



**КОМАРОВ ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

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

**Специальность**

**2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (промышленность)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Сарафанов Альберт Викторович**

**Официальные оппоненты:** **Мышляев Леонид Павлович**  
доктор технических наук, профессор,  
директор ООО «Научно-исследовательский центр систем управления», г. Новокузнецк

**Мурыгин Александр Владимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Информационно-управляющие системы» Сибирского университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск

**Горюнов Алексей Германович**  
доктор технических наук, доцент,  
руководитель отделения ядерно-топливного цикла Национального исследовательского Томского политехнического университета

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Защита диссертации состоится «21» октября 2021 г. в 15:15 на заседании диссертационного совета 24.2.415.02 при ТУСУРе по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на официальном сайте по адресу: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/4zbuvm3x>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

В качестве одной из технологий, которые основаны на синергетическом эффекте при интеграции ряда современных достижений научно-технического прогресса и направлены на решение проблемы ресурсного обеспечения прикладных экспериментальных исследований в рамках процессов интенсификации производств (в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров), 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: 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. Lazowska, М. П. Цапенко, П. П. Орнатского, Т. М. Алиева, Э. И. Цветкова и др. 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. Направление повышения пропускной способности МРИУС посредством управления последовательностью выполнения заданий с учетом аспекта ее функционирования как АСЭИ в отечественной и зарубежной практике исследовано недостаточно.

Приводимые в открытых источниках сведения о технических характеристиках созданных образцов МРИУС автоматизации экспериментальных исследований (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.) 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 содержаний 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

телевещания, 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*).

2. Базовая имитационная модель динамики функционирования МРИУС как СМО в процессе выполнения конфигурационных и измерительных заданий пользователей, характеризуемая 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*).

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*).

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*).

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*).

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*)

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*).

**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<sup>ти</sup> -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.

**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 производственный процесс испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления КА АО «ИСС»; в практику промышленного проектирования МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований в Региональном инновационном центре «Центр технологий *National Instruments*» при СФУ; 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 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 2.3.3 (05.13.06) – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)»: п. 2, 3, 9, 20.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** содержится общая характеристика работы.

**Первая глава** посвящена обзору и анализу применяемых подходов обеспечения коллективного использования аппаратных, программных и других ресурсов на основе метода разделения времени.

В *параграфе 1.1* на основе систематизации проведенных исследований основных подходов применения метода разделения времени в ряде прикладных областей (вычислительные системы, радиолокация, связь, приборостроение, автоматизированные системы), конкретизировано определение термина МРИУС.

Под МРИУС *предложено понимать автоматизированную систему экспериментальных исследований, функционирующую с внешним асинхронным временным разделением ресурсов между несколькими пользователями и обеспечивающую выполнение их индивидуальных конфигурационных и измерительных заданий в удаленном интерактивном диалоговом режиме.*

В *параграфе 1.2* в формализованном виде приведена обобщенная структурная схема МРИУС (см. рисунок 1), выделены реализуемые функции и назначение ее основных компонентов с точки зрения двойственной специфики функционирования. В рамках исследований полагается, что МРИУС создаются, в том числе, на основе существующей и активно развивающейся сетевой инфраструктуры, в связи с чем вопросы организации каналов связи и обеспечения качества процесса передачи данных в работе не рассматриваются<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 июня 2017 г. № 1632-р)

На основе анализа ключевых подходов, применяемых к организации процесса выполнения заданий пользователей, формализован и представлен в виде блок-схемы базовый алгоритм функционирования МРИУС, отображающий ряд ключевых особенностей ее работы как СМО (таких как программный запрет возможности повторного формирования задания в терминалах пользователей до получения результатов выполнения предыдущего, буферизация поступающих заданий и пр.).

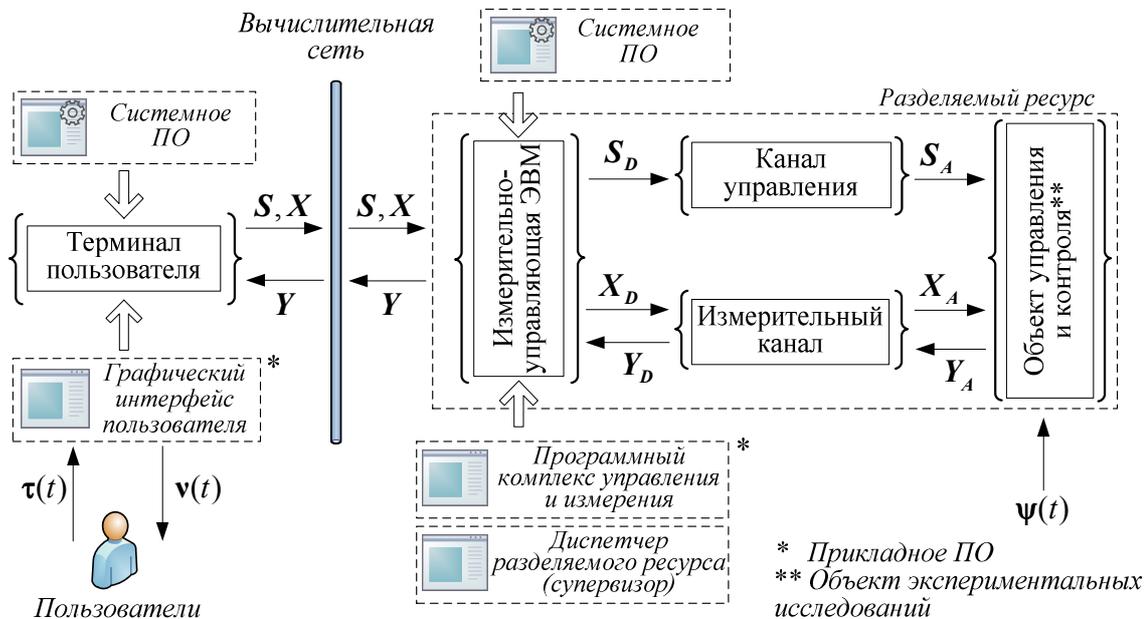


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема построения МРИУС:  $S$  – множество формируемых параметров конфигурации объекта управления и контроля (ОУиК);  $S_D$  – множество параметров сигналов управления, представленных в цифровом виде;  $S_A$  – множество физических воздействий на ОУиК, изменяющих его техническое состояние;  $X$  – множество измеряемых параметров и характеристик ОУиК;  $X_D$  – множество параметров тестирующих сигналов, представленных в цифровом виде;  $X_A$  – измерительные и тестовые сигналы;  $Y_A$  – измеряемые физические величины, сигналы характеризующие состояние и свойства ОУиК;  $Y_D$  – 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 ОУиК;  $\psi(t)$  – вектор внешних физических воздействий

В соответствии с теоремой Литтла для соответствующего класса СМО, проведены исследования функциональных ограничений построения МРИУС. Проведены исследования временного аспекта взаимодействия пользователей с разделяемым ресурсом в МРИУС, как в эргатической системе, с точки зрения нормативных оценок задержек выполнения заданий, возникающих при одновременной работе терминалов. На основе их результатов предложен ряд применяемых в процессе исследования параметров  $P^{оп} = \{p_q^{оп} | q = 1, Q\}$ , характеризующих оперативность функционирования МРИУС и, соответственно, качество обслуживания терминалов пользователей.

Параграф 1.3 посвящен анализу проблематики разработки систем на основе метода разделения времени в целом и МРИУС в частности. Рассмотрен ряд

аспектов, стимулирующих развитие направления эксплуатации специализированного оборудования на основе концепции мультиарендности в рамках развития цифровой трансформации производственной, научной и образовательной деятельности. Рассмотрена обобщенная математическая модель задачи поиска рабочего проектного решения МРИУС в соответствии с заданным целевым критерием выбора и учетом ряда накладываемых ограничений на ее технические характеристики. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** рассматриваются основные принципы и определения, положенные в основу разработанной методологии.

В *параграфе 2.1* на основе теоретико-множественного подхода разработана информационная модель проектного решения МРИУС, представленная в виде совокупности значений выделенного ряда описательных признаков:

$$mrius_g = \{H_g, S_g, \Gamma_g, A_g\}, g = \overline{1, G}, \quad (1)$$

где  $H_g$  и  $S_g$  – аппаратное и программное обеспечения МРИУС, соответствующие множеству решаемых на ее основе функциональных задач  $MT$ ;  $\Gamma_g$  – граф, характеризующий соединение функциональных узлов и устройств, входящих в состав аппаратного обеспечения;  $A_g$  – реализуемый алгоритм диспетчеризации разделяемого ресурса;  $G$  – общее число синтезируемых проектных решений.

В соответствии с результатами анализа текущего уровня компьютерных измерительных технологий и средств автоматизации управления, разработка проектных решений МРИУС реализуется на основе *метода агрегатирования* на уровне функциональных узлов, устройств и функциональных программных компонентов, представленных базисными множествами  $\mathbb{H}$  и  $\mathbb{S}$ . Для предложенной базовой информационной модели формализована и представлена в виде обобщенной структурной схемы взаимосвязь используемых описательных признаков проектного решения (см. выражение (1)) и математической модели МРИУС как СМО.

В целях сокращения области поиска допустимых вариантов проектных решений МРИУС в основу разрабатываемой методологии положены *принципы иерархичности, ограничения количества допустимых альтернатив и унификации*, которые обеспечивают локализацию множества допустимых вариантов проектных решений МРИУС. Принципы рассмотрены в *параграфе 2.2*.

Суть *принципа иерархичности* заключается в декомпозиции и представлении структуры МРИУС как совокупности взаимодействующих типовых аппаратных компонентов и набора выделенных базовых структур построения на их основе  $BS = \{BS_r | r = 1, R^{BC}\}$ , формализации требований к типовым компонентам и дальнейшей их разработке в базисе функциональных узлов и устройств  $\mathbb{H}$  на основе общеизвестных подходов, методов и методик. Реализация данного принципа обеспечивает конечность множества

рассматриваемых вариантов аппаратного построения МРИУС при решении задачи структурного синтеза.

Каждой базовой структуре построения МРИУС  $BS_r$  в общем случае соответствует несколько вариантов исполнения ее АПО  $HS_{v_r}^{BC} = \langle H, S \rangle_{v_r}^{BC}$ , каждый из которых реализует возможность решения **MT**:

$$HS_r^{BC} = \{HS_{v_r}^{BC} | v_r = 1, V_r^{BI}; \}, V_r^{BI} \in V^{BI}; V^{BI} = \{V_r^{BI} | r = 1, R^{BC}\}, \quad (2)$$

где  $HS_r^{BC}$  – множество вариантов исполнения  $r$ -й базовой структуры МРИУС;  $HS_{v_r}^{BC}$  –  $v$ -й вариант исполнения АПО  $r$ -й базовой структуры МРИУС;  $V_r^{BI}$  – количество вариантов исполнения  $r$ -й базовой структуры;  $V^{BI}$  – множество, включающее числа возможных вариантов исполнения АПО МРИУС.

Таким образом, в рамках  $r$ -й базовой структуры множеству  $HS_r^{BC}$  сопоставляется множество пар параметров сценария диалога  $SD_r^{BC}$  как  $f^{CD}: HS_r^{BC} \mapsto SD_r^{BC}$ , где  $SD_r^{BC} = \{SD_{v_r}^{BC} | v_r = 1, V_r^{BI}; \}, V_r^{BI} \in V^{BI}$ ,  $f^{CD}$  – правило сопоставления элементов множества  $HS_r^{BC}$  элементам множества  $SD_r^{BC}$ ;  $SD_{v_r}^{BC} = \langle \lambda; \mu \rangle_{v_r}^{BC}$ ,  $\lambda = 1/\bar{t}_{разм}$ ,  $\mu = 1/\bar{t}_{обсл}$ ,  $\mapsto$  – знак отображения.

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 (ТЗ) – требованиями к оперативности функционирования. Для каждой  $BS_r$  и заданного в ТЗ параметра  $p_q^{OP} \in P^{OP}$  определяется соответствующее множество  $SD_r^{GP}$  как  $f^{GP}: \langle BS_r, p_q^{OP} \rangle \mapsto SD_r^{GP}$ , где  $f^{GP}$  – правило сопоставления пары  $\langle BS_r, p_q^{OP} \rangle$  элементам множества  $SD_r^{GP}$ . Соответствующая область допустимых значений пар параметров сценария диалога  $SD_r^{OD3}$  определяется как результат пересечения множеств  $SD_r^{BC}$  и  $SD_r^{GP}$ :

$$SD_r^{OD3} = SD_r^{BC} \cap SD_r^{GP}, \quad (3)$$

где  $SD_r^{OD3} = \{SD_{k_r}^{OD3} | k_r = 1, K_r^{OD3}\}$ ,  $SD_{k_r}^{OD3} = \langle \lambda; \mu \rangle_{k_r}^{OD3}$ , а  $SD_{k_r}^{OD3}$  и  $K_r^{OD3}$  – пара параметров диалога  $k_r$ -го варианта АПО и общее число вариантов  $r$ -й базовой структуры соответственно, удовлетворяющие заданному значению параметра  $p_q^{OP}$ .

Множество  $HS_r^{OD3}$ , выражающееся как  $(f^{CD})^{-1}: SD_r^{OD3} \mapsto HS_r^{OD3}$ , содержит варианты исполнения АПО МРИУС  $r$ -х базовых структур, удовлетворяющие заданному в ТЗ требованию к оперативности функционирования.

Суть принципа унификации заключается в типизации и симплификации аппаратных, программных, аппаратно-программных решений, положенных в основу формирования базисных множеств  $\mathbb{H}$  и  $\mathbb{S}$ , а также подходов к разработке проектных решений МРИУС и ее компонентов.

В параграфе 2.3 в качестве критерия выбора проектного решения из подмножества возможных проектных решений МРИУС, локализованного на основе рассмотренных принципов, предложен обобщенный критерий оценки технического уровня:

$$\eta = \frac{C_1}{C_{N_T^{\max}}} = \frac{C_1 \cdot N_T^{\max}}{\delta \cdot C_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где  $C_1$  – совокупность затрат на оснащение рабочего места пользователя с применением аналога разрабатываемой системы или прототипа (модернизируемого исходного комплекса, системы, установки и пр.);  $C_{N_T^{\max}}$  – приведенные затраты на оснащение одного рабочего места пользователя в МРИУС;  $C_{\Sigma}$  – совокупность затрат на создание МРИУС;  $N_T^{\max}$  – максимальное число организуемых терминалов пользователей (рабочих мест) в МРИУС;  $\delta$  – масштабный коэффициент, учитывающий возможное несоответствие функциональных возможностей аналога (прототипа) и разрабатываемой МРИУС.

С учетом определения предложенного критерия оценки в параграфе 2.4 выделены и исследованы основные направления повышения технического уровня синтезируемых проектных решений МРИУС, представленные в виде комплекса графиков соответствующих зависимостей функции  $C_{N_T^{\max}} = f(N_T^{\max})$  (рисунок 2).

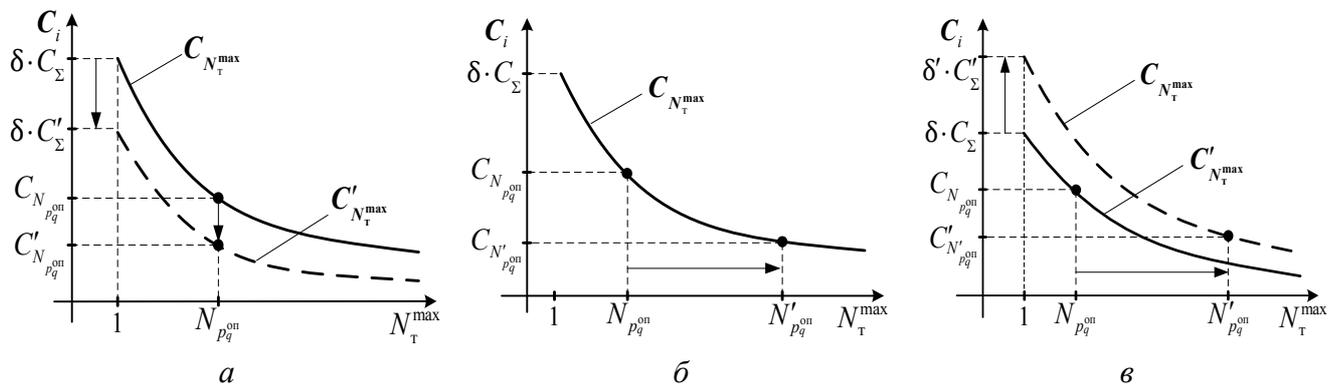


Рисунок 2 – Пример графической иллюстрации направлений снижения  $C_{N_T^{\max}}$ :

*а* – снижение затрат на разработку и изготовление; *б* – повышение числа обслуживаемых терминалов пользователей; *в* – модификация аппаратного обеспечения и/или структуры построения

Предложенная информационная модель проектного решения, введенный обобщенный критерий оценки технического уровня проектного решения и рассмотренные *принципы* легли в основу разработанной предметно-ориентированной методологии проектирования МРИУС с улучшенными показателями технического уровня, которая рассматривается в параграфе 2.5.

Структура методологии приведена на рисунке 3. В состав методологии вошли как ранее известные, так и вновь разработанные и апробированные на практике методы повышения оперативности функционирования МРИУС, которые направлены на повышение технического уровня, а также комплекс методик, подходов и вариантов решения ряда проектных задач (разработка структуры

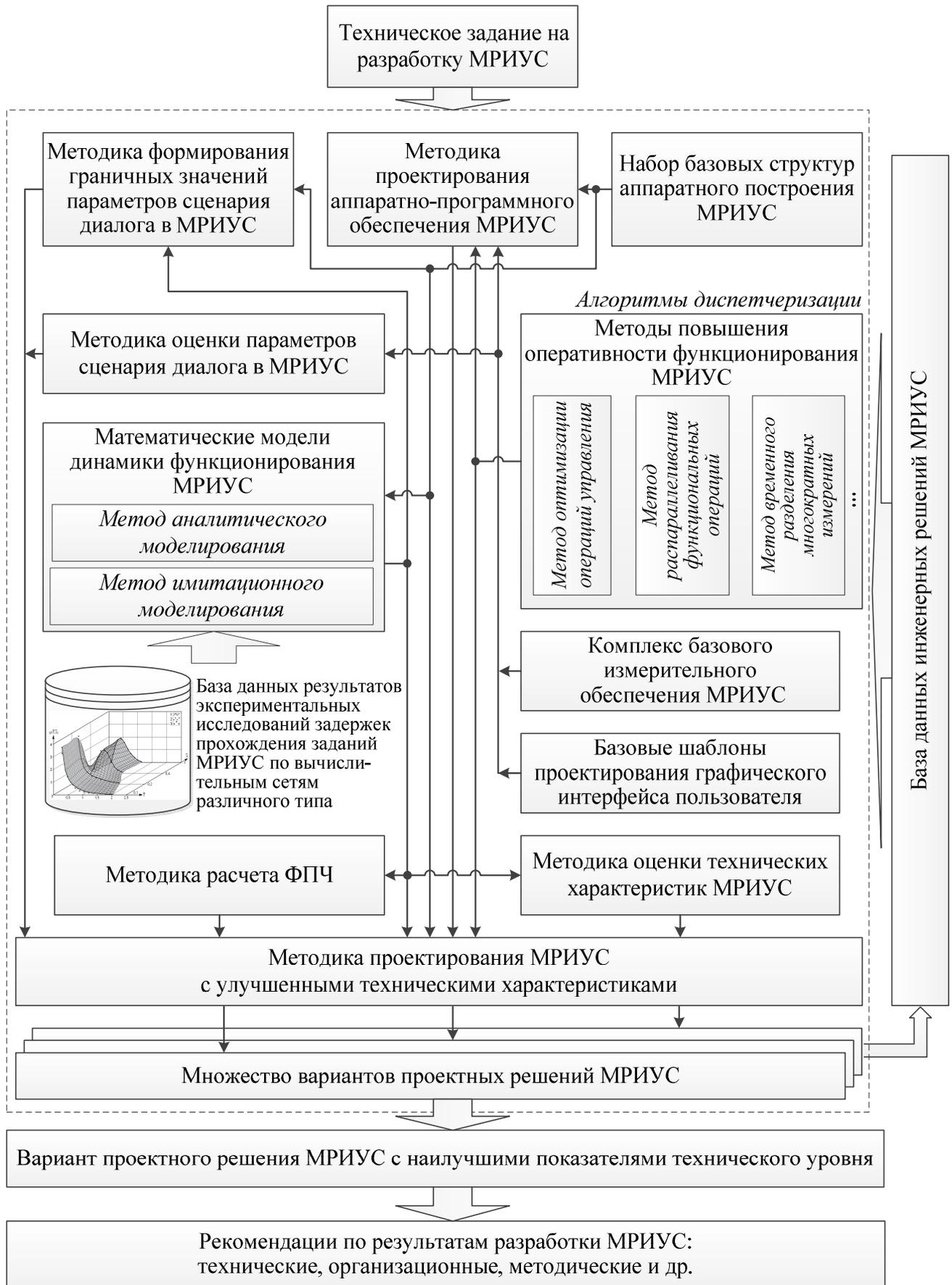


Рисунок 3 – Методология проектирования МРИУС с улучшенными показателями технического уровня

аппаратного построения, обеспечение требуемого числа обслуживаемых терминалов пользователей и оперативности функционирования, выбор параметров реализуемого сценария диалога и применяемого алгоритма диспетчеризации, разработка компонентов прикладного ПО МРИУС и др.).

Вошедший в состав предложенной методологии *набор базовых структур аппаратного построения МРИУС* разработан на основе проведенных исследований, анализа, обобщения и систематизации подходов применения метода разделения времени в ряде прикладных областей и существующего опыта создания МРИУС.

При помощи *методики проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС* на основе известных подходов реализуется формирование АПО проектного решения МРИУС (множеств функциональных узлов и устройств, программ, подпрограмм, программных модулей (выражение (1)) из базисных множеств  $\mathbb{H}$  и  $\mathbb{S}$  в соответствии с заданным в ТЗ перечнем решаемых функциональных задач **МТ**).

На основе разработанной новой *методики оценки параметров сценария диалога в МРИУС* для соответствующего варианта исполнения АПО проектного решения выполняется оценка длительностей функциональных операций и числа заданий, которые обеспечивают решение **МТ**.

*Математические модели динамики функционирования МРИУС* решают задачу выявления и исследования функциональных зависимостей параметров оперативности функционирования  $p_q^{OP}$  от структуры системы, состава ее АПО и реализуемого алгоритма диспетчеризации. В рамках методологии реализуется комплексный подход совместного использования методов аналитического и имитационного моделирования.

На основе предложенной новой *методики формирования граничных значений параметров сценария диалога в МРИУС* и применяемых методов математического моделирования реализуется формирование множества пар параметров сценария диалога  $SD_r^{GP}$ , которые являются критериями селекции множества альтернативных вариантов проектных решений МРИУС в соответствии с выделенными частными требованиями ТЗ к оперативности функционирования.

В рамках разработанной новой *методики оценки технических характеристик МРИУС* на основе проектного решения, методов математического моделирования и систем автоматизированного проектирования определяются технические характеристики МРИУС.

На базе *методики расчета функций параметрической чувствительности* (ФПЧ) осуществляется оценка уровня влияния параметров МРИУС на параметры ее оперативности функционирования и, как следствие, на число одновременно обслуживаемых терминалов пользователей с точки зрения ее работы как СМО.

*Алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса* в рамках методологии представлены как известными, так и новыми алгоритмами. Новые алгоритмы

диспетчеризации реализуют предложенные в рамках диссертации новые *методы повышения оперативности функционирования МРИУС*, которые базируются на результатах проведенных исследований технических особенностей построения МРИУС, параметрического и функционального содержания выполняемых заданий.

*Комплекс базового измерительного обеспечения МРИУС* включает решения по выполнению процедур сбора и обработки данных о состоянии ОУиК в диалоговом режиме и решает задачу унификации подходов к разработке компонентов прикладного ПО МРИУС для ряда областей их применения.

*Базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя* формализуют основные подходы к реализации соответствующего прикладного ПО МРИУС.

В состав предложенной методологии в виде соответствующей *базы данных* (см. рисунок 3) также включены результаты экспериментальных исследований задержек прохождения заданий по вычислительным сетям различного типа, проведенных представителями научной школы Ю. К. Евдокимова.

Разработанная новая *методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками* является центральным ядром методологии и реализует заданный маршрут разработки, оперируя решениями промежуточных задач «*синтез – анализ – принятие решения*» на основе рассмотренных выше компонентов методологии (методов, моделей, методик и комплекса решений). В рамках методики осуществляется поиск проектного решения МРИУС с наилучшим показателем технического уровня (см. выражение (4)).

Разработанные подходы и варианты решения ряда проектных задач (*базовые структуры аппаратного построения, алгоритмы диспетчеризации разделяемого ресурса, комплекс базового измерительного обеспечения, базовые шаблоны проектирования графического интерфейса пользователя*) в комплексе с апостериорными данными о длительностях выполняемых функциональных операций и синтезируемыми вариантами исполнения АПО предложено интегрировать в *базу данных инженерных решений*, которая направлена на осуществление информационной поддержки процесса разработки МРИУС. В последующих главах рассматриваются разработанные в ходе диссертации составные компоненты представленной методологии.

**В третьей главе** в *параграфе 3.1* выделены и описаны базовые структуры аппаратного построения  $BS_r$ . Критерии выбора базовой структуры аппаратного построения МРИУС из предложенного набора **BS** в соответствии с признаками «*количество объектов управления и контроля*», «*применение внутреннего разделения каналов*», «*номенклатура объектов управления и контроля*» представлены в виде схемы укрупненного дерева принятия решений.

В *параграфе 3.2* приведена *методика проектирования аппаратно-программного обеспечения МРИУС*. В рамках данной методики реализуется

многовариантный синтез вариантов исполнения АПО МРИУС на основе базисных множеств  $\mathbb{H}$ ,  $\mathbb{S}$  и предложенного набора базовых структур аппаратного построения  $\mathbf{BS}$ . ТЗ на разработку МРИУС определяет объект управления и контроля, а также перечень функциональных пользовательских задач  $\mathbf{MT} = \{MT_{i\text{из}} \mid i^{\text{из}} = 1, I^{\text{из}}\}$ , решаемых на его основе в диалоговом режиме. Для каждой задачи  $MT_{i\text{из}}$ , решаемой на основе  $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ , в рамках данной методики также определяется множество заданий  $\mathbf{REQ}_{i\text{из}, v_r}$ , формируемых посредством соответствующего графического интерфейса пользователя. Таким образом, для  $\mathbf{MT}$  и  $HS_{v_r}^{\text{BC}}$  формируется множество заданий пользователей  $\mathbf{REQ}_{v_r}$ , то есть  $\langle \mathbf{MT}, HS_{v_r}^{\text{BC}} \rangle \rightarrow \mathbf{REQ}_{v_r}$ , где  $\mathbf{REQ}_{v_r} = \bigcup_{i^{\text{из}}=1}^{I^{\text{из}}} \mathbf{REQ}_{i\text{из}, v_r}$ . В целом результат выполнения данной методики описывается следующим выражением:

$$\mathbf{MT} \rightarrow \begin{cases} \mathcal{HS}^{\text{BC}} = \{HS_r^{\text{BC}} \mid r = 1, R^{\text{BC}}\}; \\ \bigcup_{r=1}^{R^{\text{BC}}} \bigcup_{v_r=1}^{V_r^{\text{BI}}} \mathbf{REQ}_{v_r}. \end{cases} \quad (5)$$

В параграфе 3.3 рассматривается методика оценки параметров сценария диалога в МРИУС. В рамках данной методики посредством расчетно-аналитического и экспериментального методов оцениваются длительности функциональных операций управления и измерения, выполняемых в соответствии с заданиями пользователей  $\mathbf{REQ}_{v_r}$  на основе  $HS_{v_r}^{\text{BC}}$  (см. выражение (5)), и осуществляется их накопление в виде массивов значений  $\mathbf{T}_{i\text{из}} = [t_{\text{обсл}x_{i\text{из}}}]$ , где  $x_{i\text{из}} = \overline{1, X_{i\text{из}}}$ ,  $X_{i\text{из}}$  – число заданий, обеспечивающих решение задачи  $MT_{i\text{из}}$ . Варианты решения  $MT_{i\text{из}}$  на основе  $HS_{v_r}^{\text{BC}}$  и соответствующие им длительности функциональных операций в виде элементов  $TS$  и  $TFO$ , также помещаются в базу данных инженерных решений МРИУС:

$$\begin{aligned} TS &:= \langle HS_{v_r}^{\text{BC}}, \mathbf{REQ}_{i\text{из}, v_r} \rangle, \\ TFO &:= \mathbf{T}_{i\text{из}}. \end{aligned} \quad (6)$$

На основе сформированного массива значений  $\mathbf{T}_{v_r} = \bigcup_{i^{\text{из}}=1}^{I^{\text{из}}} \mathbf{T}_{i\text{из}}$  выполняется оценка числовых характеристик случайной величины  $\tilde{t}_{\text{обсл}}$  для каждого варианта исполнения МРИУС  $r$ -й базовой структуры, а также выбирается вид аппроксимирующей функции распределения. Итерационно повторяя шаги данной методики для каждой  $BS_r$  и  $HS_{v_r}^{\text{BC}}$ , формируются множества пар параметров сценариев диалога  $\mathbf{SD}_r^{\text{BC}} = \{SD_{v_r}^{\text{BC}} \mid v_r = 1, V_r^{\text{BI}}\}$ , где  $SD_{v_r}^{\text{BC}} = \langle \lambda; \mu \rangle_{v_r}^{\text{BC}}$ . Рассчитанные значения  $SD_{v_r}^{\text{BC}}$  используются в качестве исходных данных при оценке оперативности функционирования МРИУС на основе методов математического моделирования.

Параграф 3.4 посвящен разработке математических моделей динамики функционирования МРИУС. Применяемые базовые аналитические модели основываются на упрощающих гипотезах о представлении функционирования МРИУС в виде *Марковских СМО* при коэффициенте вариации для времени обслуживания заданий  $K_b \leq 1$  и алгоритме диспетчеризации *FIFO*. Данные модели используются в методике оценки сценария диалога в целях сокращения временных затрат на проведение необходимых расчетов относительно метода имитационного моделирования.

Разработанная в диссертации имитационная модель реализует дискретно-событийный подход с переменным шагом системного времени в комплексе с внутренней детализацией параметрического и функционального содержания обрабатываемых транзактов (заданий) и возможностью программного прототипирования пользовательских алгоритмов диспетчеризации (отличных от *FIFO*). Для предложенной модели приведены ее обобщенная структурная схема (см. рисунок 4), блок-схема алгоритма имитационного моделирования, рассмотрены ее исследовательские возможности. Методики моделирования задержек прохождения заданий пользователей по вычислительным сетям различного типа на основе расчетной пропускной способности МРИУС реализованы блоками 3 и 4 модели.

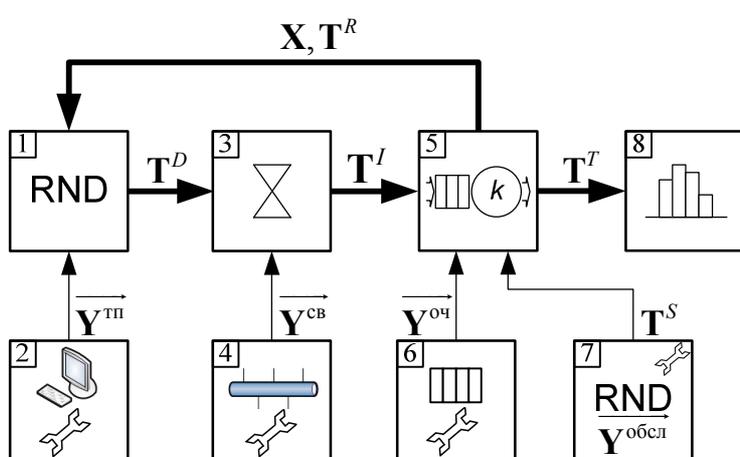


Рисунок 4 – Обобщенная структура имитационной модели МРИУС: 1 – блок формирования  $\tilde{t}_{\text{разм}}$ ; 2 – блок управления параметрами формирования  $\tilde{t}_{\text{разм}}$ ; 3 – блок формирования задержки прохождения заданий по каналу связи  $\tilde{t}_{\text{св}}$ ; 4 – блок управления параметрами формирования  $\tilde{t}_{\text{св}}$ ; 5 – блок расчета времени пребывания заданий в канале обслуживания; 6 – блок управления последовательностью выполнения заданий; 7 – блок формирования времени обслуживания заданий  $\tilde{t}_{\text{обсл}}$ ; 8 – блок обработки состояний системы

Обобщенная схема взаимосвязей предложенного набора структур аппаратного построения **BS** и применяемых математических моделей динамики функционирования МРИУС как СМО приведена на рисунке 5.

В параграфе 3.5 рассматривается методика формирования граничных параметров сценария диалога в МРИУС. В рамках методики на основе применяемых математических моделей динамики функционирования МРИУС для каждой  $r$ -й базовой структуры формируется множество граничных пар параметров сценария диалога  $SD_r^{\text{ГР}} = \{SD_{l_r}^{\text{ГР}} \mid l_r = 1, L_r^{\text{ГР}}\}$ ,  $SD_{l_r}^{\text{ГР}} = \langle \lambda; \mu \rangle$ , соответствующих значению заданного в ТЗ параметра  $p_q^{\text{ОП}}$ .

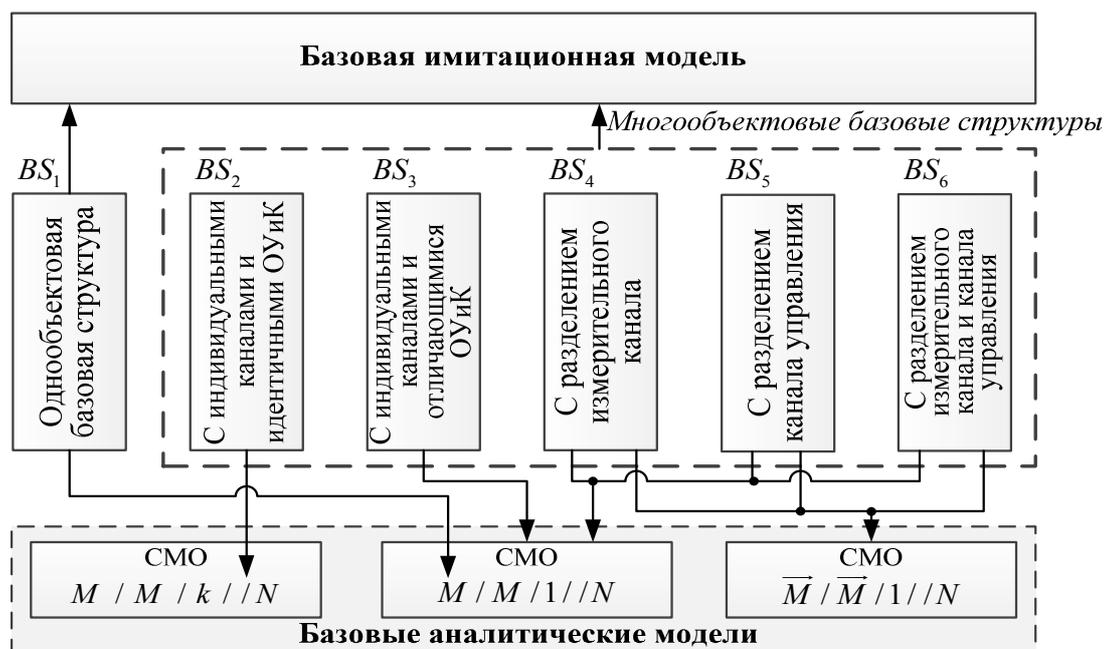


Рисунок 5 – Схема взаимосвязей базовых структур аппаратного построения и базовых математических моделей динамики функционирования МРИУС

Сформированные множества  $SD_r^{GP}$  в рамках реализуемого принципа ограничения количества допустимых альтернатив являются критериями селекции множества альтернативных вариантов проектных решений МРИУС на основе сформированных оценок параметров сценариев диалога  $SD_r^{BC}$  (параграф 3.3).

В параграфе 3.6 описывается методика оценки технических характеристик МРИУС. Методика реализуется на основе информационной модели проектного решения (см. выражение (1)). Оценка технических характеристик МРИУС, к которым отнесены метрологические характеристики каналов, параметры оперативности, показатели использования разделяемого ресурса, характеристики конструктивно-технологической реализации, показатели надежности, выполняется с учетом аспекта функционирования данных систем как СМО. Оценка выполняется на основе рассмотренных в параграфе 3.4 математических моделей в комплексе с соответствующими системами автоматизированного проектирования и применением типовых методик.

В четвертой главе предложен ряд новых методов повышения оперативности функционирования МРИУС.

В параграфе 4.1 рассматривается метод сбора и накопления апостериорной информации о соответствии длительностей выполняемых функциональных операций значениям параметров конфигурации  $S$  и параметров измерения  $X$  заданий пользователей  $REQ$  (см. выражение (5)). Сбор и накопление информации выполняются в процессе эксплуатации МРИУС по ее целевому назначению. Предложенный подход реализуется на основе разработанного специализированного программного модуля измерения и накопления данных и

применяется в МРИУС, для которых в процессе разработки проектных решений в рамках *методики оценки параметров реализуемого сценария диалога* выявление полного объема соответствующих данных было технически затруднено и/или нецелесообразно.

Для МРИУС, в которых при выполнении поступающих заданий пользователей доминирующей составляющей времени их выполнения является время управления изменением состояния ОУиК, разработан *метод оптимизации операций управления*, описанный в параграфе 4.2. Данный метод заключается в поиске последовательности обработки заданий, при которой суммарное время, затрачиваемое на выполнение операций управления для имеющихся в очереди заданий, является минимальным:

$$t_{\Sigma\text{упр}} \rightarrow \min. \quad (7)$$

На рисунке 6 приведен пример сформированной матрицы длительностей функциональных операций управления  $\mathbf{T}^{\text{УПР}}$ , в ячейках которой расположены времена  $t_{i,j}$  перестройки ОУиК из состояния  $ST_i$  в состояние  $ST_j$ , дополненные соответствующими длительностями операций управления для текущего состояния ОУиК  $ST_0$ , где  $i$  – порядковый номер поступления задания в очередь,  $i = 1, 2, \dots, q$ ;  $j = 1, 2, \dots, q$ ;  $q$  – число заданий в очереди диспетчера разделяемого ресурса на измерительно-управляющей ЭВМ в текущий момент времени.

	$ST_0$	$ST_1$	$ST_2$	$ST_3$	$ST_4$	$ST_5$
$ST_0$	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 6 – Матрица длительностей функциональных операций управления  $\mathbf{T}^{\text{УПР}}$  при  $q = 5$ :

«—» – базовый алгоритм диспетчеризации *FIFO* ( $ST_0, ST_1, ST_2, ST_3, ST_4, ST_5$ );

«----» – пример альтернативной последовательности обработки заданий ( $ST_0, ST_2, ST_4, ST_3, ST_1, ST_5$ )

При рассмотренном подходе к формализации математическая задача поиска последовательности обработки заданий (см. выражение (7)) из  $q!$  возможных вариантов на основе  $\mathbf{T}^{\text{УПР}}$  соответствует незамкнутому варианту несимметричной задачи коммивояжера (*asymmetric traveling salesman problem – aTSP*), поиска *гамильтонова пути* на графе с вершинами в виде состояний  $ST_0, ST_1, \dots, ST_q$  и ветвями в виде времен  $t_{i,j}$ , в рамках которой диспетчеру разделяемого ресурса необходимо «обойти» все состояния ОУиК  $ST_i$  для имеющихся в очереди  $q$  заданий за кратчайшее время  $t_{\Sigma\text{упр}}$  с обязательным условием начала из текущего состояния  $ST_0$ . Сокращение времени обслуживания заданий при реализации данного метода обуславливается 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. Это характерно, например, для процессов коммутации вариантов исполнения функциональных узлов и/или типоминалов электрорадиоэлементов, нагрева и охлаждения отдельных функциональных узлов устройств и пр.

Для МРИУС, в которых в процессе функционирования выполняются измерения с усреднением результатов многократных «точечных» измерений и/или измеряемых зависимостей, предложено применение *метода временного разделения многократных измерений*, рассмотренного в параграфе 4.3. При многократных измерениях среднее время выполнения каждого соответствующего задания возрастает пропорционально числу выполняемых циклов измерения и усреднения  $n_y$ :

$$\bar{t}'_{\text{обсл}} = \bar{t}_{\text{упр}} + \bar{t}'_{\text{изм}} = \bar{t}_{\text{упр}} + n_y \cdot \bar{t}_{\text{изм}}, \quad (8)$$

что приводит к снижению предельной пропускной способности МРИУС и, как следствие, к снижению  $N_T^{pq\text{оп}}$ .

В соответствии с данным методом выполнение операции вычисления среднего арифметического точечных измерений и измеряемых однократно функциональных зависимостей (реализаций сигналов, осциллограмм, вольт-амперных характеристик и др.) возлагается на графический интерфейс пользователя (ГИП). В общем виде измеряемые функциональные зависимости описываются  $K$ -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. Соответствующее накопление результатов однократных измерений реализуется рекуррентно средствами ГИП по мере их поступления на терминал пользователя с использованием алгоритма вычисления среднего арифметического по его значению  $\bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1}$  на предыдущем цикле усреднения:

$$\bar{\mathbf{Y}}_{n_y} = \bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1} + \frac{1}{n_y} \cdot (\mathbf{Y}_{n_y} - \bar{\mathbf{Y}}_{n_y-1}), \quad (9)$$

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

$$\bar{y}_{n_y,j} = \bar{y}_{(n_y-1),j} + \frac{1}{n_y} \cdot (y_{n_y,j} - \bar{y}_{(n_y-1),j}). \quad (10)$$

Реализация данного метода приводит к снижению среднего времени обслуживания заданий, но при этом обуславливает необходимость повторного обращения пользователей к разделяемому ресурсу. Это, в свою очередь, приводит к увеличению числа формируемых заданий и возможному снижению среднего времени размышления пользователей. Соответствующее условие эффективного

применения *метода временного разделения многократных измерений* в МРИУС, выраженное на основе функций параметрической чувствительности, в общем виде описывается неравенством  $S_{\bar{t}_{\text{изм}}}^{p_{q^{\text{оп}}}} / S_{\bar{t}_{\text{разм}}}^{p_{q^{\text{оп}}}} > 1$ .

Для МРИУС, реализованных на основе *многообъектовых базовых структур с внутренним разделением каналов* (см. рисунок 5), разработан *метод распараллеливания функциональных операций*, который рассмотрен в параграфе 4.4. Данный метод заключается в параллельном выполнении функциональных операций управления и измерения для заданий, имеющих принадлежность к различным ОУиК, входящим в состав МРИУС. В соответствии с методом в начале выполнения операции измерения текущего задания анализируется следующее задание в очереди. Анализ выполняется на предмет его «принадлежности» к одному ОУиК, и в случае их несовпадения в процессе выполнения операции измерения параметров ОУиК для текущего задания параллельно выполняется операция управления для другого ОУиК согласно следующему заданию, имеющемуся в очереди. Временные диаграммы процессов выполнения очереди  $q$  заданий пользователей в соответствии с базовым алгоритмом диспетчеризации *FIFO* и на основе *метода распараллеливания функциональных операций* для случая чередующихся заданий с их принадлежностью к различным ОУиК представлены на рисунке 7, где  $t_{\text{упр}}^i$  и  $t_{\text{изм}}^i$  – длительности операций управления и измерения  $i$ -го задания соответственно,  $i = 1, 2, \dots, q$ .

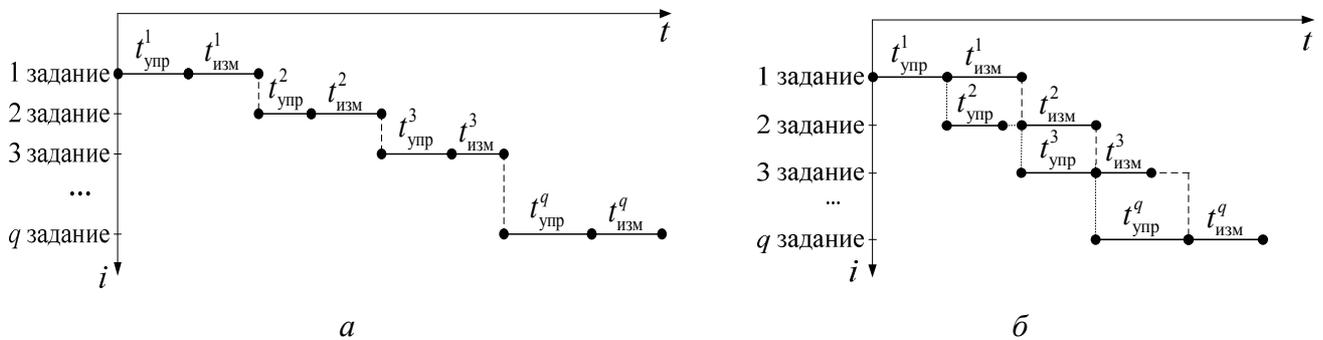


Рисунок 7 – Временные диаграммы процесса выполнения очереди заданий в МРИУС для различных алгоритмов диспетчеризации: а – *FIFO*; б – реализация метода распараллеливания функциональных операций

При  $t_{\text{упр}}^i = t_{\text{изм}}^i = t_{\text{фо}}$  отношение средних арифметических значений времен выполнения заданий при реализации метода распараллеливания  $\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{MP}}$  и при алгоритме диспетчеризации *FIFO*  $\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{FIFO}}$  (рисунок 7), характеризующее повышение скорости выполнения  $q$  заданий, находящихся в очереди, при предельно возможной степени распараллеливания функциональных операций описывается выражением

$$\frac{\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{MP}}}{\bar{t}_{\text{обсл}}^{\text{FIFO}}} = \frac{2 \cdot q}{q + 1}. \quad (11)$$

Увеличение скорости выполнения заданий обеспечивает повышение оперативности функционирования МРИУС и тем самым реализует возможность увеличения числа обслуживаемых терминалов пользователей.

Эффективность применения каждого из рассмотренных методов обобщенно охарактеризована относительной величиной  $\xi$ :

$$\xi = \frac{N'_{pq^{оп}} - N_{pq^{оп}}}{N_{pq^{оп}}}, \quad (12)$$

где  $N_{pq^{оп}}$  – максимальное число терминалов в МРИУС с базовым алгоритмом диспетчеризации *FIFO*;  $N'_{pq^{оп}}$  – максимальное число терминалов в МРИУС, функционирующей на основе соответствующего метода при сохранении заданных требований к оперативности.

Для каждого из рассмотренных в параграфах 4.2–4.4 методов приведены блок-схемы алгоритмов работы диспетчера разделяемого ресурса, реализующих их совместно с фоновым накоплением апостериорных значений длительностей функциональных операций на основе предложенного в параграфе 4.1 подхода. На основе разработанной имитационной модели и созданных адаптируемых программных модулей получены и представлены графически результаты исследований зависимостей эффективности методов (рисунок 8) от параметров реализуемого сценария диалога, длительностей выполняемых функциональных операций и/или их соотношения, числа объектов управления и контроля ( $K^{ВИД}$ ) и др.

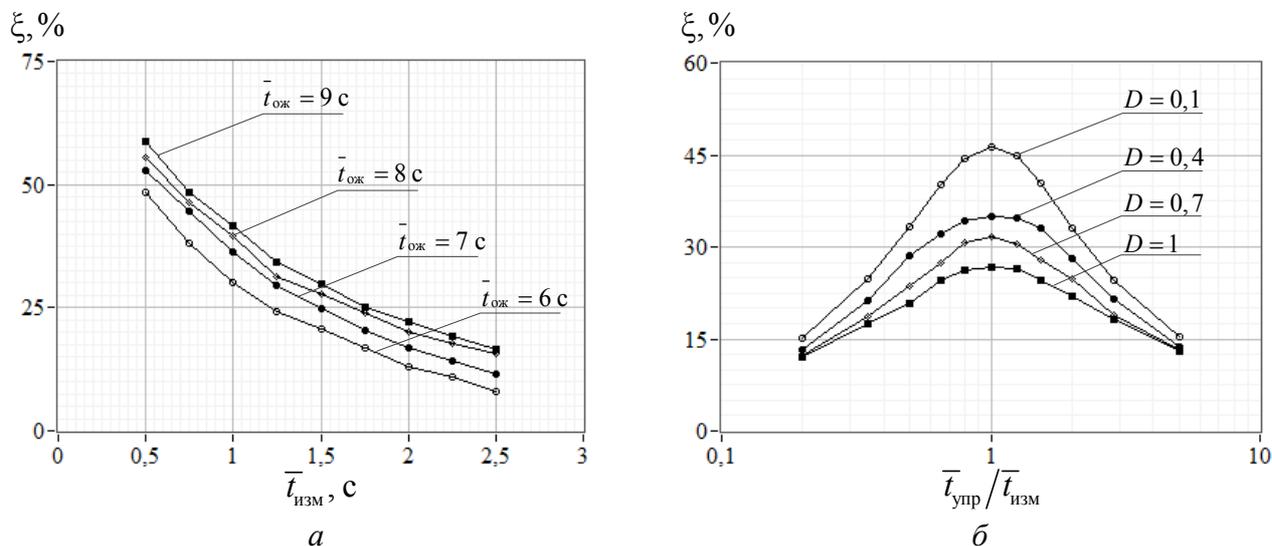


Рисунок 8 – Графики зависимостей эффективности предложенных методов:

*а* – метод оптимизации операций управления ( $\bar{t}_{разм} = 30$  с,  $t_{ST_i \rightarrow ST_j} \Big|_{i \neq j} = 0,3$  с;  $i, j = 1, \dots, 20$ );

*б* – метод распараллеливания функциональных операций

( $D\bar{t}_{упр} = D\bar{t}_{изм} = D$ ,  $\bar{t}_{разм} = 25$  с,  $\bar{t}_{обсл} = 2$  с,  $K^{ВИД} = 4$ )

В параграфе 4.5 предложен обобщенный подход к анализу эффективности реализации комплекса мероприятий, направленных на повышение технического уровня МРИУС, включающих в себя в том числе разработанные методы повыше-

ния оперативности функционирования. Целесообразность реализации комплекса соответствующих мероприятий зависит от обусловленных ими дополнительных затрат на аппаратное обеспечение, затрат на доработку ПО и соответствующего им приращения технического уровня МРИУС. В общем виде относительное приращение технического уровня МРИУС  $\varsigma$  при их реализации оценивается как

$$\varsigma = \frac{\eta^M - \eta}{\eta} = \frac{\eta^M}{\eta} - 1 = \frac{1 + \alpha}{1 + \beta} - 1, \quad (13)$$

где  $\eta$ ,  $\eta^M$  – технический уровень исходной и модифицированной МРИУС;  $\alpha$ ,  $\beta$  – относительные изменения числа одновременно обслуживаемых терминалов пользователей и материальных затрат на МРИУС, обусловленные реализацией комплекса соответствующих мероприятий.

При материальных затратах на модификацию алгоритма диспетчеризации в соответствии с предложенными методами, пренебрежительно малыми по сравнению в целом с затратами на МРИУС, то есть при  $\beta \approx 0$  и  $\alpha = \xi$ , относительное повышение технического уровня МРИУС  $\varsigma$  (выражение (13)) является приблизительно равным величине  $\xi$ . Значения  $\xi$  в ряде случаев по результатам моделирования в процентном соотношении могут достигать 30 % и более.

Способы функционирования МРИУС, реализующие разработанные и исследованные в главе 4 методы, защищены патентами РФ на изобретение.

**Пятая глава** посвящена разработке решений ряда проектных задач, алгоритмического обеспечения процессов разработки и эксплуатации МРИУС.

Мощные вычислительные ресурсы и быстроедействие современных ЭВМ способствуют реализации высокоинформативных и точных методов измерения в МРИУС. Созданное на основе программной цифровой спектрально-весовой обработки сигналов базовое измерительное обеспечение МРИУС рассматривается в *параграфе 5.1* и обобщенно описывается кортежем **BMS**:

$$\mathbf{BMS} = \langle \mathbf{A}^{\text{ИЗ}}, \mathbf{S}^{\text{ИЗ}}, \mathbf{HS}^{\text{ИПС}}, \mathbf{HS}^{\text{УВП}} \rangle, \quad (14)$$

где  $\mathbf{A}^{\text{ИЗ}}$  – множество алгоритмов спектрально-весового измерения параметров сигналов;  $\mathbf{S}^{\text{ИЗ}}$  – множество подпрограмм, реализующих алгоритмы спектрально-весового измерения параметров сигналов;  $\mathbf{HS}^{\text{ИПС}}$  – исследовательский аппаратно-программный комплекс спектрально-весового измерения параметров сигналов;  $\mathbf{HS}^{\text{УВП}}$  – АПО базовых унифицированных виртуальных приборов.

В *параграфе 5.2* разработано формализованное описание базовых шаблонов проектирования графического интерфейса пользователя МРИУС, представленное парой **GUI**:

$$\mathbf{GUI} = \langle T_{k^T}, \mathbf{M}^{\text{И}} \rangle, \quad (15)$$

где  $T_{k^T}$  – применяемый тип ГИП («процедурно-ориентированный» или «объектно-ориентированный»; «однооконный» или «многооконный»);  $\mathbf{M}^{\text{И}}$  – множество применяемых в ГИП визуальных информационных абстракций разделяемого

ресурса – *метафор* («виртуальная установка», «виртуальное наборное поле», «виртуальные измерительные приборы» и др.).

На основе множества вариантов соответствующих базовых шаблонов  $GUI = \{GUI_k | k^i = 1, K^i\}$  и ряда руководящих нормативных документов ГОСТ Р ИСО 14915-1(2)-2016, ГОСТ Р ИСО-МЭК 9126-93 предложена *методика разработки графического интерфейса пользователя*, представленная блок-схемой ее алгоритма.

Методика формирования *базы данных инженерных решений МРИУС*, аккумулирующей разработанные ранее в диссертации решения (параграфы 3.1, 4.2–4.4, 5.1, 5.2), данные о длительностях функциональных операций (см. выражение (6)) и получаемые в процессе разработки новые данные, рассматривается в *параграфе 5.3*.

В *параграфе 5.4* описывается методика проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками, на основе которой выполняется взаимодействие разработанных и рассмотренных в предыдущих главах и параграфах компонентов предложенной методологии (см. рисунок 3).

Данная методика представлена блок-схемой ее алгоритма и реализует подход направленного совершенствования прототипа (см. рисунок 9). В качестве *прототипов* в процессе разработки выступают варианты реализации МРИУС на основе базовых структур аппаратного построения **BS** и базового алгоритма диспетчеризации *FIFO*. При этом под процессом совершенствования понимается «*модификация*» проектных решений посредством применения разработанных в диссертации методов повышения оперативности.

По результатам выполнения этапов данной методики из совокупности вариантов проектных решений  $MRIUS = \{mrius_g | g = 1, G\}$ , удовлетворяющих ТЗ на разработку, выполняется поиск и выбор рабочего решения  $mrius_{g^*}$ , обладающего наилучшим значением показателя технического уровня МРИУС:  $\eta_{g^*} = \min\{\eta_g\}$ . Для выбранного в качестве рабочего проектного решения осуществляется разработка и выпуск соответствующей программной и конструкторской документации с учетом требований ЕСПД и ЕСКД, а также формирование перечня рекомендаций по эксплуатации образца МРИУС.

Технические характеристики МРИУС, электронная программная и конструкторская документация (схемы электрические функциональные, принципиальные; чертежи и 3D-модели конструктивных узлов; 3D-модели конструкции аппаратных компонентов); описание принципов работы с прикладным ПО; сведения о техническом обслуживании и пр. интегрируются в рамках интерактивного электронного технического руководства. Образец МРИУС, изготовленный на основе рабочего проектного решения и выпущенного комплекта конструкторской и программной документации, вводится в эксплуатацию с учетом сформированных по результатам разработки рекомендаций.

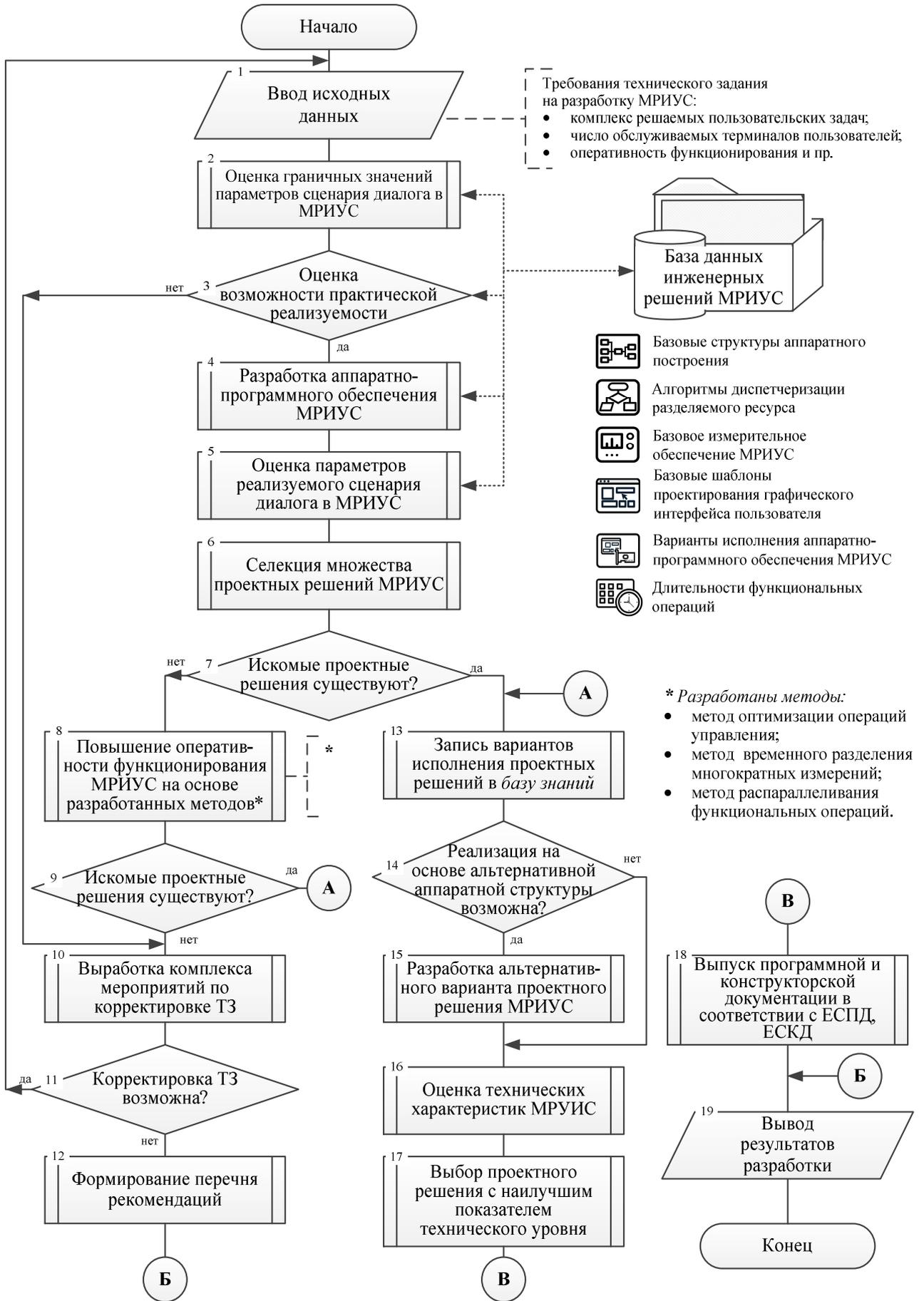


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма методики проектирования МРИУС с улучшенными техническими характеристиками

По результатам эксплуатации в течение нескольких лет ряда образцов МРИУС была разработана *методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям их эксплуатации*, рассмотренная в параграфе 5.5 и представленная на рисунке 10 в виде диаграммы бизнес-процесса фрагмента жизненного цикла. В рамках данной методики на основе накапливаемых статистических данных осуществляется сопровождение и анализ процесса функционирования, а также последующая адаптация МРИУС на этапах внедрения (опытной эксплуатации) и промышленной (постоянной) эксплуатации в соответствии с заданными и фактическими значениями ее технических характеристик функционирования как СМО.

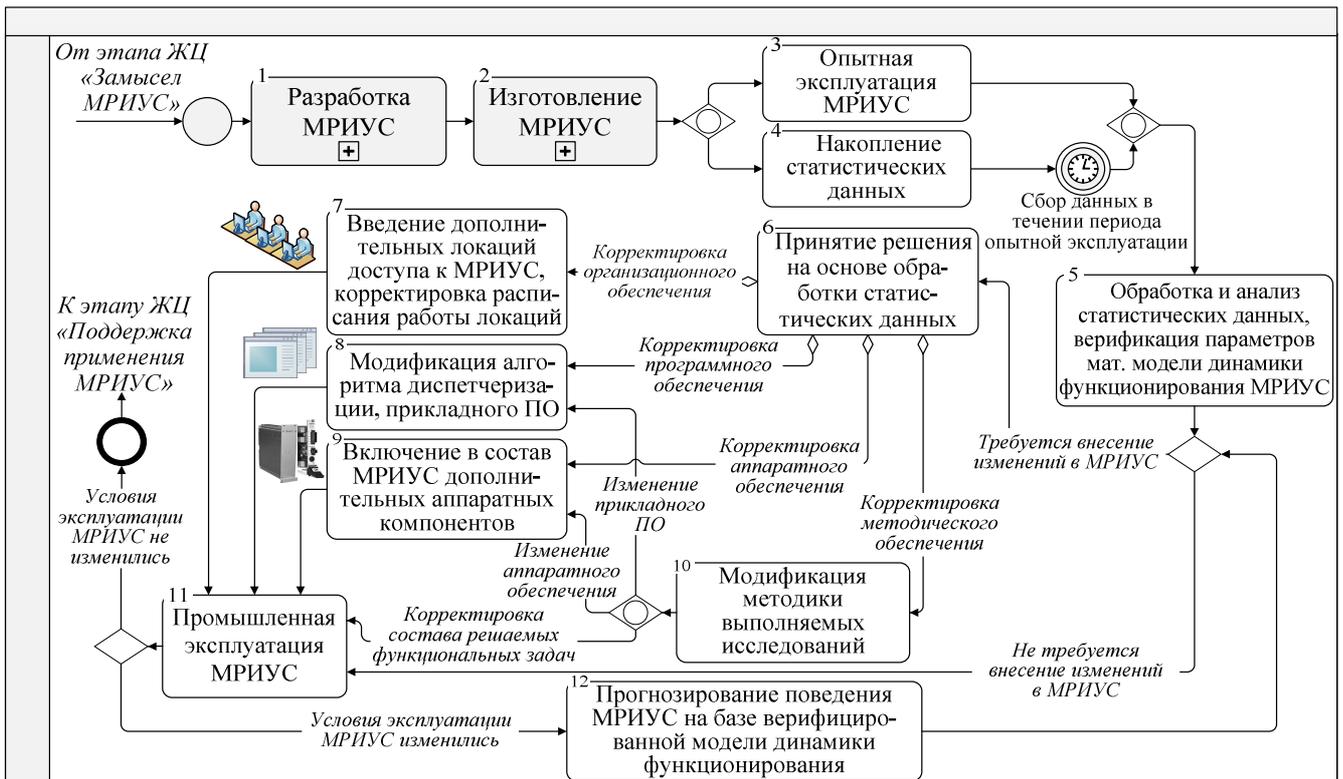


Рисунок 10 – Блок-схема фрагмента жизненного цикла МРИУС  
(в виде диаграммы *Business Process Model and Notation*)

В соответствии с данной методикой (рисунок 10) в течение периода опытной эксплуатации за счет дополнения АПО исследуемого образца МРИУС специализированной разработанной в диссертации *подпрограммой регистрации и накопления статистических данных*, осуществляется мониторинг процесса взаимодействия пользователей с разделяемым ресурсом (фиксация персонализированных для каждого пользователя: моментов времени отправки заданий и получения результатов их выполнения на терминалах; моментов времени поступления, начала и завершения выполнения заданий на измерительно-управляющей ЭВМ; длительностей функциональных операций, выполняемых аппаратно-программным обеспечением МРИУС на основе задания; служебной информации о параметрах сеанса работы (*IP-адрес, идентификатор сессии и др.*)).

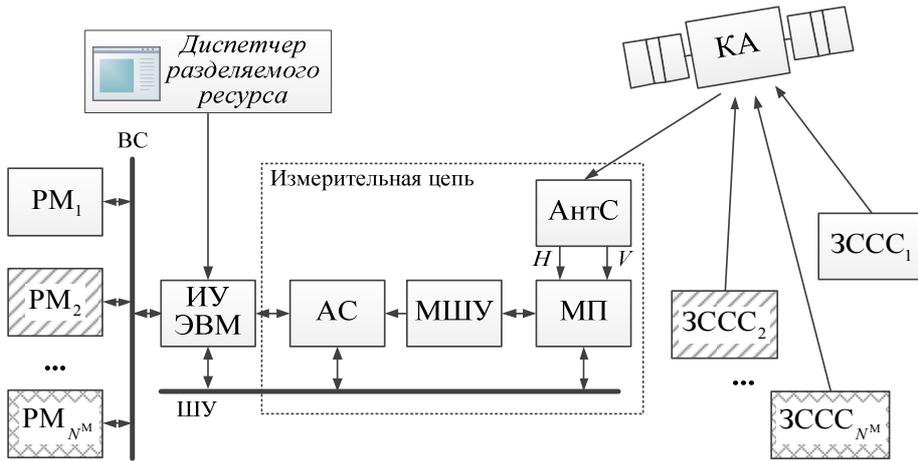
На основе обработки накопленных данных разработчиком или эксплуатирующим лицом формируются сводные статистические зависимости. По результатам анализа этих зависимостей выполняется верификация параметров математической модели динамики функционирования МРИУС как СМО, а также принимается решение о необходимости реализации ряда соответствующих мероприятий таких как модификация АПО МРИУС, методического и организационного обеспечений (блоки 7–10). Верифицированная по результатам опытной эксплуатации математическая модель (см. блоки 5, 12) применяется для дальнейшего прогнозирования поведения МРИУС при изменении ее конфигурации и/или условий ее промышленной эксплуатации (блоки 11, 12).

**Шестая глава** посвящена результатам практической апробации и внедрения разработанных отдельных компонентов методологии и методологии в целом в процессе разработки и на этапе эксплуатации промышленных и опытных образцов МРИУС в области автоматизации испытаний, научного и учебного эксперимента, а также рассмотрению результатов проведенных экспериментальных исследований отдельных компонентов методологии.

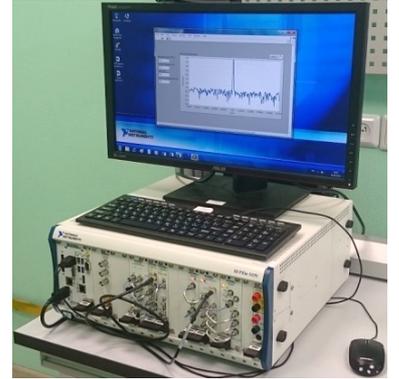
Разработанные образцы МРИУС, описанные в *пункте 6.1.1*, решают задачи автоматизации ряда прикладных экспериментальных исследований, потребность в которых возникает в ходе процессов разработки и испытаний изделий ракетно-космической техники и их составных частей.

Разработанная и запатентованная МРИУС квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи (ЗССС) позволяет в несколько раз сократить общую длительность этапа формирования эксплуатационной загрузки частотно-энергетического ресурса бортового ретрансляционного комплекса геостационарного КА связи и ретрансляции за счет обеспечения возможности проведения испытаний для нескольких ЗССС параллельно на основе одного комплекта оборудования измерительной цепи (рисунок 11, *а*), используемого на основе временного разделения. Увеличение интервала коммерческой эксплуатации КА в течение его ограниченного срока активного существования за счет сокращения длительности этапа квалификационных испытаний ЗССС позволяет повысить коммерческую эффективность КА в целом с точки зрения окупаемости инвестиционных затрат на его создание.

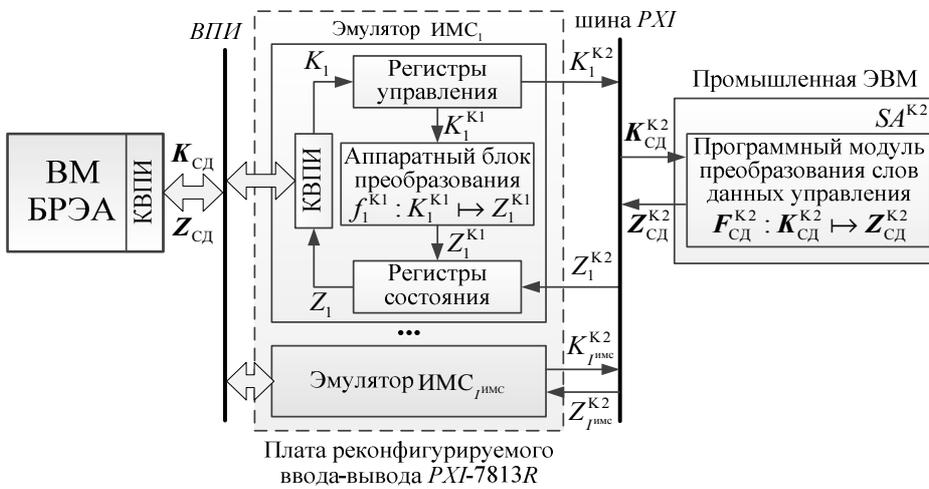
В целях решения задачи обеспечения возможности опережающего тестирования ПО вычислительного модуля (ВМ) БРЭА систем управления КА в условиях отсутствия изготовленных конструктивных блоков интерфейсных модулей сопряжения (ИМС) на основе результатов диссертации (набор базовых структур аппаратного построения, математические модели динамики функционирования, методика оценки параметров сценария диалога) разработан и создан аппаратно-программный комплекс, эмулирующий их работу в составе соответствующих приборов КА (рисунок 11, *б*). Данный комплекс успешно внедрен в производственный процесс АО «ИСС» и реализует функции обработки



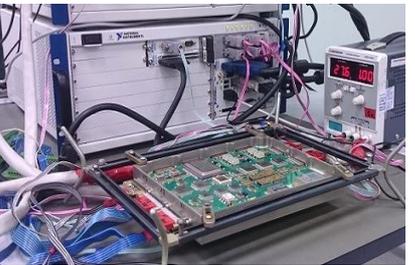
Конструктивно-технологическая реализация оборудования измерительной цепи на базе платформы PXI



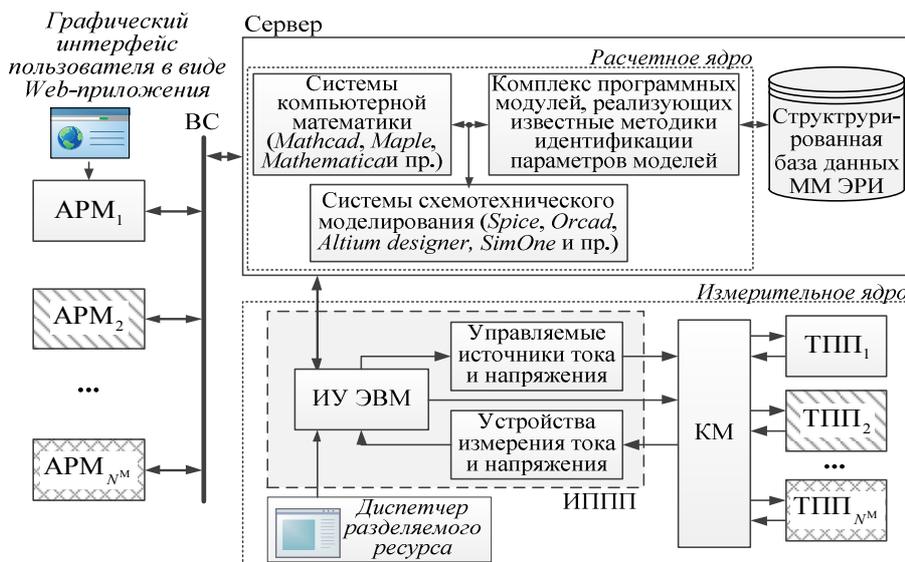
а



Конструктивно-технологическая реализация на базе платформы PXI



б



Конструктивно-технологическая реализация измерительного ядра на базе многофункционального устройства сбора данных и макетного коннектора



в

Рисунок 11 – Разработанные опытные образцы МРИУС: а – МРИУС квалификационных испытаний ЗССС; б – аппаратно-программный эмулятор ИМС систем управления КА; в – интегрированная многопользовательская система идентификации параметров моделей полупроводниковых приборов

команд управления и измерительной информации восьми блоков ИМС с требуемыми задержками на базе одной платы реконфигурируемого цифрового ввода/вывода, управляемой посредством ЭВМ. Использование комплекса позволило в несколько раз сократить расходы на обеспечение проведения тестирования ПО ВМ, сократить время его отработки, реализовать в наземных условиях ряд методик моделирования нештатных ситуаций функционирования КА на орбите при искусственном внесении неисправностей (ошибки обмена, частичная неисправность или выход из строя основного/резервного комплекта ИМС, неисправность узла, системы, агрегата КА и пр.), а также обеспечило сокращение до 50 % срока разработки эмуляторов для вновь проектируемых приборов КА.

Предложена схема построения интегрированной многопользовательской системы идентификации параметров моделей полупроводниковых приборов (рисунок 11, в), предназначенной для сопровождения процесса разработки современных конкурентоспособных образцов РЭС на основе систем схемотехнического и системотехнического моделирования, которая позволяет повысить производительность соответствующих работ.

В пункте 6.1.2 рассматриваются исследовательские возможности и проектные технические характеристики ряда разработанных и созданных промышленных образцов МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований с улучшенными в среднем на 20–30 % показателями технического уровня. Данные промышленные образцы МРИУС реализованы в виде многопользовательских аппаратно-программных комплексов с удаленным доступом (АПК УД) и успешно внедрены в процесс подготовки кадров ряда учреждений высшего образования РФ. Варианты конструктивного исполнения образцов приведены на рисунках 12 и 13.

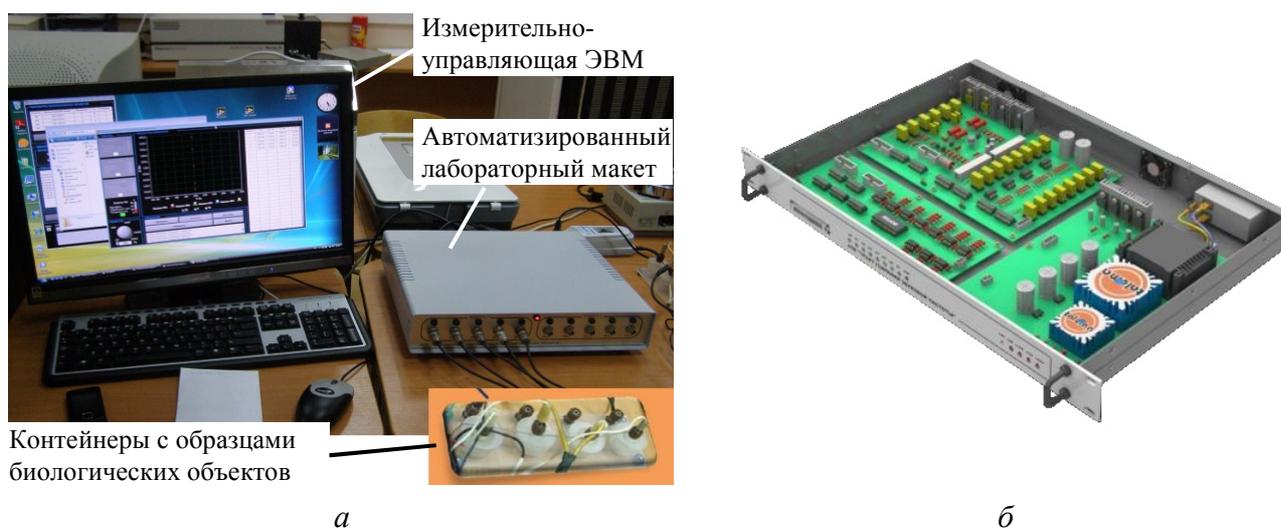
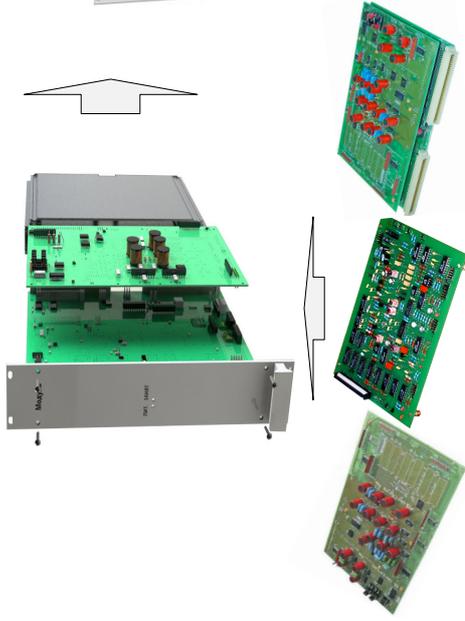


Рисунок 12 – Конструктивное исполнение созданных образцов МРИУС:  
 а – многопользовательский АПК УД «Электропроводность биологических объектов»;  
 б – автоматизированный лабораторный макет многопользовательского АПК УД «Тракт усиления звуковой частоты»

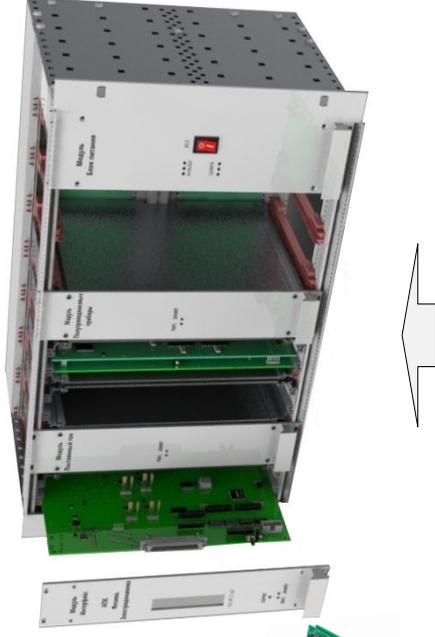
### Комплекс объектных модулей в виде стандартных кассет 6U



#### — 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 аппаратных компонентов на базе стандартного крейта 6U



#### Унифицированные модули в виде стандартных кассет 6U



Функциональный  
модуль «Интерфейс»

Телекоммуникационный шкаф  
системы конструкторов  
«Евромеханика» 19"»

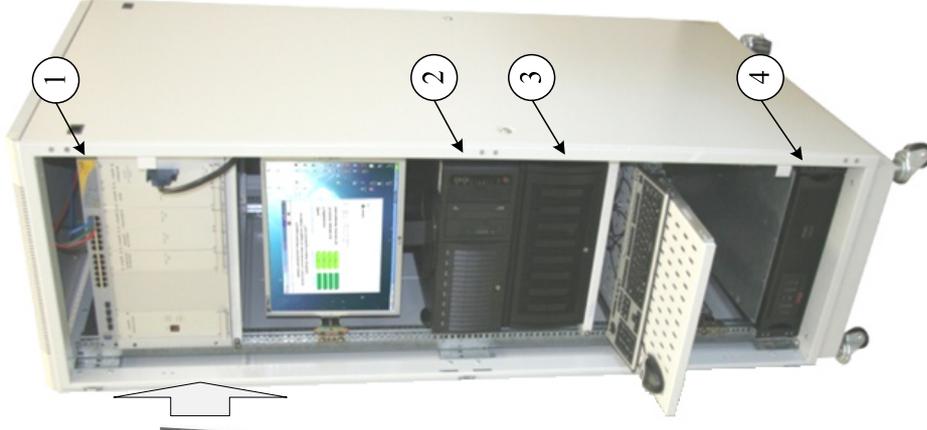


Рисунок 13 – Конструктивное исполнение МРИУС автоматизации научных и учебных экспериментальных исследований на базе семейства унифицированных конструкторов стандарта «Евромеханика»: 1 – коммуникационное оборудование; 2 – центральный сетевой сервер; 3 – измерительно-управляющая ЭВМ с многофункциональным устройством сбора данных; 4 – источник бесперебойного питания

Прикладное ПО многопользовательских АПК УД доведено до уровня законченного программного продукта и зарегистрировано в Роспатенте. Методическое обеспечение представлено в виде ряда учебных пособий (в том числе с грифом профильных учебно-методических объединений), в которых изложены основные подходы организации, а также отработанные методики выполнения экспериментальных исследований на основе созданных АПК УД. Рабочая документация на АПК УД представлена интерактивными электронными техническими руководствами и руководствами пользователя, зарегистрированными в установленном порядке в качестве электронных изданий.

Экспериментальные исследования параметров и характеристик ряда промышленных образцов МРИУС автоматизации научного и учебного эксперимента как СМО проведены в ходе их эксплуатации на базе СФУ в период с 2015 г. по 2018 г. и рассмотрены в *параграфе 6.2*.

В ходе опытной эксплуатации ряда многопользовательских АПК УД апробирована предложенная методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям эксплуатации. На основе накопленных статистических данных о параметрах процесса функционирования были проведены изменения организационного обеспечения в части развертывания дополнительных локаций доступа к АПК УД, а также выполнена направленная модификация реализуемого алгоритма диспетчеризации. Для разработанной *подпрограммы регистрации и накопления статистических данных* экспериментально подтверждена достаточность регистрируемой на ее основе информации.

В *параграфе 6.3* приведены результаты экспериментальной проверки эффективности применения разработанных в диссертации методов повышения оперативности функционирования на базе созданного промышленного образца МРИУС.

Эффект, полученный от внедрения результатов диссертационного исследования в области автоматизации экспериментальных исследований в промышленности и отраслевой системе подготовки кадров, в целом обобщен в *параграфе 6.4*.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы в целом.

**В приложении** приведены: описания разработанных многопользовательских АПК УД; документы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационной работы; патенты на изобретения.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

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. При этом в диссертации:

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, характеризующий эффективность организации режима коллективного пользования единичными экземплярами оборудования (разделяемыми ресурсами), выделены направления совершенствования МРИУС и комплекс целевых мероприятий, 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 и дополненная базовая имитационная модель динамики функционирования МРИУС как системы массового обслуживания, 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, 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. 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, синтезируемых на этапе разработки МРИУС 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.

5. Разработан комплекс решений ряда проектных задач, возникающих в процессе разработки МРИУС, который представлен набором базовых структур аппаратного построения; алгоритмами диспетчеризации разделяемого ресурса на основе предложенных методов; комплексом базового измерительного обеспечения; базовыми шаблонами проектирования графического интерфейса

пользователя, 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 операции измерения.

6. Разработана 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 математических моделях, методах повышения оперативности функционирования, комплексе решений и использовании разработанных частных методик. 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.

7. Разработана методика адаптации МРИУС к изменяющимся условиям их эксплуатации на основе созданной специализированной подпрограммы регистрации и накопления статистических данных, реализующая сопровождение и анализ процесса функционирования, а также последующую адаптацию на этапах опытной и промышленной эксплуатации в соответствии с заданными и фактическими значениями технических характеристик функционирования МРИУС 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. 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.

10. Разработанные в результате решения поставленных в диссертации задач методы, модели, методики и комплекс решений в целом формируют предметно-ориентированную методологию проектирования МРИУС, 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 экземпляра оборудования (разделяемого ресурса), что позволяет создавать образцы МРИУС с улучшенными показателями технического уровня.

11. Полученные и апробированные теоретические и практические результаты диссертационной работы в целом могут быть также положены в основу формирования платформы Интернета вещей (*Internet of Thing*) на основе Международного стандарта ISO/IEC 30141:2018, ориентированной на реализацию сервисной модели доступа к единичным экземплярам специализированного оборудования для проведения эксперимента (*Laboratory as a service*) на базе современной высокотехнологичной цифровой образовательной среды.

**Перспективы дальнейших исследований** связаны с развитием тематики диссертационной работы 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 в процессе их эксплуатации 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.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК РФ***

1. 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.
2. Комаров, В. А. 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.

3. Комаров, В. А. Сетевой учебно-исследовательский центр коллективного пользования уникальным лабораторным оборудованием на базе веб-портала как элемент системы дистанционного образования / А. С. Глинченко, М. Л. Дектерев, К. Н. Захарьин, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов // Открытое образование. – 2009. – № 5. – С. 18–29.

4. 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.

5. 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.

6. Комаров, В. А. Исследовательский комплекс спектрально-весаго измерения параметров сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров // Измерительная техника. – 2011. – № 1. – С. 51–55.

7. Комаров, В. А. Спектрально-весаго измерения параметров полигармонических сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 2. – С. 6–12.

8. Комаров, В. А. Исследование случайных погрешностей спектрально-весаго измерения параметров сигналов / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 4. – С. 7–11.

9. Комаров, В. А. Распараллеливание функциональных операций в многопользовательских распределенных измерительно-управляющих системах / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, А. В. Сарафанов // Датчики и системы. – 2012. – № 4. – С. 2–5.

10. Комаров, В. А. Компьютерные спектральные измерения и их приложения / А. С. Глинченко, В. А. Комаров, О. А. Тронин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 9. – С. 25–29.

11. Комаров, В. А. 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.

12. Комаров, В. А. Задачи автоматизации спектральных измерений в диапазоне частот / А. С. Глинченко, В. А. Комаров // Измерительная техника. – 2012. – № 6. – С. 60–64.

13. 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.

14. Комаров, В. А. Исследование вероятностно-временных характеристик многопользовательской системы квалификационных испытаний земных станций спутниковой связи // Научные технологии. – 2015. – № 3. – С. 48–51.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Комаров, В. А. Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов, С. Р. Тумковский // Информационные технологии. – 2021. – №1. – С. 41–50.

***Работы в изданиях из Перечня ВАК РФ, индексируемые в базах Scopus и Web of Science***

19. 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.

20. Komarov, V. A. 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.

21. 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.

22. 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.

23. Комаров, В. А. Многопользовательские измерительно-управляющие системы как элемент современной цифровой образовательной среды / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов, С. Р. Тумковский // Информационно-управляющие системы. – 2019. – №2. – С. 83–94.

24. Komarov, V. A. Analysis of the effectiveness of the method of qualification tests for satellite communications earth station / V. A. Komarov, S. O. Pazderin // Measurement Techniques. – 2019. – Vol. 62, no. 4. – P. 307–311.

25. Комаров, В. А. Сравнение эффективности методов повышения пропускной способности экспериментального оборудования с удаленным доступом / В. А. Комаров, А. В. Сарафанов, С. Р. Тумковский // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 6. – С. 68–76.

***Патенты на изобретение***

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. Пат. 2620596 Российская Федерация, МПК H04B 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.

31. 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.

32. 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.

### ***Монографии***

33. Комаров, В. А. Компьютерные спектральные измерения параметров сигналов: монография // А. С. Глинченко, В. А. Комаров. – Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2010. – 176 с.

### ***Свидетельства о государственной регистрации***

34. 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; опубл. 18.01.2008.

35. 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.

36. 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.

37. 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; опубл. 14.11.2008.

38. 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.

39. 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.

40. 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., Суковатая И. Е. и др. – № 2010614521; заявл. 27.06.2010; опубл. 23.09.2010.

41. 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; опубл. 01.10.2010.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. 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.

48. 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.