки, за счет выявления на этапе проектирования требований к основным функциональным узлам и обеспечить работу с комплексом по сети *Internet/Intranet* до ста пользователей одновременно.

Менеджер-интегратор
должность


подпись

/Т.В. Гнусова/
расшифровка подписи




АКТ ВНЕДРЕНИЯ

*Аппаратно-программного комплекса с удаленным доступом (АПК УД)
«Полупроводниковые приборы» в учебный процесс
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»*


Настоящим актом подтверждается, что промышленный образец многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы (МРИУС) автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований «Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом «Полупроводниковые приборы» внедрен и успешно используется в учебном процессе физического факультета Южного федерального университета как компонент инновационной учебно-исследовательской базы для проведения лабораторных работ и практических занятий в рамках учебных дисциплин по направлению подготовки студентов «Физика» (03.03.02).

Аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом (АПК УД) «Полупроводниковые приборы» обеспечивает возможность одновременной работы до 40 пользователей с индивидуальными параметрами и траекторией проводимых исследований, что позволило в период с 2010 по 2018 год реализовать возможность персонализированного выполнения лабораторных работ и практических занятий в режиме удаленного доступа для студентов физического факультета ЮФУ с использованием АПК УД «Полупроводниковые приборы».

Декан физического факультета ЮФУ
д-р физ.-мат. наук, проф.

 М. Б. Мануилов

И. о. зав. кафедрой общей физики
д-р физ.-мат. наук, проф.

 А. С. Богатин



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»

М. И. Гладышев
М. И. Гладышев
« 11 » июня

2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационных исследований
Комарова Владимира Александровича
в научно-исследовательскую работу и учебный процесс
Института инженерной физики и радиоэлектроники
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Настоящим актом подтверждается, что на основе разработанных Комаровым В.А. компонентов методологии проектирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС) (*методика проектирования; комплекс методик для ряда отдельных этапов процесса проектирования; математические модели динамики функционирования и реализующие их адаптируемые программные модули; методы повышения оперативности функционирования; базовые структуры аппаратного построения; алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса; подпрограммы спектрально-весаго измерения параметров сигналов и базовые унифицированные виртуальные приборы на основе многофункциональных устройств сбора данных; базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя*) в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских созданы промышленные образцы МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований – аппаратно-программные комплексы с удаленным доступом (АПК УД) «Тракт усиления звуковой частоты», «Электроника», «Основы теории цепей», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Устройства приема

и обработки сигналов», «Полупроводниковые приборы», «Электропроводность биологических объектов».

Применение указанных компонентов методологии позволило в процессе разработки новых образцов МРИУС сократить на 25-35% общие сроки проектирования за счет унификации подходов и технических решений компонентов их аппаратно-программного обеспечения; повысить число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей на 20-30% для АПК УД «Электроника», «Основы теории цепей», «Схемотехника аналоговых электронных устройств» и до 2,5 раз для АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты» за счет применения специализированных алгоритмов измерения параметров и характеристик объектов управления и контроля, а также целевой модификации реализуемых алгоритмов диспетчеризации в соответствии с разработанными методами повышения оперативности функционирования МРИУС.

Внедрение предложенной Комаровым В. А. методики адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации в процессе опытной и промышленной эксплуатации АПК УД «Электроника» и «Тракт усиления звуковой частоты» в рамках учебного процесса ИИФиРЭ позволило на основе фиксируемых и накапливаемых в процессе эксплуатации статистических данных о параметрах процесса их функционирования оперативно модифицировать соответствующие компоненты аппаратно-программного обеспечения в целях поддержания на требуемом уровне их технических параметров.

Разработанные АПК УД обеспечивают:


- необходимую для учебного процесса вариативность и информативность экспериментальных исследований, выполняемых на их основе;
- снижение накладных расходов на техническое обслуживание специализированного экспериментального оборудования и затрат на содержание специально оборудованного аудиторного фонда;
- повышение академической мобильности обучаемых посредством многократного расширения возможных локаций удаленного доступа к экспериментальному оборудованию;
- привитие обучаемым навыков работы с современными цифровыми технологиями, актуальными в рамках будущей профессиональной деятельности.

Вышеперечисленные АПК УД (за исключением АПК УД «Полупроводниковые приборы» и «Электропроводность биологических объектов», которые используются в ЮФУ и ИФБиТ СФУ) с 2010 года использовались в ИИФиРЭ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» в процессе обучения студентов (в рамках лекционных курсов, практических и лабораторных занятий, курсового и дипломного проектирования) по направлениям подготовки 11.03.01 и 11.04.01 «Радиотехника» (*бакалавриат и магистратура*), 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (*бакалавриат*), 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (*бакалавриат*), 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» (*бакалавриат*), 12.03.01 и 12.04.01 «Приборостроение» (*бакалавриат и магистратура*), а также по специальностям 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» и 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

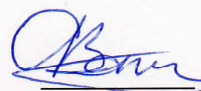
Директор ИИФиРЭ
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
д-р физ.-мат. наук, профессор

 Г.С. Патрин

Заведующий базовой кафедрой
«Радиоэлектронная техника
информационных систем»,
канд. техн. наук, доцент

 А. В. Гребенников

Заведующий кафедрой
«Радиоэлектронные системы»,
канд. техн. наук, доцент

 Ф. В. Зандер

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИФБиТ
ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,



канд. физ.-мат. наук, профессор
В. А. Сапожников

01 _____ 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационных исследований

Комарова Владимира Александровича

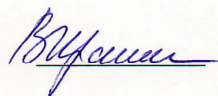
в учебный процесс Института фундаментальной биологии и биотехнологии
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Настоящим актом подтверждается, что образец многопользовательской распределенной измерительно-управляющей системы (МРИУС) – аппаратно-программный комплекс с удаленным доступом (АПК УД) «Электропроводность биологических объектов», созданный с применением разработанных в рамках диссертационных исследований Комаровым В.А. компонентов методологии проектирования МРИУС (методика проектирования МРИУС, комплекс базовых унифицированных виртуальных приборов, алгоритмы диспетчеризации, базовые структуры аппаратного построения и пр.), внедрен и успешно используется с 2011 года в качестве инновационного инструментария для выполнения научных и учебных экспериментальных исследований в учебном процессе ИФБиТ ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» при подготовке бакалавров, обучающихся по направлениям 030302 «Физика» и 060301 «Биология».

Применение вышеперечисленных компонентов предложенной Комаровым В.А. методологии позволило обеспечить для обучаемых

возможность удаленной работы на основе уникального экспериментального оборудования с индивидуальными параметрами и траекторией проводимых исследований с различных локаций доступа, а также обеспечить приемлемое время выполнения заданий (5-8 секунд) в интерактивном диалоговом режиме при работе с одним экземпляром оборудования не менее 15 пользователей одновременно за счет применения разработанного метода повышения оперативности функционирования МРИУС.

Заведующий кафедрой биофизики,
д-р биолог. наук, профессор



В.А. Кратасюк

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ



123458, Россия, Москва, ул. Таллинская, д. 34, тел. 8 (495) 772-95-90 *15173, факс: 8 (495) 916-88-29, e-mail: miem@hse.ru, miem.hse.ru

Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова

№ _____

на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора МИЭМ НИУ ВШЭ,
д.т.н., профессор

Тумковский С.Р.
14 января 2019 г.

АКТ

*об использовании результатов диссертационных исследований
Комарова Владимира Александровича
в учебном процессе Департамента компьютерной инженерии Московского
института электроники и математики им. А.Н. Тихонова ФГАОУ ВО Национальный
исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

Настоящим актом подтверждается, что разработанные в ходе проведенных диссертационных исследований Комаровым В. А. компоненты методологии проектирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС) (методика проектирования, информационная модель обобщенного проектного решения, базовые структуры аппаратного построения, математические модели динамики функционирования, методика оценки технических характеристик) и методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации использовались в учебном процессе Департамента компьютерной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ в рамках магистерской программы «Компьютерные системы и сети» по направлению подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника».

Разработанные Комаровым В.А. компоненты методологии проектирования и предложенная методика адаптации МРИУС позволили раскрыть в рамках лекционного курса и научно-исследовательских семинаров принципы создания и функционирования специализированных аппаратно-программных комплексов, в т. ч. на основе концепции Интернета вещей для ряда областей прикладного применения, а также способствовали внедрению комплекса цифровых инноваций в образовательный процесс в целях адаптации обучаемых к новым профессиям и

бизнес-моделям предоставления услуг, базирующихся на современных цифровых информационно-коммуникационных технологиях.

Возможное применение МРИУС в качестве ИКТ-инструментария для организации дистанционных экспериментальных исследований в рамках современной цифровой образовательной среды позволяет сделать ее высокотехнологичной посредством возможности реализации педагогических технологий контекстного обучения для обеспечения практико-ориентированной подготовки обучаемых в области техники и технологий.

Академический руководитель ОП
«Компьютерные системы и сети»,
д.т.н., профессор



А.В. Вишнеков

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора

по электрическому проектированию

и системам управления КА

АО «ИСС»

канд. техн. наук

С. Г. Кочура

27 12 2018 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ***результатов научной работы Владимира Александровича Комарова*

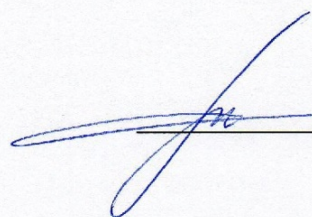
Настоящим актом подтверждается то, что результаты исследований Комарова В. А. использовались в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» в процессе испытаний блока управления (БУ) и блока интерфейсного (БИ) бортового комплекса управления КА, далее бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космических аппаратов (КА).

В результате исследований Комаровым В. А. было разработано техническое решение аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения (ИМС) для БРЭА КА в целях обеспечения опережающего тестирования бортового программного обеспечения (ПО), входящего в их состав вычислительного модуля, исключающее необходимость изготовления дополнительных комплектов блоков ИМС соответствующей БРЭА КА. В процессе разработки использовались разработанные Комаровым В. А. математические модели динамики функционирования многопользовательских измерительно-управляющих систем (МРИУС), методика оценки параметров сценария диалога в МРИУС, базовые структуры аппаратного построения МРИУС.

Применение перечисленных выше результатов исследований Комарова В. А. позволило обосновать выбор проектного решения архитектуры эмулятора ИМС, которое характеризуется минимальной аппаратной избыточностью, оперативностью программного реконфигурирования и обеспечивает требуемое время реакции, необходимое для выполнения условий тестирования бортового ПО вычислительного модуля соответствующей БРЭА КА в режиме реального времени. Разработанная архитектура позволяет сократить до 50% временных затрат на создание аппаратно-программных эмуляторов ИМС для вновь разрабатываемой БРЭА КА.

Использование разработанного с участием Комарова В. А. образца аппаратно-программного эмулятора ИМС в процессе наземной экспериментальной отработки позволяет расширить в 2-3 раза функциональные возможности проводимых испытаний и перечень обрабатываемых режимов работы БРЭА КА, а также сократить затраты на материально-техническое обеспечение испытаний и общую длительность стадии разработки соответствующей БРЭА КА в целом.

Заместитель начальника отдела
проектирования и испытаний
бортовой радиоэлектронной
аппаратуры систем управления КА
канд. техн. наук.

 И.Н. Тульский





Акционерное общество
«Научно-производственное
предприятие «Радиосвязь»
(АО «НПП «Радиосвязь»)

ул. Декабристов, д. 19, Красноярск, 660021
Тел. (391) 204-11-02,
тел./факс (391) 204-12-38
E-mail: kniirs1@mail.kts.ru
ОКПО 44589548, ОГРН 1122468072231
ИНН/КПП 2460243408/246001001

Утверждаю

Генеральный директор
АО «НПП «Радиосвязь»
доктор технических наук

Р.Г. Галеев

2019 г.



А К Т

о реализации научных результатов диссертационных исследований
Комарова Владимира Александровича в работах, проведенных
АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск)

Комиссия в составе:

председателя комиссии:

заместителя генерального директора по научно-технической работе –
технического директора Богатырева Евгения Владимировича
(должность, ФИО)

членов комиссии:

заместителя технического директора Тереховича Владимира Владимировича
(должность, ФИО)

заместителя технического директора Фролова Андрея Николаевича
(должность, ФИО)

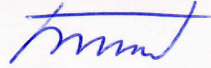
настоящим Актом подтверждает, что результаты диссертационных исследований Комарова В.А. использовались в научно-исследовательской работе АО «НПП «Радиосвязь».

Ряд функциональных компонентов разработанной Комаровым В. А. имитационной модели многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС), реализованных в виде унифицированных программных модулей, были использованы при выполнении НИР «Имитация» с целью создания математических моделей статистической оценки зон поражения и точности результатов имитационных стрельб, реализуемых на основе угломерной навигационной аппаратуры

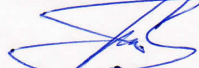
потребителей (УНАП). Это позволило в ходе исследования вопросов создания навигационно-информационных систем для проведения учений артиллерийских подразделений:

- сократить не менее чем на 35% сроки разработки и программной реализации соответствующих математических моделей систем имитационных стрельб для нескольких видов вооружения и военной техники;
- на основе математических моделей, реализованных при непосредственном участии Комарова В. А., выполнить оценку требований к допустимым значениям погрешности определения УНАП углов тангажа и азимута стволов орудий в соответствии с заданными параметрами рассеяния.

Председатель комиссии:

 Е.В. Богатырев
«29» 05 2019 г.

Члены комиссии:

 В.В. Терехович
«29» 05 2019 г.

 А.Н. Фролов
«29» 05 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора
по разработке космических систем,
общему проектированию
и управлению космическими аппаратами

АО «ИСС»

канд. техн. наук

А. В. Кузовников



14

06

2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационных исследований

Комарова Владимира Александровича

Настоящим актом подтверждается то, что результаты диссертационных исследований Комарова В. А. использовались в научно-исследовательской работе АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» в процессе формирования опережающего научно-технического задела в области создания космических аппаратов и систем:

1. Программное обеспечение «Программа расчета характеристик оперативности многопользовательских систем испытаний земных станций спутниковой связи» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660103), реализующее предложенный Комаровым В. А. алгоритм имитационного моделирования многопользовательских распределенных измерительно-управляющих систем (МРИУС), использовалось в процессе разработки методических подходов оценки эффективности применения МРИУС при проведении квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи (ЗССС) для различных конфигураций бортовых ретрансляционных комплексов космических аппаратов. Применение разработанного с участием Комарова В. А. программного обеспечения позволило:

– определить средствами математического моделирования требования к длительностям функциональных операций, выполняемых оборудованием

измерительной цепи МРИУС, в соответствии с заданным числом тестируемых ЗССС и заданными значениями показателей оперативности реакции системы на запросы операторов рабочих мест.

– создать ряд новых технических решений МРИУС испытаний ЗССС с улучшенной пропускной способностью (патент РФ №2681516 «Система испытаний земных станций спутниковой связи», заявка на изобретение №2018122876 «Способ функционирования системы испытаний земных станций спутниковой связи»).

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, изложенные в монографии: «Компьютерные спектральные измерения параметров сигналов / Глинченко А.С., Комаров В.А. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т. 2010. – 176 с.», а также разработанные отдельные программные модули, реализующие алгоритмы спектрально-весаго измерения параметров сигналов, применялись:

– в ходе прикладных научных исследований, проводимых АО «ИСС» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы»;

– в ходе научно-исследовательских работ по разработке макета высокоточной бортовой аппаратуры приема и обработки сигналов

Использование результатов диссертационных исследований Комарова В. А. позволило синтезировать новое техническое решение отдельных функциональных узлов бортовой аппаратуры приема и обработки сигналов с улучшенной оперативностью контроля их работоспособности, которое защищено патентом РФ №2551901 «Радиоприемное устройство аппаратуры потребителей сигналов глобальных спутниковых навигационных систем».

Начальник управления проектирования
космических систем и комплексов связи,
ретрансляции и специального назначения

 П. В. Семкин

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе и инновациям

Лоцилов А. Г.

/ _____ /

М.П.

“ 12 ” 03 2021 г.

№ БРС**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы на соискание степени
доктора технических наук в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники
Комарова Владимира Александровича

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Ганджа Т.В., д-р техн. наук, профессор кафедры КСУП

члены комиссии:

Кочергин М.И., канд. техн. наук, доцент кафедры КСУП

Григорьева Т.Е., канд. техн. наук, доцент кафедры КСУП

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Комарова Владимира Александровича «Автоматизированные системы экспериментальных исследований с временным разделением аппаратно-программных ресурсов», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, внедрены в учебный процесс Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по направлениям обучения «Информатика и вычислительная техника», «Управление в технических системах».

Разработанные Комаровым В. А. *методы, математические модели, методическое и программное обеспечение* использовались в рамках лекционных курсов, а также в рамках курсового проектирования и научно-

исследовательской работы студентов. В частности данные результаты позволили:

- обучить студентов современным средствам и технологиям испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры, применяемым в процессе производства космических аппаратов и систем;

- раскрыть в рамках лекционных занятий принципы создания и функционирования специализированных аппаратно-программных комплексов для организации сервиса доступа к высокотехнологичному экспериментальному оборудованию «Лаборатория как сервис» (*Laboratory as a service*) в рамках реализации экономической модели совместного потребления (*sharing economy*);

- увеличить количество альтернативных вариантов реализации, расширить функциональные возможности математического моделирования, а также сократить сроки разработки систем дистанционного управления техническими объектами и автоматизированных систем экспериментальных исследований, создаваемых для различных прикладных областей (испытания, научный и учебный эксперимент и др.) в рамках курсового проектирования и научно-исследовательской работы студентов.

Председатель комиссии:



подпись

Ганджа Т.В.

« 11 » 03 2021 г.

Члены комиссии:



подпись

Кочергин М.И.

« 11 » 03 2021 г.



подпись

Григорьева Т.Е.

« 11 » 03 2021 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ДИПЛОМЫ, ПАТЕНТЫ



Всероссийский конкурс
«ИНЖЕНЕР ГОДА»

ДИПЛОМ ЛАУРЕАТА

ВРУЧЕН

Комарову Владимиру Александровичу

по итогам конкурса по версии
«Профессиональные инженеры» в номинации

Приборостроение и диагностика



Председатель жюри конкурса:



Ю.В. Гуляев
академик РАН,
член президиума РАН

25 января 2016 г.

№ 16–2732

г. Москва

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2406140

**СПОСОБ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО
УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009136287

Приоритет изобретения 30 сентября 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 декабря 2010 г.

Срок действия патента истекает 30 сентября 2029 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 406 140** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
G06G 7/48 (2006.01)
G01R 31/00 (2006.01)
G06F 19/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2009136287/07, 30.09.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.09.2009

(45) Опубликовано: 10.12.2010 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: Зимин А.М. Автоматизированный
лабораторный практикум с удаленным
доступом в техническом университете //
Информационные технологии. - 2002, №2,
с.39-43. RU 2315275 C1, 20.01.2008. WO
03/083690 A1, 19.10.2003. JP 7333277,
20.12.1995.

Адрес для переписки:

660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26,
СФУ, отдел промышленной собственности

(72) Автор(ы):

Глинченко Александр Семенович (RU),
Комаров Владимир Александрович (RU),
Сарафанов Альберт Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Сибирский федеральный университет"
(СФУ) (RU)

RU 2 4 0 6 1 4 0 C 1

RU 2 4 0 6 1 4 0 C 1

(54) СПОСОБ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНО УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области
информационно-измерительной техники и
может быть использовано для построения
информационно-измерительных и
измерительно-управляющих систем или систем
автоматизированного лабораторного
практикума с удаленным доступом.
Технический результат - уменьшение времени
обслуживания пользователей и повышение
пропускной способности системы. Уменьшение
времени обслуживания пользователей и
повышение пропускной способности системы
достигаются за счет того, что в способе
тестирования территориально удаленных
объектов, включающем передачу задания на
тестирование объекта с персональной ЭВМ

пользователя через компьютерную сеть на
сетевой сервер системы, запись его в очередь
заданий других пользователей, передачу
очередного задания с сетевого сервера на
измерительный сервер, сопряженный с
тестируемым объектом, измерение под его
управлением значений откликов объекта на
выводимое тестовое воздействие и передачу
результатов измерения через сетевой сервер на
персональную ЭВМ пользователя,
дополнительно с очередным заданием с
сетевого сервера на измерительный передают
текущее значение числа заданий в очереди и
вычисляют адаптивное к нему число
измерительных циклов, определяющих время
измерения для данного задания. 1 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2468420

СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011125878

Приоритет изобретения **23 июня 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 ноября 2012 г.**

Срок действия патента истекает **23 июня 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 468 420** ⁽¹³⁾ **С1**(51) МПК
G06F 15/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011125878/08, 23.06.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.06.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.06.2011

(45) Опубликовано: 27.11.2012 Бюл. № 33

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2406140 С1, 10.12.2010. RU 2256296
С2, 10.07.2005. US 6917976 В1, 12.07.2005. US
6954800 В2, 11.10.2005.

Адрес для переписки:

660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26,
СФУ, отдел правовой охраны и защиты
интеллектуальной собственности (ОПОиЗИС)

(72) Автор(ы):

**Комаров Владимир Александрович (RU),
Глинченко Александр Семенович (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Сибирский федеральный университет"
(СФУ) (RU)**(54) СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-
УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области информационно-измерительной техники и может быть использовано для построения распределенных измерительно-управляющих систем с удаленным доступом к объектам исследования и средствам управления и измерения с повышенной пропускной способностью. Технический результат -

повышение пропускной способности системы. Он достигается за счет сокращения среднего времени обслуживания поблочно формируемой очереди заданий путем оптимизации порядка выбора их в пределах блока и исполнения исходя из минимально необходимого времени на изменение состояния объекта относительно его текущего состояния. 1 ил.

RU 2 4 6 8 4 2 0 С 1

RU 2 4 6 8 4 2 0 С 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2481621

СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Патентообладатель(ли): *Комаров Владимир Александрович (RU),
Глинченко Александр Семенович (RU), Сарафанов Альберт
Викторович (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2012111637

Приоритет изобретения 26 марта 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 10 мая 2013 г.

Срок действия патента истекает 26 марта 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 481 621** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G06F 15/16 (2006.01)
G06F 17/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012111637/08, 26.03.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.03.2012

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.03.2012

(45) Опубликовано: 10.05.2013 Бюл. № 13

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: МАСЛОВ С.И. Пособие для системы
повышения квалификации. Информатизация
образования: направления, средства,
технологии. - М.: МЭИ, 2004, [он-лайн],
[Найдено 14.11.2012]. Найдено в Интернет:
URL: <<http://www.twirpx.com/file/775651/>>
с.488-501. US 7505891 В2, 17.03.2009. US
2005/0021712 А1, 27.01.2005. RU 2248612 С1,
20.03.2005.

Адрес для переписки:

662501, Красноярский край, г. Сосновоборск,
ул. Солнечная, 23, кв.51, В.А. Комарову

(72) Автор(ы):

Комаров Владимир Александрович (RU),
Глинченко Александр Семенович (RU),
Сарафанов Альберт Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Комаров Владимир Александрович (RU),
Глинченко Александр Семенович (RU),
Сарафанов Альберт Викторович (RU)

RU 2 4 8 1 6 2 1 C 1

RU 2 4 8 1 6 2 1 C 1

(54) СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-
УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области
информационно-измерительной техники и
может быть использовано для построения
распределенных информационно-
измерительных и измерительно-управляющих
систем с удаленным доступом к объектам
исследования, средствам управления и
измерения с многопользовательским
удаленным доступом. Технический результат -
повышение пропускной способностираспределенной измерительно-управляющей
системы с более чем одним объектом,
подлежащим исследованию. Указанный
технический результат достигается за счет
сокращения среднего времени обслуживания
пользователей путем распараллеливания во
времени операций управления и измерения по
очередному и следующему заданиям,
относящимся к разным объектам. 3 з.п. ф-лы, 4
ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2575410

СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014124254

Приоритет изобретения 16 июня 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 21 января 2016 г.

Срок действия патента истекает 16 июня 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 575 410** (13) **C2**(51) МПК
G06F 15/16 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014124254/08, 16.06.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.06.2014

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 16.06.2014

(43) Дата публикации заявки: 27.12.2015 Бюл. № 36

(45) Опубликовано: 20.02.2016 Бюл. № 5

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2468420 C1, 27.11.2012. М.А. ПАНЬШЕНСКОВ, "Эффективный план распределения неограниченно делимых заданий в среде MapReduce". В: "Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. прикладная математика. Информатика. Процессы управления", выпуск 2, 2011. RU 2481621 C1, 10.05.2013. US 7505891 B2, 17.03.2009. US 2005/0021712 A1, 27.01.2005.

Адрес для переписки:
660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26, СФУ, ОПОиЗИС

(72) Автор(ы):
Комаров Владимир Александрович (RU),
Глинченко Александр Семенович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)

RU 2 5 7 5 4 1 0 C 2

RU 2 5 7 5 4 1 0 C 2

(54) СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

(57) Реферат:
Изобретение относится к области информационно-измерительной техники. Технический результат - уменьшение среднего времени реакции системы на запросы пользователей. Способ функционирования распределенных измерительно-управляющих систем включает формирование на персональной ЭВМ пользователя задания на управление объектом и измерение, передачу задания с ЭВМ через компьютерную сеть на сетевой сервер системы, запись его в очередь заданий других пользователей в порядке их поступления, разбиение заданий на последовательно выполняемые блоки с фиксированным числом заданий в блоке, выбор и передачу заданий из

очередного блока на измерительно-управляющий сервер, сопряженный с объектом, формирование с его помощью сигналов управления и при необходимости - сигналов тестирования, вывод их через средства сопряжения на объект, проведение измерений и передачу их результатов через сетевой сервер на ЭВМ, причем на измерительно-управляющем сервере фиксируют время выполнения ранее не выполнявшихся заданий, заносят его в массив значений времени выполнения заданий на сетевом сервере, а задания из очередного блока для передачи на измерительно-управляющий сервер выбирают в порядке возрастания времени их выполнения. 3 ил.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2620596

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Патентообладатель: *Акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва" (RU)*

Авторы: *Комаров Владимир Александрович (RU),
Паздерин Сергей Олегович (RU)*

Заявка № 2015123000

Приоритет изобретения 16 декабря 2015 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 29 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 декабря 2035 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2681516

Система испытаний земных станций спутниковой связи

Патентообладатель: *Акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва* (RU)

Автор: *Комаров Владимир Александрович* (RU)

Заявка № 2017140366

Приоритет изобретения 20 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 марта 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 20 ноября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2695539

СПОСОБ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ИСПЫТАНИЙ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ
СВЯЗИ

Патентообладатель: *Акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М. Ф. Решетнёва* (RU)

Авторы: *Комаров Владимир Александрович (RU), Паздерин Сергей Олегович (RU), Королев Дмитрий Олегович (RU)*

Заявка № 2018122876

Приоритет изобретения 22 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 22 июня 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

