

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ  
ИМЕНИ В.М. МАТРОСОВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИДСТУ СО РАН)

УДК 004:4; 004:7

Рег. № НИОКТР АААА-А17-117032-100784

Рег. № ИКРБС

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДСТУ СО РАН

академик



И.В. Бычков

2019 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ  
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ  
ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ: МЕТОДЫ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ  
СРЕДСТВА, ПРИЛОЖЕНИЯ  
(промежуточный, этап 3)

Приоритетное направление IV.38. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей.

Развитие технологий и стандартов GRID

Программа IV.38.1. Методы и технологии создания и интеграции гетерогенных распределенных информационно-вычислительных ресурсов для поддержки междисциплинарных научных исследований на основе сервис-ориентированной парадигмы

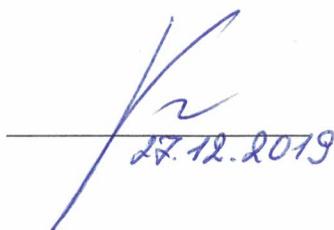
Руководитель НИР,  
академик

И.В. Бычков  
подпись, дата 27.12.2019

Иркутск 2019

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы  
академик



27.12.2019

И.В. Бычков (введение, разделы 1-2,  
заключение)

Исполнители темы:

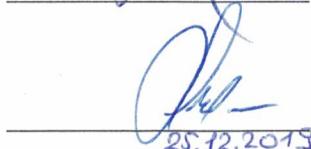
зам. директора по н.р.  
д-р техн. наук



25.12.2019

Г.А. Опарин (введение, раздел 1,  
заклучение)

зам. директора по н.р.  
канд. техн. наук



25.12.2019

Н.Н. Максимкин (введение, раздел  
2, заклучение)

зам. лаб.  
канд. техн. наук



25.12.2019

А.П. Новопашин (раздел 1)

зав. лаб.  
канд. техн. наук



25.12.2019

С.А. Ульянов (раздел 2)

вед. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук



25.12.2019

А.А. Косов (раздел 2)

вед. науч. сотр.  
канд. техн. наук



25.12.2019

А.Г. Феоктистов (раздел 1)

ст. науч. сотр.  
канд. техн. наук



25.12.2019

В.Г. Богданова (раздел 1)

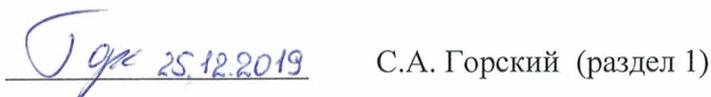
ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук



25.12.2019

Н.В. Нагул (раздел 2)

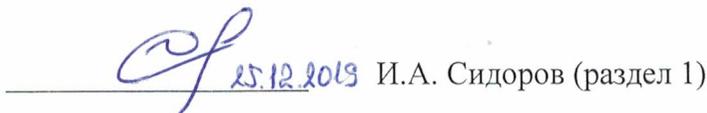
науч. сотр.  
канд. техн. наук



25.12.2019

С.А. Горский (раздел 1)

науч. сотр.  
канд. техн. наук



25.12.2019

И.А. Сидоров (раздел 1)

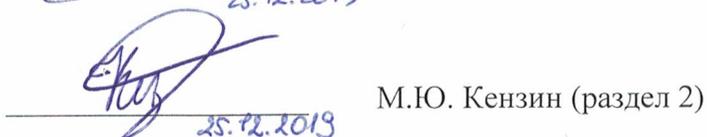
науч. сотр.



25.12.2019

А.В. Давыдов (раздел 2)

мл. науч. сотр.



25.12.2019

М.Ю. Кензин (раздел 2)

мл. науч. сотр.	 _____ 25.12.2019	Р.О. Костромин (раздел 1)
мл. науч. сотр.	 _____ 25.12.2019	А.А. Пашинин (раздел 1)
программист	 _____ 25.12.2019	Д.А. Костылев (раздел 2)
программист	 _____ 25.12.2019	А.А. Ларионов (раздел 2)
программист	 _____ 25.12.2019	А.А. Толстихин (раздел 2)
Нормоконтролёр канд. техн. наук.	 _____ 25.12.2019	Е.С. Фереферов

## РЕФЕРАТ

Отчет 75 с., 16 рис., 1 табл., 106 источн., 1 прил.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ, ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ, МУЛЬТИАГЕНТНЫЕ, САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ, ДВОИЧНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ И ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫЕ СИСТЕМЫ, АВТОНОМНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ, ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ.

Объектом настоящей НИР являются проблемно-ориентированные самоорганизующиеся мультиагентные системы группового управления.

Целью настоящей НИР является разработка фундаментальных основ и инструментальных средств создания проблемно-ориентированных самоорганизующихся мультиагентных систем группового управления.

В ходе выполнения этапа НИР 2019 г. разработаны новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях; разработана новая технология создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети; разработаны язык логического программирования и командный интерпретатор, базирующиеся на исчислении позитивно-образованных формул и методах автоматического доказательства теорем; разработаны алгоритмы управления неголономными агентами в мультиагентной системе с изменяемым лидером; разработана информационно-коммуникационная технология обеспечения взаимодействия автономных распределенных компонент гетерогенной робототехнической группировки, выполняющей динамическую миссию в режиме реального времени; разработаны алгоритмы качественного исследования многокомпонентных дискретно-событийных систем и систем с переключениями.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
ВВЕДЕНИЕ .....	6
<b>1 Разработка методов и средств создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации.....</b>	<b>29</b>
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	71

## ВВЕДЕНИЕ

*Оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы и обоснование необходимости проведения НИР.*

Анализ методов и средств организации распределенных вычислений (см., например, работы С.М. Абрамова, А.И. Аветисяна, В.Б. Бетелина, А.В. Бухановского, В.Е. Велихова, Вл.В. Воеводина, В.П. Гегеля, Б.М. Глинского, В.П. Иванникова, И.А. Каляева, В.Н. Коваленко, И.И. Левина, Л.Б. Соколинского, В.В. Стегайлова, В.В. Топоркова, D. Andersen, K. Bubendorfer, R. Buyya, J. Dongarra, I. Foster, P. Sloot и других известных специалистов) позволяет сделать вывод о том, что обеспечение эффективного управления приложениями для решения больших задач в гетерогенной среде является нетривиальной проблемой и требует разработки новых моделей, методов, алгоритмов и инструментальных средств, направленных на решение различных аспектов этой проблемы. В первую очередь, речь идет о повышении степени предметной ориентированности и интеллектуальности технологий организации гетерогенных сред.

Анализ результатов исследований в области мультиагентных систем (МАС) и группового управления робототехническими комплексами (см., например, работы С.Н. Васильева, В.И. Городецкого, И.А. Каляева, В.Х. Пшихопова, П.О. Скобелев, А.Л. Фрадкова, А.Ф. Щербатюка, Y. Cao, G. Di Marzo Serugendo, V. Moore, K. Passino, H.G. Tanner, F. Zambonelli) показывает, что в настоящее время отсутствуют достаточно общие подходы к решению проблемы эффективного взаимодействия и управления группировками роботов при их функционировании в заранее неизвестной и недетерминированной среде, особенно если эта среда представляет потенциальную угрозу безопасности функционирования, как отдельных элементов группы, так и группы в целом. Это обуславливает необходимость в разработке новых конструктивных средств анализа и построения систем управления, обеспечивающих автономное формирование сложного поведения группы для эффективного выполнения множества целевых задач с учетом различных факторов неопределенности, присущих реальным условиям функционирования роботов.

*Актуальность и новизна исследований в рамках НИР.* Во многих сферах человеческой деятельности, связанных с использованием сложных технических систем, актуальной проблемой является организация эффективного группового управления объектами различной природы, например, автономными мобильными роботами или распределенными вычислительными устройствами, в процессе решения сложной прикладной задачи на основе коллективного взаимодействия этих объектов. Такое

взаимодействие осуществляется посредством передачи сигналов (сообщений) между управляющими программами объектов в их коммуникационной среде. В общем случае групповое управление реализуется в информационно-вычислительной сети, формируемой путем соединения программно-аппаратных устройств управления объектов каналами связи. Учитывая динамическую природу используемых технических систем, целесообразно применять адаптивное управление, обеспечивающее синтез или настройку регулятора системы управления в зависимости от изменения состояний объекта управления и внешней среды, воздействующей на объект. Перспективным подходом к организации адаптивного группового управления в информационно-вычислительной сети является использование мультиагентных технологий. В рамках такого подхода отдельные объекты представляются специализированными приложениями (агентами), образующими в совокупности МАС управления. Анализ результатов исследований в области самоорганизации технических систем (см., например, работы В.И. Городецкого, И.А. Каляева, G. Di Marzo Serugendo, F. Zambonelli) показывает, что эффективное управление технической системой с помощью МАС достигается путем автономного формирования оптимальных алгоритмов функционирования и оптимальной структуры МАС в соответствии с заданной целью, определенными критериями качества и особенностями предметной области решаемой задачи, а также условиями внешней среды.

*Обоснование необходимости проведения НИР.* Построение проблемно-ориентированной самоорганизующейся МАС для систем группового управления порождает ряд проблем, связанных с автоматизацией процессов: разработки агентов и агентных платформ, реализации эффективных и надежных алгоритмов функционирования агентов, накопления и применения предметных знаний агентами, интеграции агентских и сервис-ориентированных технологий, реализации семантического взаимодействия агентов на основе распределенной базы знаний предметной области, построения динамической булевой модели такого взаимодействия и исследования ее свойств методами качественного анализа. Существующие в настоящее время инструменты для создания МАС не позволяют решить вышеперечисленные проблемы в полной мере. В этой связи возникает необходимость создания технологии разработки проблемно-ориентированных самоорганизующихся МАС группового управления, включая методы, инструментальные средства и приложения.

Исследования в рамках НИР организованы в виде двух блоков: Блок 1 – «Методы и средства создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях»;

Блок 2 – «Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации».

# **1 Разработка методов и средств создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях**

*Целью блока проекта* является разработка новой технологии организации и применения проблемно-ориентированных МАС для эффективного управления масштабируемыми приложениями в гетерогенных вычислительных сетях в рамках поддержки проведения междисциплинарных научных исследований.

*Задачи этапа НИР по блоку в 2019 году:*

- 1) Разработать новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях.
- 2) Разработать новую технологию создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети.

*Выбор направления исследований* обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

*Характеристика задач и результаты исследований:*

- 1) **Разработка новых методов обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях.**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач.* В настоящее время обеспечение отказоустойчивости вычислительного процесса в распределенных вычислительных сетях (РВС), например, в Grid-системах или облачных платформах, по-прежнему остается актуальной проблемой. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является применение мультиагентных технологий. Авторами предлагается новый мультиагентный алгоритм для перераспределения вычислительных ресурсов РВС в случае отказа процесса решения задачи. Остаточный план решения задачи формируется с использованием методов конкретизирующего программирования. Для его выполнения формируется виртуальное сообщество агентов, представляющих ресурсы сети. В отличие от известных алгоритмов подобного назначения предложенный алгоритм реализует адаптивное и мультисценарное решение данной задачи и тем самым повышает степень отказоустойчивости вычислительного процесса. Работа алгоритма базируется на использовании конечно-автоматной модели эффективного и надежного взаимодействия агентов виртуального сообщества.

Проблема восстановления вычислительного процесса (задания) вследствие отказа программно-аппаратного обеспечения актуальна при решении больших фундаментальных и прикладных задач в разнородных РВС. Существуют различные подходы к решению данной проблемы [1]. В частности, широко применяемым на практике подходом к перезапуску заданий является механизм контрольных точек [2]. Однако формирование пользовательских контрольных точек в узле вычислительной сети, в котором выполняется вычислительный процесс, не позволяет произвести рестарт в случае отказа самого узла. Создание же системных контрольных точек на уровне операционной системы, обеспечивающих перенос задания в другие узлы, влечет существенные накладные расходы и поддерживается далеко не всеми средствами управления вычислениями.

*В результате решения задачи* разработан новый метод обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях. Этот метод в отличие от других методов обеспечения надежности распределенных вычислений [3, 4] базируется на применении нового адаптивного, мультисценарного алгоритма перераспределения вычислительных ресурсов РВС в случае отказа процесса решения задачи. Предложены новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений путем интегрированного тестирования в узлах сети как модулей, так и планов решения задач, в которые эти модули входят. Результаты решения поставленной в проекте задачи опубликованы в [5-19].

Построение плана решения задачи базируется на использовании концептуальной модели сети [20], в которой определены множества  $Z$ ,  $F$  и  $M$ , представляющие соответственно наборы параметров, операций и программных модулей модели. Параметры, операции и их взаимосвязи отражают схемные знания. Операции из  $F$  определяют вычислительные действия на множестве параметров  $Z$ . Модули представляют собой программную реализацию операций.

Постановки задач формулируются как в полной, так и в сокращенной форме. Сокращенная постановка задачи может быть процедурной или не процедурной. План решения задачи (абстрактная программа) строится на основе сформулированной постановки задачи [21]. В модели может существовать несколько эквивалентных планов решения задачи, представленных множеством  $P$ . План  $p \in P$  указывает, какие операции должны быть выполнены для решения задачи и последовательность их выполнения. Полная постановка задачи  $p_f$  совпадает с планом  $p$ . Она определяется структурой  $p_f = \langle F_p, X_0, Y_0 \rangle$ , где  $F_p \subset F$  – множество операций,  $X_0 \subset Z$  – множество исходных параметров,  $Y_0 \subset Z$  – множество целевых параметров.

В общем случае  $p$  является поливариантным планом решения задачи. В этом случае он описывает альтернативные алгоритмы решения задачи. Пусть множество модулей  $M_p$  заменит множество операций  $F_p$  в описании плана  $p$ .

Разработана новая схема автоматизированной сборки и тестирования модулей распределенных пакетов прикладных программ (РППП) в инструментальном комплексе Orlando Tools. Данная схема включает следующие основные этапы: разработку и модификацию исходного кода модулей, их компиляцию, отладку и тестирование в узлах сети, обновление библиотек модулей, подготовку образов виртуальных машин, используемых Orlando Tools, с новыми версиями модулей, их установку на ресурсы сети, подготовку тестовых данных, автоматическое построение тестовых планов решения задач, их выполнение и отладку в сети. Для работы с исходным кодом модулей в Orlando Tools применяется система управления версиями программного обеспечения Git. Она поддерживает функции для быстрого разделения и слияния версий исходного программного кода модулей РППП. В качестве системы управления Git-репозиториями задействована платформа GitLab, обеспечивающая такие функции, как анализ программного кода, обнаружение ошибок, тестирование и т.п. Для работы с бинарными версиями модулей используется система JFrog Artifactory. Она предоставляет необходимые интерфейсы для работы с разнообразными пакетными менеджерами программного обеспечения. Специальный API используется для взаимодействия Orlando Tools с вышеупомянутыми системами при управлении процессами автоматизированной сборки и тестирования модулей РППП, выполняемых с помощью этих систем. Orlando Tools поддерживает мета-описание всех процессов автоматизированной сборки и тестирования модулей, а также автоматическое тестирование планов решения задач. Таким образом, в Orlando Tools реализованы новые методы обеспечения надежности выполнения РППП (масштабируемых приложений) путем интегрированного тестирования в узлах сети как модулей, так и планов решения задач, в которые эти модули входят.

На рисунке 1 приведен пример поливариантного плана решения задачи. Два альтернативных варианта его специализации приведены на рисунках 2 и 3. Предполагается, что модули  $m_5$  и  $m_6$  вычисляют значения одного и того же параметра с помощью различных алгоритмов или предъявляют разные требования к ресурсам сети и критериям эффективности вычислительного процесса в целом.

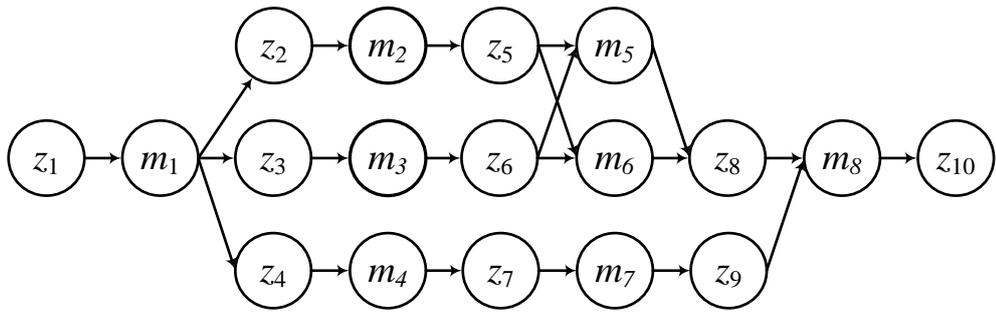


Рисунок 1 – Поливариантный план решения задачи

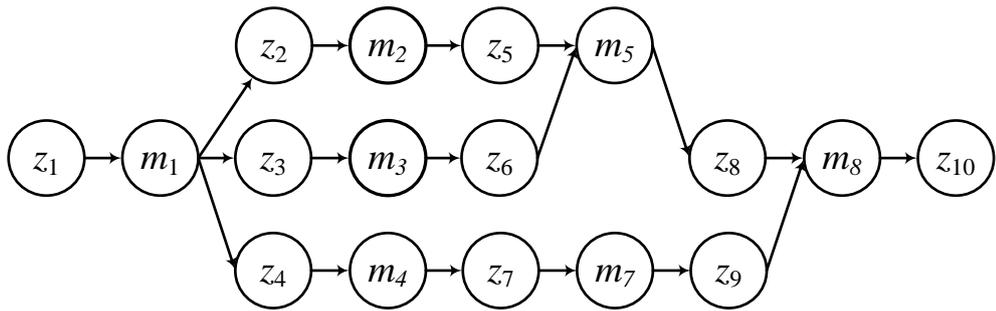


Рисунок 2 – План решения задачи с использованием модуля  $m_5$

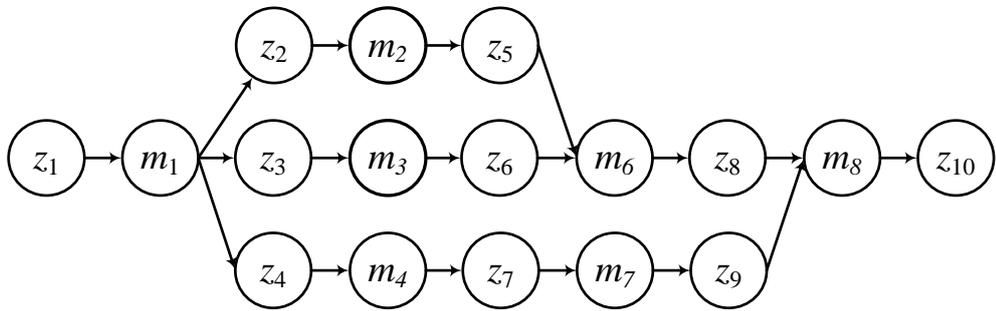


Рисунок 3 – План решения задачи с использованием модуля  $m_6$

Выполнение плана решения задачи  $p$  осуществляется в режиме интерпретации. Пусть выполнено множество  $M_e \subset M_p$  модулей,  $|M_e| = n_e$ . Тогда множество  $M_u = M_p \setminus M_e$  будет включать модули плана  $p$ , которые уже выполняются или ожидают своего запуска,  $|M_e| = n_u$ . Остаточным планом решения задачи будем называть план  $p_u$ , который определяется следующей структурой  $\langle M_u, X_u, Y_u \rangle$ , где  $X_u = X_o \cup \left( \bigcup_{l=1}^{n_e} Z_l^{out} \right)$ ,  $Y_u = Y_o \cap \overline{\left( X_o \cup \left( \bigcup_{l=1}^{n_e} Z_l^{out} \right) \right)}$ , множества  $X_u$  и  $Y_u$  представляют соответственно исходные и

целевые параметры остаточного плана,  $i_l \in \overline{1, n_m}; m_i \in M_e$ . Следует отметить, что множество  $X_u$  представляет промежуточные результаты вычислений.

На рисунке 4 изображен остаточный план решения задачи. Серым цветом заливки выделены еще выполняющиеся модули  $m_4$  и  $m_5$ . Модули  $m_7$  и  $m_8$  ожидают своего запуска. Модуль  $m_6$  может быть задействован в случае, выполнение модуля  $m_5$  будет невозможно. Модуль  $m_6$  реализует вычислительную избыточность исходного плана решения задачи.

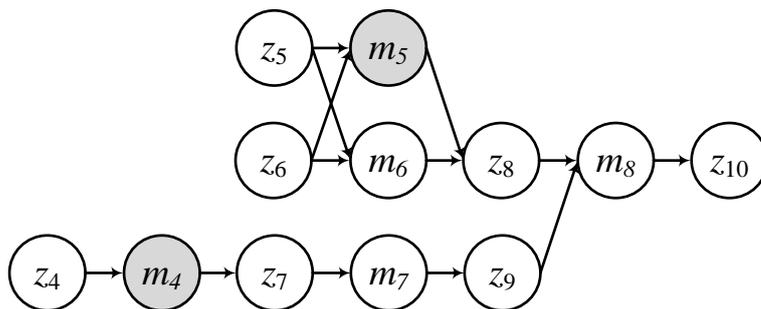


Рисунок 4 – Остаточный план решения задачи

Модель системы диагностики, отражающая совокупность основных элементов системы и информационно-логических связей между ними, представлена структурой  $S = \langle O, PAR, T, Z, F, R, PR, L, I \rangle$ , где  $O$  – множество диагностируемых объектов в узлах сети,  $PAR$  – множество атрибутов (параметров) исследуемых объектов,  $T$  – множество типов параметров,  $Z$  – множество логических параметров,  $F$  – множество контрольно-диагностических операций (действий),  $R$  – множество типов операций,  $PR$  – множество продукций, определяющих условия применения операций,  $L$  – системный журнал диагностики,  $I$  – периоды запуска диагностики объектов сети, соответствующие их режимам функционирования в разные периоды времени.

Используются следующие характеристики узлов сети, программных модулей и агентов виртуального сообщества, представляющих ресурсы сети [22]: характеристики нагрузки компонентов вычислительных узлов (процессоров, их ядер, модулей оперативной памяти, различных сетевых элементов, жестких дисков и др.); показатели физического состояния компонентов вычислительных узла (температуры процессоров, модулей памяти и материнских плат, работоспособности систем бесперебойного питания, систем хранения данных и др.); особенности процессов выполнения модулей (приоритеты и статусы процессов, использованное процессорное время, объемы используемой

оперативной памяти, число обращений к жестким дискам и сетевым элементам и др.); свойства работы агентов виртуального сообщества (роли агентов, параметры взаимодействия агентов с другими агентами сообщества и др.).

Основными типами отказов, диагностируемых в системе метамониторинга, являются следующие отказы: нештатное завершение вычислительного процесса; нехватка оперативной памяти для выполнения процесса; сбой операций чтения/записи данных; недоступность требуемого объема свободного места в системе хранения данных для записи результатов вычислений; отсутствие доступа к предметным базам данных; нарушение взаимодействия с другими узлами и агентами среды (в том числе сбой передачи данных); отказы операционной системы узла, приводящие к потере его работоспособности; отказы аппаратных средств (систем охлаждения, сетевых интерфейсов, модулей памяти, процессоров и других устройств).

Основные типы отказов, учитываемые в системе метамониторинга, их признаки и причины возникновения описаны в [23] с различной степенью детализации. Основными диагностируемыми объектами РВС являются следующие: вычислительные узлы, агенты и модули РППП.

Рассматриваются следующие отказы объектов: отказ вычислительного узла (например, узел находится в нерабочем состоянии, не отвечает в течение заданного периода времени и т.п.); отказ агента (например, агент не отвечает в течение заданного периода времени, не может получить актуальную информацию о вычислительных процессах и т.п.); отказ модуля (аварийное завершение его выполнения, ошибки при вычислении его параметров и т.п.). В целом рассмотренные отказы в некоторой степени обобщают разнообразные признаки и причины неисправностей диагностируемых объектов.

Таким образом, отказы объектов приводят к необходимости принятия решения о выборе управляющего воздействия в сети: выполнении модуля плана решения задачи в резервном узле, выполнении модуля плана решения задачи другим агентом, передачи управления модулем другому агенту или выполнении альтернативного модуля.

Используемая система метамониторинга в отличие от известных обладает следующим набором функциональных возможностей:

- возможностью получения данных от широко используемых на практике локальных систем мониторинга (Ganglia, Nagios, Zabbix и др.);
- широким спектром традиционных и оригинальных функций для получения и сбора данных об программно-аппаратных компонентах узлов сети;

- высокоуровневым инструментарием, реализующем функций для получения и сбора данных в виде модулей на разных языках программирования;
- специализированными инструментами сбора и анализа данных инженерной инфраструктуры высокопроизводительных вычислительных кластеров и центров обработки данных;
- вспомогательными средствами унификации и агрегирования разноформатных данных, получаемых из разнообразных источников;
- интеллектуальными подсистемами автоматизированного экспертного анализа данных мониторинга и выработки управляющих воздействий для устранения последствий отказов;
- инструментальными средствами периодического контроля работоспособности узлов, а также обнаружения, диагностики и частичного устранения отказов узлов;
- специальным API, реализованном на основе открытых стандартов для обеспечения доступа к данным мониторинга для внешних программных систем.

В МАС реализован новый алгоритм перераспределения вычислительных ресурсов РВС для улучшения отказоустойчивости процесса решения задачи. Алгоритм включает следующие основные этапы работы: обнаружение отказа, обработка отказа, выбор сценария для обеспечения отказоустойчивости выполнения плана решения задачи и построение остаточного плана решения задачи.

На первом шаге определение и исправление отказа осуществляется средствами системы метамониторинга. Далее агенты этой системы запускают процедуру обработки отказа, включающую частичное устранение его последствий и реконфигурацию совокупности доступных ресурсов сети. Кроме того, они выполняют сбор и передачу необходимой информации агентам виртуального сообщества.

На основе полученных данных агенты осуществляют выбор сценария, обеспечивающего требуемую отказоустойчивость процесса выполнения плана решения задачи. В случае, когда узел агента выходит из строя во время выполнения модуля, агент сам принимает решение о выполнении этого модуля на одном из своих резервных узлов, если такие имеются у него в наличие. Во всех остальных случаях агенты осуществляют коллективный выбор подходящего сценария.

На последнем этапе агенты в процессе торгов борются за право выполнить модули остаточной схемы решения задачи в соответствии с выбранным сценарием. Формирование остаточного плана решения задачи производится с помощью редукции (сокращения) избыточных вычислений.

Состав виртуального сообщества агентов, выполняющих план решения задачи, обновляется после назначения новых агентов для выполнения модулей. Выделение ресурсов агентами осуществляется с учетом различий вычислительных характеристик узлов РВС при реализации многоуровневого параллелизма алгоритма решения задачи.

Модуль может быть выполнен другим агентом в случае всех трех отказов. Кроме того, при отказе узла модуль может быть выполнен также в резервном узле. Дополнительно, при отказе модуля выполнявшегося плана решения задачи, может быть выполнен модуль эквивалентного плана решения задачи.

Применяется один из трех возможных вариантов выбора агента, который будет выполнять модуль:

- централизованное (директивное) назначение модуля другому агенту, имеющему возможность выполнить данный модуль, координатором выполнения плана решения задачи;
- децентрализованное назначение модуля путем проведения торгов между агентами, которые могут выполнить данный модуль;
- децентрализованное распределение модулей остаточного плана решения задачи путем проведения торгов между агентами, которые могут принять участие в выполнении модулей остаточного плана.

*Алгоритм.* Пусть множество  $Q \subset Z$  включает совокупность простых и составных логических параметров, которые могут принимать значения 0, 1 или  $\theta$ . Будем считать, что составной параметр реализует некоторое логическое выражение, сформированное из набора простых и логических операторов с помощью логических операторов. Составной параметр не определен, если не определен хотя бы один из входящих в его состав параметров. Множества  $F$  и  $PR$  – это соответственно совокупности действий по обработке отказов и продукций, задающих условия применения действий:  $pr_i : q_j \Rightarrow f_k$ . Выражение  $q_j \Rightarrow f_k$  представляет собой ядро продукции, интерпретируемое как выбор действия  $f_k \in F$  по обработке отказа в соответствии с условием  $q_j \in Q$ . Каждой продукции назначен свой приоритет.

Связи между продукциями и логическими параметрами в левых частях их ядер представлены булевой матрицей  $W$  размерности  $n_{pr} \times n_z$ , где  $n_{pr}$  – число продукций,  $n_z$  – число логических параметров. Элемент матрицы  $w_{i,j} = 1$  означает, что продукция  $pr_i$  использует параметр  $q_j$ . Связи между продукциями и действиями представлены булевой матрицей  $C$  размерности  $n_{pr} \times n_f$ , где  $n_f$  – число действий. Элемент матрицы  $c_{i,k} = 1$

означает, что продукция  $pr_i$  описывает условия выполнения действия  $f_k$ . Зависимости между действиями представим булевой матрицей  $D$  размерности  $n_f \times n_f$ . Элемент матрицы  $d_{i,j} = 1$  означает, что действие  $f_i$  зависит от действия  $f_j$ .

Параметры  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \in \{0,1\}$  определяют соответственно работоспособность узла, наличие резервного узла, работоспособность модуля, наличие резервного модуля и работоспособность агента. Обозначим через  $n_{sc}$  номер сценария. Будем считать, что  $n_{sc} = 0$  в случае полностью работоспособной ситуации и  $n_{sc} = -1$ , когда ни один из сценариев нельзя применить.

Работа алгоритма строится следующим образом:

- 1) Формулировка непроцедурной постановки задачи: «вычислить  $Y_0$  по  $X_0$ », где  $X_0$  – это множество параметров, содержащих информацию о диагностируемых объектах, а  $Y_0$  – множество параметров, содержащих информацию о результатах диагностики.
- 2) Формирование множества  $PR^* = \{pr_{i_1}, pr_{i_2}, \dots, pr_{i_q}\}$  продукций, для которых определены истинные значения параметров  $q_{j_1}, q_{j_2}, \dots, q_{j_l} : w_{i_h, j_h} = 1 \quad \forall h = \overline{1, l}$ .
- 3) Если  $PR^* = \emptyset$ , то переход на шаг 9 (задача неразрешима).
  - а) Иначе  $\forall h = \overline{1, l}$ :
  - б) выполнение действия  $f_k : c_{i_h, k} = 1, Z_k^{in} \subseteq X_0$ ;
- 4) если действие  $f_k$  выполнено, то  $X_0 = X_0 \cup Z_k^{out}$ ,  $F = F \setminus \{f_k\}$ ,  $PR = PR \setminus \{pr_{i_h}\}$ .
- 5) Если  $Y_0 \subseteq X_0$ , то переход на шаг 7.
- 6) Иначе переход на шаг 2.
- 7) Выбор сценария в соответствии с таблицей решений (таблица 1).
- 8) Построение остаточного плана решения задачи.
- 9) Завершение работы алгоритма.

Таблица 1 – Таблица решений

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$n_{sc}$
0	0	0	0	0	-1
0	0	0	0	1	-1
0	0	0	1	0	4
0	0	0	1	1	4

Продолжение таблицы

0	0	1	0	0	2
0	0	1	0	1	2
0	0	1	1	0	2
0	0	1	1	1	2
0	1	0	0	0	-1
0	1	0	0	1	-1
0	1	0	1	0	4
0	1	0	1	1	4
0	1	1	0	0	2
0	1	1	0	1	1
0	1	1	1	0	2
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	-1
1	0	0	0	1	-1
1	0	0	1	0	4
1	0	0	1	1	4
1	0	1	0	0	3
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	0	3
1	0	1	1	1	0
1	1	0	0	0	-1
1	1	0	0	1	-1
1	1	0	1	0	4
1	1	0	1	1	4
1	1	1	0	0	3
1	1	1	0	1	0
1	1	1	1	0	3
1	1	1	1	1	0

Обработка предусловий продукций обеспечивает адаптацию работы алгоритма к текущему состоянию РВС и выбор наиболее подходящего сценария действий по устранению отказа. Для децентрализованного назначения модулей и резервирования узлов используются алгоритмы, предложенные в [24, 25].

Оценочное время на обнаружение сбоя во время диагностики в МАС составляет в среднем около 6 секунд. Традиционные метапланировщики HTCCondor [26] и Gridway [27] затрачивают на устранение отказов в среднем от 7 до 9 секунд при аналогичных с МАС настройках периодичности опроса состояния ресурсов. При отказе работы модуля только

МАС сможет продолжить вычисления с запуском альтернативного модуля плана решения задачи. НТCondor и Gridway аварийно завершат выполнение задания. Оценочное время на обнаружение сбоя во время диагностики и перехода к новому плану составляет в среднем около 8 секунд.

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* Разработанные методы и алгоритм, в отличие от известных, основываются на использовании интегрированных знаний о прикладных программных модулях, модульной структуре вычислительной модели приложения модели, правилах выбора оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния сети, свойствах приложений и их заданий, а также характеристиках программно-аппаратной инфраструктуры сети и административных политиках в ее узлах.

Применение разработанных методов и алгоритма позволило повысить эффективность процесса решения важных крупномасштабных практических задач исследования энергетической безопасности России и Вьетнама, а именно задач оценки вариантов развития энергетики страны с учетом требований энергетической безопасности [13, 15, 19], комплексной оценки последствий воздействия возможных чрезвычайных ситуаций на обеспечение потребителей энергоресурсами как внутри страны, так и за её пределами [5, 7]. Актуальность данных направлений исследований обоснована в работах [28, 29].

Поставленная в рамках блока задача решена *в полном объеме*.

*Достоверность полученных результатов* обеспечена корректным использованием методов и средств высокопроизводительных вычислений, анализом адекватности разработанных моделей и алгоритмов на основе полунатурного и имитационного моделирования [8, 11, 18], а также подтверждена результатами практического решения научных и прикладных задач в гетерогенных распределенных вычислительных средах.

**2) Разработка новой технологии создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети.**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач и их сравнительная оценка.* В последние годы в связи с активным развитием технологий распределенных вычислений большую значимость приобрели вопросы автоматизации расчетных работ в научных исследованиях, в частности, при решении задач качественного анализа двоичных динамических систем (ДДС), широко используемых в качестве математических моделей в криптографии, биоинформатике, исследовании отказоустойчивости компьютерных сетей

и ряде других предметных областей. Целью качественного анализа является определение как совокупности требований к динамическим показателям функционирования, так и набора требуемых динамических свойств, которым должно отвечать поведение системы [30]. По сути дела, речь идет о формировании динамического облика системы управления и связанного с этой задачей комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на уровне математических моделей, аналитических и численных методов их исследования. Процесс исследования динамики систем управления представляет собой последовательность многовариантных расчетов – вычислительных экспериментов, на каждом шаге которой варьируются структура и значения параметров модели, методов и методик, выполняются запланированные расчеты, проводится оценка результатов и принимается решение о дальнейшем направлении исследований. Разработка моделей и методов исследования динамики ДДС проводится на основе авторского метода булевых ограничений (Boolean Constraint Method, ВСМ [31]) и тесно связана с развитием технологии булева моделирования [32]. В соответствии с ВСМ проверка выполнимости в системе требуемого динамического свойства сводится к выполнимости некоторой совокупности ограничений на характер поведения траекторий ДДС. Для ДДС, функционирование которых рассматривается на конечном интервале времени, такие ограничения записываются на языке булевых уравнений (SAT задача) или булевых формул с кванторами (TQBF задача). ВСМ является декларативным методом, что позволяет за счет параллелизма по данным (путем расщепления булевой модели) существенно увеличить размерность вектора состояния ДДС и промежуток времени ее функционирования при решении задач качественного анализа в высокопроизводительной вычислительной среде, в отличие от алгоритмических методов, использующих SAT-подход [33, 34] и BDD-подход [35, 36], которые в силу структуры алгоритма плохо поддаются распараллеливанию [37].

Широта применения ДДС и практическая значимость решения задач качественного анализа ДДС актуализирует исследования, направленные на разработку технологии автоматизации компьютерного исследования динамики и параметрического синтеза ДДС с использованием средств и методов баз знаний и доказательного программирования. В разработанной технологии HPCATAMP (High Performance Computing Automated Technology for implementation of Applied Microservices Package, [38]) фундаментальную роль играет алгоритмическое знание и сборочное программирование. Под сборочным программированием имеется в виду стиль программирования, при котором для решения задачи собирается на основе механизмов самоорганизации набор готовых к использованию (повторно используемых) программных компонент, запуск которых

инициирует возникновение события. Используется децентрализованная дискретно-событийная модель вычислений. Первичным понятием в этой технологии является понятие пакета прикладных программ (ППП), точнее – пакета знаний, представляющего разновидность прикладной интеллектуальной системы. В основе разработки функционального наполнения ППП лежит модульный принцип. Согласно этому принципу функциональное наполнение есть набор базисных, сравнительно простых, автономных вычислительных модулей, композицией которых можно получить решение всех задач рассматриваемого класса. Для реализации ППП на основе облачной парадигмы вычислений хорошо подходит технология микросервисов.

В настоящее время направление, связанное с разработкой распределенных приложений на основе микросервисной архитектуры, активно развивается. Преимущества и недостатки микросервис-ориентированных приложений в сравнении с монолитными, вопросы, связанные с проектированием, созданием и развертыванием микросервис-ориентированных программных систем подробно рассматриваются в [39, 40]. Активно развиваются исследования, направленные на разработку средств автоматизации развертывания и тестирования микросервисов. В [41] выполнен анализ существующих методов тестирования, которые используются для таких распределенных систем и представлена собственная модель валидации микросервисной системы. В [42] предложен подход автоматической генерации самонастраивающегося микросервиса с учетом целевой среды выполнения. В [43] приводятся все еще остающиеся открытыми проблемы, в частности, связанные с автоматизацией выбора конфигураций микросервисов и их отображения на гетерогенные ресурсы вычислительной среды, спецификацией топологии и состава микросервисного приложения. Следовательно, важным научным направлением являются исследования, связанные с разработкой средств, обеспечивающих формирование композиции микросервисов, их повторное использование и упрощение взаимодействия с вычислительной платформой. Динамичность облачной вычислительной среды, сложность возникающих при проведении исследований в рассматриваемой выше предметной области переборных задач, обуславливает активизацию разработки ориентированных на микросервисы программных средств для их решения на основе самоорганизации и мультиагентного подхода [44, 45]. В качестве применения мультиагентной технологии при реализации микросервисной архитектуры выступают работы [46] и [47]. Мультиагентное управление ансамблем микросервисов на основе прямых взаимодействий агентов обеспечивает лучшую адаптируемость к динамическим средам и более высокую реактивность к внешним воздействиям по сравнению с косвенными [48, 49]. Учитывая недостатки и преимущества перечисленных выше

подходов, мы используем самоорганизующуюся мультиагентную систему (МАС) для организации децентрализованного управления распределенными научными вычислениями.

Предлагаемый подход к автоматизации решения научных задач является, в отличие от существующих, предметно-ориентированным, сочетает преимущества микросервисной и мультиагентной технологий. В рамках этого подхода права на выполнение микросервисов делегируются интеллектуальным агентам, функционирующим на основе дискретно-событийной модели и осуществляющим децентрализованное управление процессом решения прикладной задачи путем прямых семантических взаимодействий, информационной поддержкой которых являются база знаний и вычислительное поле (ВП, [50]). Вместо использования программного описания хореографии микросервисов, в отличие от существующих работ, в нашем подходе используется разработанная авторами дискретно-событийная модель [51] функционирования агентов МАС, которым делегируются права на выполнение микросервисов [52].

*Методика решения задачи*, поставленной на настоящем этапе НИР, основана на методах организации распределенных вычислений, разработки математических моделей, формирования и использования баз знаний, качественного исследования двоичных динамических систем, параллельных методах решения SAT и TQBF задач, технологии облачных вычислений.

*В результате решения задачи* разработана новая технология создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети. Результаты исследования опубликованы в работах [31, 32, 38, 53-57].

*Принцип действия разработанных объектов.* Основу микросервис-ориентированной технологии НРСАТАМР составляют разработанные коллективом исполнителей проекта модели, методы, алгоритмы и программные средства для проведения исследований в упомянутых выше предметных областях, а также инструментальные средства для создания и поддержки функционирования ансамбля микросервисов, автоматизирующие следующие этапы этого процесса:

- Реализация микросервисов на основе модулей пакета.
- Создание и конфигурирование агентов управляющей МАС.
- Создание и конфигурирование агентов постановки задачи.
- Развертывание микросервисов.
- Тестирование микросервисов.

В качестве инструментальных средств используется разработанная коллективом исполнителей проекта платформа HPCSOMAS-CMS (рисунок 5), являющаяся развитием представленной в [58] HPCSOMAS 2.0, претерпевшей значительные изменения. Новыми в HPCSOMAS-CMS, в частности, являются механизмы развертывания и обновления микросервисов, поддерживающие синхронизацию облачных и установленных на компьютер пользователя баз знаний, обеспечивая дополнительную возможность работы в рамках развивающейся в настоящее время парадигмы Dew Computing, сочетающей концепцию облачных вычислений с возможностями локальных компьютеров пользователя [59].

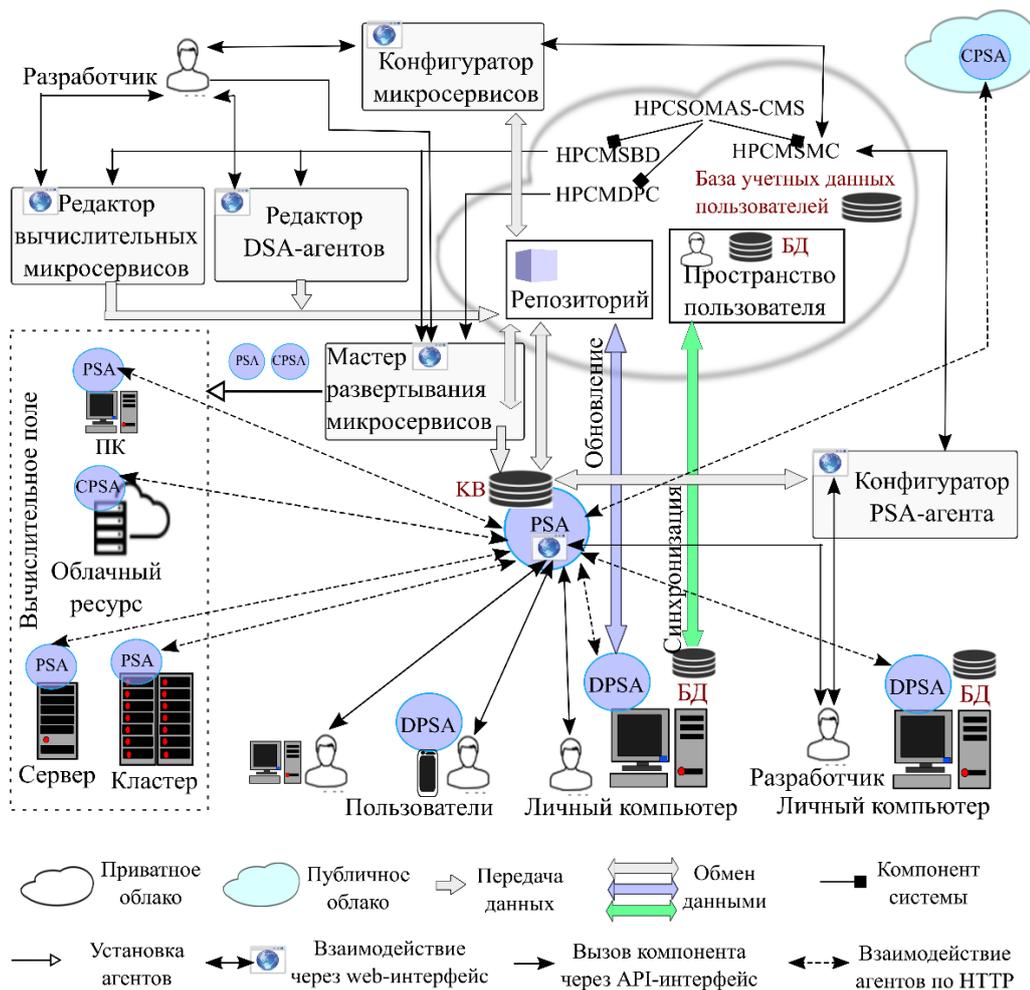


Рисунок 5 – Архитектура HPCSOMAS-CMS

HPCSOMAS-CMS включает три новых подсистемы автоматизации высокопроизводительных вычислений (HPC) на основе микросервисного подхода, а именно, HPCMSBD (HPC Micro Services Building and Deployment) для построения и развертывания микросервисов, HPCMSMC (HPC Micro Services Multiagent Control) для управления взаимодействием микросервисов и HPCMDPC (HPC Deployment to Public

Cloud) (рисунок 5). С помощью HPCMSBD создаются в виде микросервисов вычислительные агенты на основе программных модулей (Computational Microservice Agent, CMA) и интеллектуальные управляющие агенты распределенного решения (Distributed Solving Agent, DSA). Подсистема HPCMSMC автоматизирует конфигурирование CMA- и DSA-агентов и поддерживает их взаимодействие при решении задачи на основе дискретно-событийной модели. HPCSOMAS-CMS включает средства обновления микросервисов и синхронизации баз знаний (БЗ) агентов.

В качестве БЗ выступает вычислительная модель предметной области, распределенная так, что каждый агент обладает ограниченными знаниями как о возможностях других агентов системы, так и о топологии вычислительного поля (ВП) в целом. В локальных БЗ агентов хранятся взаимосвязи модулей и параметров пакета. Вычислительная модель представляется в виде совокупности параметров предметной области и функциональных отношений между ними. Каждое функциональное отношение реализуется программным модулем, который вычисляет значения выходных параметров по заданным значениям входных параметров. ВП представляет собой совокупность объединенных сетью логических вычислительных узлов, на которые устанавливаются агенты DSA. Функциональные возможности каждого агента определяются требованиями включения связанного с агентом модуля в вычислительный процесс решения прикладной задачи. Под логическим узлом понимается физический вычислительный ресурс, в качестве которого могут выступать: множества ядер процессора и узлов вычислительного кластера, персональный компьютер, виртуальная машина, мобильное устройство. ВП является дискретным, числовое значение поля в каждом узле вычисляется агентом в зависимости от его состояния и в соответствии с правилом распространения поля по сети. Нулевое значение поля является триггером включения соответствующего модуля в процесс решения прикладной задачи.

Для непроцедурной постановки задачи на распределенной вычислительной модели предметной области предоставляется web-интерфейс агента постановки задачи PSA (Problem Statement Agent). В БЗ PSA-агента хранятся взаимосвязи модулей и узлов ВП. В рамках распределенных и (или) облачных вычислений PSA-агент устанавливается на выделенных вычислительных узлах и является точкой входа в систему. Другой вариант (с использованием технологий Dew Computing) позволяет установить агента постановки задачи с минимально требуемым функционалом (DPSA агента) на локальный компьютер пользователя.

Пользователю предоставляется PSA-интерфейс для формирования запроса на решение задачи. Для непроцедурной постановки задачи используется вкладка «Решение

задач». Пользователь выбирает предметную область, в результате появляется список параметров предметной области, где галочками должны быть помечены требуемые параметры в колонках «Вход» и «Выход». После первого шага решения задачи могут возникнуть две ситуации. В первом случае сформируется активная группа агентов (которые обеспечат нахождение значений выходных данных по заданным значениям входных данных на этапе совместного решения задачи), и пользователю откроется форма для ввода значений параметров. Во втором случае пользователю выдастся сообщение, что задача не может быть решена. PSA- и DPSA-агенты поддерживают так же работу со следующими объектами:

- словарь параметров предметной области;
- микросервисы, реализующие функциональные возможности прикладных предметных модулей;
- логические узлы ВП, ассоциированные с конкретным вычислительным ресурсом;
- список агентов, которым делегированы права на выполнение модулей.

Права доступа к этим объектам имеют только администратор и разработчик AMP.

Группой DSA-агентов осуществляется децентрализованное управление решением задачи в AMP на основе прямых взаимодействий. Единственным методом координации поведения агентов как при формировании группы, так и при выполнении совместных действий является способ управления поведением агентов «по готовности входных данных» (событийное управление). В качестве поведенческой модели агента используется дискретно-событийная конечно-автоматная модель FSMwVW (Finite State Machine with Variables and Works) [51]. В состав агента входят дешифратор сообщений, обработчик сообщений, система таймеров. Тип DSA-агент имеет следующие основные модификаторы:

- ordinary/control;
- (consecutive/parallel).

Модификатор управления используется для агентов DSA с предикатом, проверка истинности которого выполняется перед запуском агента CMA. Параллельный агент DSA устанавливается на логические узлы ВП, которым соответствует многопроцессорный вычислительный ресурс. Агенты CMA представляют вычислительные модули предметной области и реализуются в виде микросервисов с использованием технологий Java и Tomcat.

В архитектуре разрабатываемой платформы предусмотрены средства автоматического развертывания микросервисов и установки PSA-агентов в автоматическом режиме. Пользователю требуется ввести значения необходимых

параметров в специальной утилите, выбрать набор микросервисов из списка, и далее на указанный вычислительный ресурс производится их автоматическая установка (вместе с дополнительным программным обеспечением в соответствии с системными требованиями в спецификации микросервиса). Проверка работоспособности микросервисов выполняется с помощью тестирования [40]. Состав активной группы агентов, сформированной по постановке задачи, запоминается в БЗ PSA-агента. При обновлении микросервиса автоматически по БЗ определяются активные группы, в которые этот микросервис входит, и повторное тестирование, вызванное обновлением, автоматически проводится только для этих групп.

Под синхронизацией понимается периодический и/или инициируемый событием процесс отображения объектов облачного пространства пользователя в соответствующее пространство локального компьютера. Синхронизация является настраиваемой: выполняется в автоматическом режиме (по умолчанию), по сигналу таймера, в командном режиме. Служба синхронизации выполняет мониторинг соединения с компьютерами d-пользователей, у которых на локальных компьютерах установлен DPSA-агент. Эта информация заносится при регистрации пользователя в его учетную запись – в поле Install устанавливается значение «D». У пользователей, работающих в облаке, значение этого поля равно «С». Во время разрыва связи в облачном пространстве пользователя могут появиться новые данные – результаты производимых в это время расчетов. При обрыве связи эти обновления фиксируются в таблице обновлений. При восстановлении связи по таблице обновлений синхронизируются облачное и локальное пространство d-пользователей, при этом отображаются объекты, указанные в конфигурационных настройках службы синхронизации. В состав конфигурационных настроек входят списки объектов и режимов синхронизации. В обязательном порядке синхронизируются результаты работы, выбор остальных объектов является опциональным. По умолчанию используется автоматический режим, при котором фиксация обновлений начинается при нарушении сетевого соединения с Интернетом, а синхронизация инициируется при восстановлении соединения (рисунок 6). Пространство пользователя структурировано. Распределены в разные папки параметры, вычислительные модули, результаты вычислительного эксперимента, база данных, шаблоны заданий. В базу данных пользователя записывается информация о значимых результатах, в том числе дата, имя файла результата, имя шаблона, решатель, время решения. В шаблоне задания сохранены данные вызова – имя задания, фактические параметры, заданные с помощью ввода значения или имени файла. При повторной постановке задачи можно не перечислять

параметры, а загрузить сохраненный шаблон.

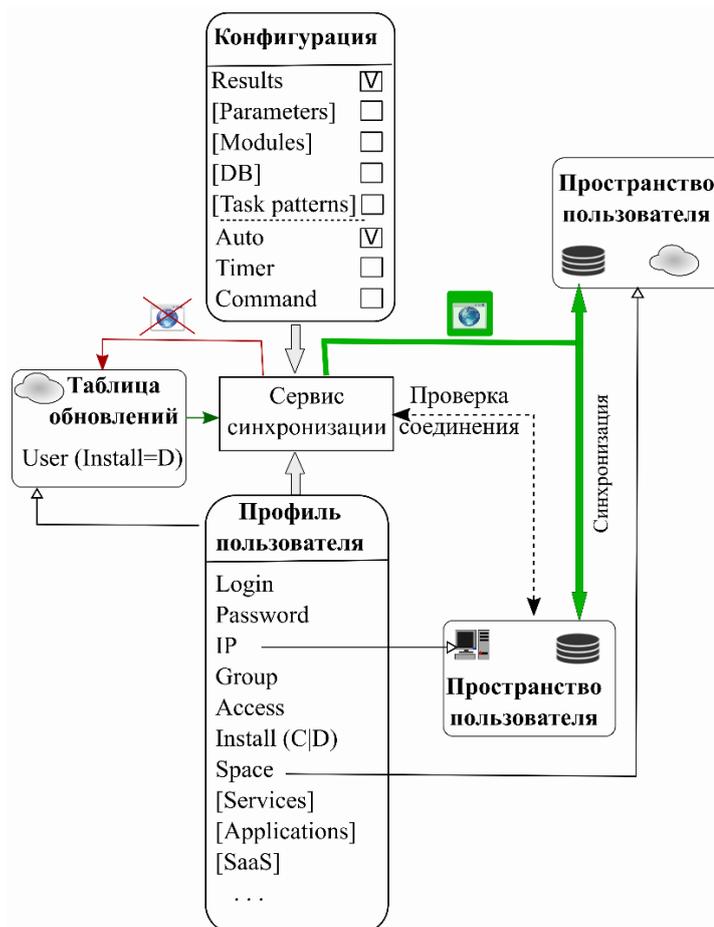


Рисунок 6 – Схема синхронизации после восстановления соединения с интернетом

*Обобщение и оценка полученных результатов.* Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. Разработана новая технология создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов (развертыванием микросервисов на узлах ВП) на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети. Функциональные возможности разработанной технологии, ориентированной на задачи качественного исследования ДДС, заключаются в следующем: в создании прикладных микросервисов, реализующих алгоритмы построения и исследования булевых моделей ДДС на основе единого стандартизованного подхода; в создании управляющих агентов, реализованных в виде микросервисов на основе шаблонов, предоставляемых HPCSOMAS-CMS, распределяющих выделенные вычислительные ресурсы путем автоматизированного развертывания разработанных микросервисов; в автоматизации всех этапов решения задачи на основе метода булевых

ограничений, начиная от построения булевой модели и заканчивая получением конструктивного решения; в децентрализованном событийном управлении вычислениями самоорганизующейся группой активных агентов; в ориентации на гибридные вычисления, при которых локальные вычислительные ресурсы могут быть дополнены (в соответствии с опциями профиля пользователя) облачными; в использовании парадигмы Dew Computing, в рамках которой выполняется (в случае гибридных вычислений) синхронизация локальных и облачных баз знаний и данных. Разработанная технология имеет большое практическое значение в силу широкого использования ДДС в качестве моделей как в теоретических, так и прикладных исследованиях.

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* Отличительной особенностью новой технологии НРСАТАМР является автоматизация как создания АМР, ориентированного на решение задач качественного анализа ДДС, так и организации управления вычислениями в АМР с привлечением параллельных и распределенных вычислений в рамках парадигмы Dew Computing в сформированной на основе этой технологии гибридной вычислительной инфраструктуре.

*Достоверность полученных результатов* подтверждена вычислительными экспериментами, проведенными на основе разработанной технологии [53] при решении задач предварительного качественного анализа автономных ДДС [31]; задачи синтеза закона управления по выходу в виде обратной связи, обеспечивающей глобальную устойчивость заданного состояния замкнутой нелинейной ДДС с нахождением конструктивного решения с помощью ALLSAT-решателей [54], 2QBF-решателей [55], SAT-решателей [56]; задачи анализа структуры пространства состояний нелинейной ДДС [57].

## **2 Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации**

*Целью блока проекта* является разработка совокупности новых специализированных моделей (эволюционных, дискретно-событийных, логических и непрерывно-дискретных), адекватных различным режимам функционирования группы мобильных роботов, разработка новых и развитие известных методов их исследования в направлении получения конструктивных алгоритмов анализа и синтеза самоорганизующихся систем группового управления.

*Задачи этапа НИР по блоку в 2019 году:*

1) Разработать входной язык логического программирования, командный интерпретатор (оболочку), подсистему конструктивного автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул, подсистему управления логическим выводом. Создать прототип базы знаний для тестирования алгоритмов машинного обучения.

2) Разработать алгоритмы управления неголономными агентами в мультиагентной системе с изменяемым лидером.

3) Разработать информационно-коммуникационную технологию обеспечения взаимодействия автономных распределенных компонент гетерогенной робототехнической группировки, выполняющей динамическую миссию в режиме реального времени.

4) Разработать новый метод и алгоритмы качественного исследования многокомпонентных дискретно-событийных систем, а также их редуцированных моделей.

5) Разработать алгоритмы построения общих функций Ляпунова для систем с переключениями.

*Выбор направления исследований* обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

*Характеристика задач и результаты исследований:*

**1) Разработка входного языка логического программирования, командного интерпретатора (оболочки), подсистемы конструктивного автоматического доказательства теорем в исчислении ПО-формул, подсистемы управления логическим выводом. Создание прототипа базы знаний для тестирования алгоритмов машинного обучения.**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач.* В качестве теоретического базиса для разработки методов машинного обучения используется

логическое исчисление позитивно-образованных формул (ПОФ) и разработанный на его основе метод для автоматического доказательства теорем (АДТ). Данное исчисление выгодно отличается от возможностей других, логических, средств формализации предметной области и поиска логических выводов: выразительностью в сочетании с компактностью представления знаний, «естественным» параллелизмом их обработки, крупноблочностью и меньшей комбинаторной сложностью выводов, высокой совместимостью с эвристиками. Предложенное ранее исчисление ПОФ, язык которого не содержал функциональных символов и равенства, допускает полные стратегии автоматического вывода, а семантика языка и исчисления может быть изменена введением некоторых ограничений на применение правила вывода, т.е. можно получать конструктивные, немонотонные, временные и другие логики, что позволяет формулировать новые оригинальные постановки задач.

Высокая совместимость исчисления ПОФ с эвристиками позволяет устранить известные недостатки логического подхода к представлению и обработке знаний, в том числе в приложении к созданию методов машинного обучения. На данном этапе исследован класс ПОФ, пригодный для конструктивного доказательства теорем, при этом содержащий подформулы нехорновского вида. Данный класс формул существенно шире класса хорновских дизъюнктов, используемых в Прологе: на логическую формализацию аксиоматической базы предметной области накладывается только лишь такое ограничение, в древовидной структуре ПОФ запрещается ветвление после узлов с кванторами всеобщности, содержащих неограниченные переменные в конъюнктах, а целевое утверждение - это конъюнкция запросов в смысле языка Пролог.

*Характеристика задач и результаты исследований.* Как известно, индуктивное логическое программирование (ИЛП) [60] это раздел машинного обучения, который использует логическое программирование как форму представления примеров, фоновых знаний и гипотез. Получив описания уже известных фоновых знаний и набор примеров, представленных как логическая база фактов, система ИЛП может породить логическую программу в форме гипотез. Обычно, реализации ИЛП делаются на языке Пролог [61]. В данном исследовании ведется разработка более выразительного входного языка, допускающего дизъюнктивные ветвления в записи логических программ (теорий). Входной язык логического программирования разработан на основе языка исчисления позитивно-образованных формул (ПОФ). Командный интерпретатор разработан как система управления конструктивным логическим выводом (ЛВ) в исчислении ПОФ. Общая схема работы интерпретатора представлена на рисунке 7.

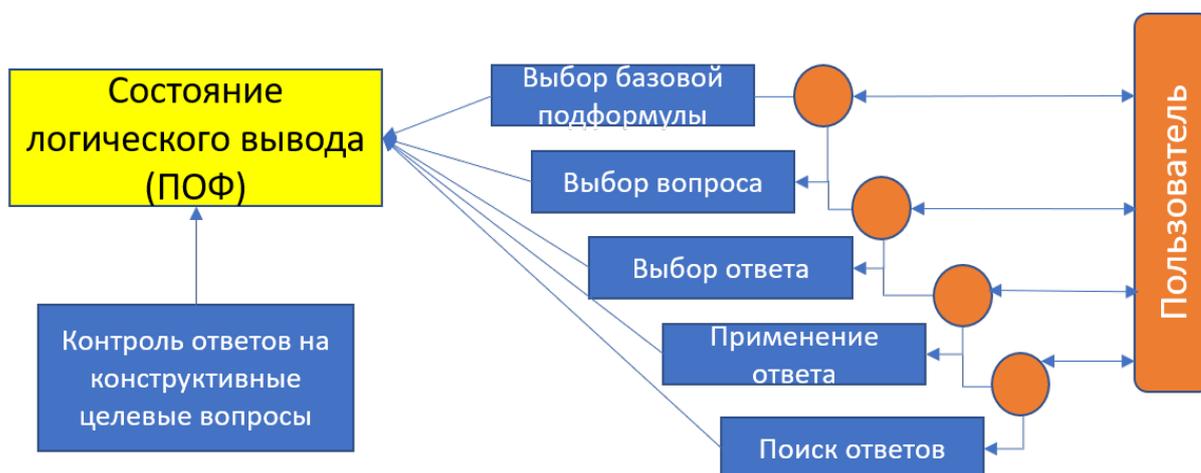


Рисунок 7 – Общая схема работы интерпретатора

Каждый шаг логического вывода разбит на несколько составляющих этапов: выбор базовой подформулы; выбор вопроса к данной базовой подформуле; выбор ответа на этот вопрос; применение данного ответа; поиск ответов на все вопросы ПОФ, с учетом новой добавленной информации. Каждый из этих этапов возможно регулировать командным интерпретатором. С этой целью перед выполнением каждого этапа система выводит возможные варианты, и пользователь может выбрать конкретный вариант самостоятельно, либо дать возможность выбора машине вывода.

Подсистема конструктивного логического вывода основана на принципе моделирования теории (логической формализации решаемой задачи) используя прямой ЛВ (а не обратный, как в системе логического программирования Пролог). Для конструктивного вывода в формулах с дизъюнктивным ветвлением используется два типа целевых вопросов: конструктивные и неконструктивные. Ответ на конструктивный целевой вопрос означает отбраковку текущей ветви базовой подформулы как одного из прогнозируемых вариантов развития моделируемой теории. Ответ на неконструктивный целевой вопрос означает, что одно из решений найдено, и оно находится в текущей ветви. Для конструктивного доказательства необходимо, чтобы все ветви были опровергнуты конструктивными целевыми вопросами и только одна неконструктивной.

Примеры логических теорий, применяющихся для тестирования известных систем индуктивного логического программирования, были адаптированы под исчисление ПОФ. Данные примеры послужили основой для создания прототипа базы знаний нехорновского типа, путем добавления фиктивных ветвлений в формулах, и были использованы для тестирования разработанной системы.

*Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме.*

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* В настоящее время наиболее популярной системой логического программирования является Пролог и его многочисленные вариации, основанные на формализме дизъюнктов Хорна и методе АДТ – SLD-резолюции [62]. Использование такого подхода позволяет гарантированно находить конструктивное доказательство и несколько упрощает структуру программы, т. е. программисту не обязательно хорошо разбираться в тонкостях математической логики и методах доказательства. Однако, именно ограничение в виде дизъюнктов Хорна влечёт и существенные недостатки, которые, в частности, затормозили развитие Пролога.

Дизъюнкт Хорна есть дизъюнкция, включающая единственную положительную литеру. На языке предикатов первого порядка он записывается как  $\neg a_1 \vee \dots \vee \neg a_n \vee a_0$ , а на языке Пролога  $-a_0: -a_1, \dots, a_n$ . Читается как “из  $a_1$  и ... и  $a_n$  следует  $a_0$ ” (декларативная семантика) или “для решения задачи  $a_0$  необходимо решить задачи  $a_1, \dots, a_n$  (процедурная семантика). Такая несложная запись формул позволяет мыслить программисту в терминах процедур и не использовать терминологию, связанную с АДТ.

Однако, далеко не каждая задача, формализуемая в классическом исчислении предикатов, может быть полностью формализована в виде дизъюнктов Хорна. В этом случае, поскольку нельзя выйти за рамки хорновского языка, задачи приобретают выраженный процедурный смысл. Таким образом, программист снова вынужден частично думать о решении, а не об описании задачи, и использовать дополнительные предикаты управления поиском решения, например, оператор отсечения “!”, что затрудняет чтение и отладку программы и приводит к нарушению принципов декларативного программирования. Кроме того, хорновский язык может разрушать исходную эвристическую структуру знания о задаче, т. е. возникает ситуация, когда текст программы плохо отражает суть решаемой задачи, что, в свою очередь, также в некоторой степени противоречит основным принципам декларативного программирования. Таким образом, возникает потребность в формализме и программных средствах АДТ, сохраняющих исходную эвристическую структуру знания о предметной области и задаче, а также позволяющих представлять программы именно в декларативном стиле, сводя к минимуму вопросы управления поиском решения со стороны программиста. Также для такого формализма необходимы эффективные методы автоматического конструктивного доказательства теорем.

Отметим, что авторы данного проекта ведут исследования, в которых возникает необходимость в использовании более богатых формализмов, чем язык хорновских дизъюнктов. Ключевыми направлениями этих исследований являются моделирование поведения групп автономных подводных роботов как мультиагентной системы.

*Достоверность полученных результатов* может быть проверена использованием парабатываемого языка для описания сценариев и групповых миссий на верхнем уровне иерархической системы управления группы автономных подводных роботов, а также расширением возможностей при формализации и проверке свойств дискретно-событийных систем на основе исчисления ПОФ [63].

## **2) Разработка метода и алгоритмов управления неголономными агентами в мультиагентной системе с изменяемым лидером (лидерами).**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач.* Известно, что большинство поисково-обследовательских миссий и работ по мониторингу подводной среды эффективно реализуется с использованием скоординированных групп автономных подводных роботов (АПР), представляющих собой мультиагентную систему, в которой в качестве агентов выступают АПР. При выполнении подобных групповых миссий, как правило, требуется обеспечивать движение группы по направлению к целевой точке либо по заданной траектории с сохранением некоторого желаемого положения друг относительно друга (т. е. двигаться в формации) и с возможностью перестроения в другую формацию, например, с целью обхода препятствия. Изменение структуры формации в большинстве случаев сопровождается и сменой ее лидера.

Задача управления формациями АПР при отсутствии априорной информации о внешней среде в последнее время активно исследуется в литературе [64-69]. Несмотря на определенный прогресс в решении данной задачи, большинство исследований носит теоретический характер, и практически отсутствуют решения, готовые к использованию на практике. В связи с этим актуальными являются вопросы разработки новых методов, подходов, алгоритмических и коммуникационных схем, которые бы обеспечивали эффективное управление группировкой в условиях неизвестной среды и оптимизировали нагрузку на бортовые вычислительные устройства и каналы передачи данных. В проекте исследуется плоская постановка задачи управления формациями со сменяемым лидером, в которой все АПР группы перемещаются в одной плоскости.

*Структура системы управления АПР.* Для управления АПР при выполнении групповой миссии с использованием формаций используется предложенная в [70] двухуровневая система управления, структура которой представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Двухуровневая система управления АПР

Основная функция верхнего уровня – формирование режима функционирования АПР на основе анализа текущей подводной обстановки и статуса миссии. Помимо этого, на верхнем уровне, в случае необходимости, решаются задачи планирования пути, определения структуры формации, отвечающей текущей обстановке, и назначения ролей участникам группы в новой конфигурации с выделением лидера формации. Нижний уровень отвечает за исполнение низкоуровневых управляющих команд, реализующих элементарные шаблоны поведения АПР в выбранном режиме.

*Общая схема решения задачи.* Логику работы верхнего уровня в части решения задачи управления формациями можно представить в виде следующей последовательности шагов.

1. Формирование модели внешней среды с использованием информации, получаемой от датчиков.
2. Оценка необходимости перестроения (изменения структуры формации) на основе анализа полученной модели среды. Если такая необходимость появилась, то перейти на шаг 3; иначе перейти на шаг 1 и начать его выполнение по достижении заданного момента времени, определяющего наступление нового такта управления.
3. Выбор подходящей структуры формации.
4. Определение начального положения формации.
5. Распределение ролей в выбранной формации между участниками группы.

Рассмотрим более подробно каждый из представленных этапов.

*Формирование модели внешней среды.* Для построения ситуационной модели среды используются данные, получаемые от локатора секторного обзора (ЛСО). ЛСО с заданной частотой, меньшей, чем частота работы контура управления нижнего уровня, выдает расстояния до препятствий в различных направлениях, ограниченных заданным сектором. В результате измерений получается множество точек, формирующих контуры препятствий. Эти точки группируются так, чтобы каждая группа представляла отдельное препятствие. В общем случае, препятствия, а следовательно, и формируемые контуры, являются невыпуклыми, и, кроме того, эти контуры содержат значительное количество точек, что затрудняет не только планирование траектории движения АПР, но и анализ получаемой модели среды. В отчетном году предложен алгоритм, который по измерениям ЛСО строит выпуклый контур препятствия с незначительным количеством точек. Он включает следующие шаги.

1. Если на входе меньше 3-х точек, то пометить эти точки для дальнейшего включения в выходную последовательность и перейти на шаг 5.
2. Пометить крайние точки входной последовательности. Взять самую правую точку входной последовательности – точку  $A$  (см. рисунок 9).
3. Последовательно перебирая точки, находящиеся слева (относительно АПР) от  $A$ , найти первую по порядку точку  $C$ , которая удовлетворяет условию: между  $A$  и  $C$  существует точка  $B$ , находящаяся с левой стороны от отрезка  $AC$ , такая, что расстояние от  $B$  до отрезка  $AC$  больше заданного значения  $\delta$ . Если такая точка не существует, то перейти на шаг 5.
4. Пометить точку  $D$ , ближайшую справа от точки  $C$ . Если точка  $C$  – не крайняя точка во входной последовательности, то принять в качестве  $A$  точку  $D$  и перейти на шаг 3.
5. Сформировать из помеченных точек выпуклый контур препятствия.

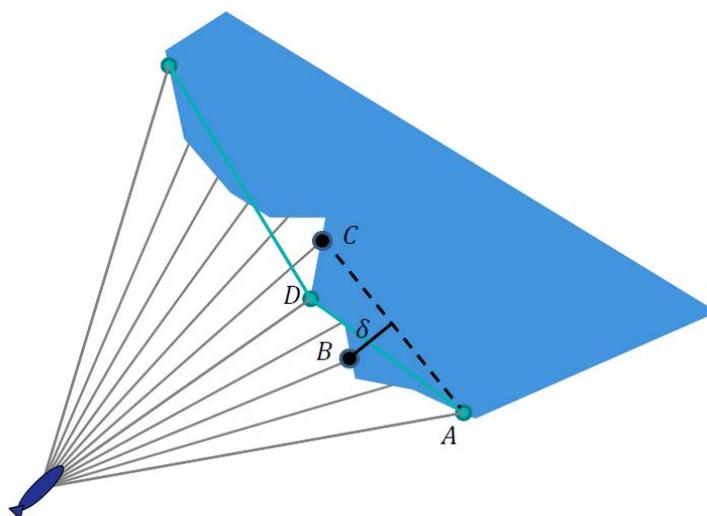


Рисунок 9 – Иллюстрация работы алгоритма построения контура

*Оценка необходимости перестроений.* На этом этапе производится анализ полученной ситуационной модели среды на предмет возможности продолжать движение в текущей конфигурации либо необходимости вернуться в исходную формацию, в случае если группа выполняла маневры по обходу препятствия. При этом проверяются различные условия, оценивающие расстояние между препятствиями, близость АПР к опорной траектории либо целевой точке, возможности столкновений между АПР и др., и генерируются соответствующие события, обрабатываемые верхним уровнем.

*Выбор подходящей структуры формации.* Для большого числа поисково-обследовательских работ в качестве возможных структур формаций достаточно рассматривать структуры типа «колонна», «шеренга» и «клин» [71]. Задача рационального выбора структуры формации на основе анализа модели среды, состояния группы и миссии будет исследована на этапе 2020 года.

*Определение начального положения формации.* После определения структуры формации требуется вычислить ее начальное желаемое положение. Для решения этой задачи разработан специальный алгоритм, исполняемый на АПР, являющимся лидером формации. Он включает следующие шаги.

1. Вычислить геометрический центр группы:

$$(x_c, y_c) \equiv p_c = \sum_{i=1, N} p_i / N,$$

где  $N$  – число АПР в группе;  $p_i \equiv (x_i, y_i)$  – координаты  $i$ -го АПР в глобальной системе координат.

2. Определить желаемое начальное положение  $p_i^f \equiv (x_i^f, y_i^f)$ ,  $i = \overline{1, N}$  каждого АПР в формации, решая оптимизационную задачу

$$\sum_{i=1}^N \|p_i^f - p_c\| \rightarrow \min$$

при ограничениях двух видов:

- 1)  $\|p_i^f - p_j^f\| = d_{ij}^*$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ ,
- 2)  $\text{dist}(p_j^o, p_{j+1}^o, p_i^f) > D_s$ ,  $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M-1}$ ,

где  $d_{ij}^*$  – расстояние между двумя позициями в формации,  $D_s$  – некоторая положительная постоянная, определяющая безопасное расстояние до препятствий;  $M$  – количество точек, формирующих контур препятствия, а функция  $\text{dist}(p_1, p_2, p_3)$  вычисляет расстояние от точки  $p_3$  до прямой, проходящей через точки  $p_1$  и  $p_2$ . Ограничения вида 1) определяют желаемые положения агентов друг относительно друга в формации, а ограничения вида 2) – их положения относительно препятствий. Задача является квадратичной по критерию и ограничениям и эффективно решается с использованием численных методов.

*Распределение ролей в формации между участниками группы.* Решение задачи распределения ролей в формации с выделением лидера базируется на использовании некоторых модификаций аукционных методов [72] с учетом параметрической разнородности роботов группы.

*Законы управления АПР.* Основной задачей управления, решаемой на нижнем уровне, является задача следования за лидером. В зависимости от режима функционирования АПР, имеет смысл ее рассматривать в трех основных постановках (см. рисунок 10), предполагающих: 1) следование за виртуальной целью (ВЦ), которая как материальная точка перемещается вдоль опорной траектории 2) следование за лидером с удержанием заданного положения относительно него и 3) следование за ВЦ с удержанием лидера в поле зрения. Для решения рассматриваемой задачи в этих постановках предложены следующие цифровые законы управления [73]:

$$F_i(t) = F_{ci}(t_k) + F_{si}(t_k), \quad G_i(t) = G_{ci}(t_k) + G_{si}(t_k), \quad i = \overline{1, N},$$

где  $t \in T_k \equiv [t_k, t_{k+1})$ ,  $t_k = kh$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ ,  $h$  – длительность такта управления,  $F_{ci}(t_k)$ ,  $G_{ci}(t_k)$  – слагаемые управления поступательным и вращательным движением АПР, призванные парировать возмущения, компенсировать боковые смещения аппарата и отслеживать изменения курса и скорости группы,

$$[F_{si}(t_k) \quad G_{si}(t_k)]^T = \text{sat}(K(t_k)(\tilde{q}_i(t_k) - q_i^*(t_k)), \quad [\bar{F}_{si} \quad \bar{G}_{si}]^T)$$

– компоненты управления для стабилизации положения ведомого относительно лидера либо ВЦ,  $\bar{F}_{si}$ ,  $\bar{G}_{si}$  – ресурсы управления, выделенные на стабилизацию,  $\tilde{q}$  – вектор оценок параметров относительного движения,  $q_i^*$  – желаемые значения этих параметров,  $K(t_k) = K_j$  при  $r_0(t_k) \in [r_{0j} r_{0j+1})$ ,  $r_0$  – угловая скорость ВЦ, движение которой отслеживает либо сам АПР либо лидер формации (в зависимости от режима). Элементы матриц  $K_j$  построчно формируют специальную таблицу (gain schedule), данные из которой извлекаются и активируются на каждом такте управления в зависимости от текущей скорости ВЦ. Скорость движения ВЦ в задаче 2 (см. рисунок 10) определяется, исходя из текущего значения показателя кривизны отслеживаемого пути, а в задаче 3 – исходя из расстояния до лидера. С использованием сублинейных векторных функций Ляпунова [74] выполнен численный синтез регуляторов для группировки крупногабаритных АПР [75]. Численное моделирование показало высокое качество синтезированных цифровых законов управления.

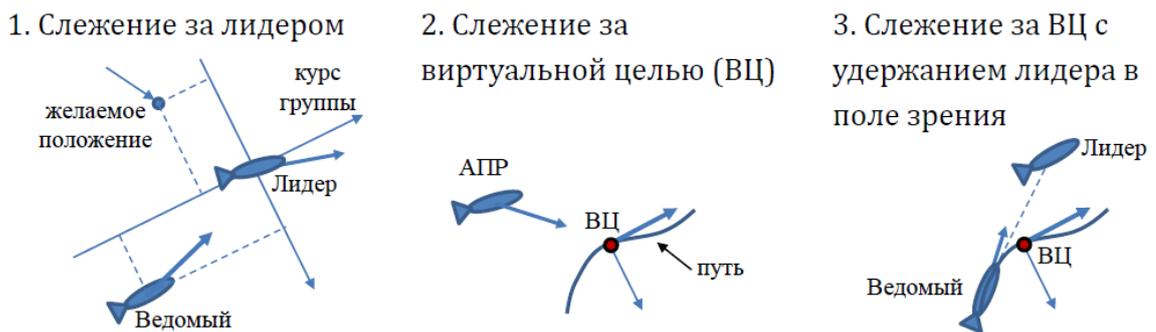


Рисунок 10 – Задачи слежения в различных режимах функционирования АПР

*Результаты экспериментов.* Для тестирования предложенных алгоритмов управления формациями АПР в ИДСТУ СО РАН разрабатывается программно-аппаратный комплекс на базе платформы Lego EV3 [76, 77]. Он предназначен для моделирования поведения и отработки алгоритмов управления группировками роботов. В текущей версии комплекса реализованы службы, обеспечивающие общение между роботами, распределение вычислительной нагрузки между компонентами системы и позиционирование роботов на сцене. Кроме того, предусмотрены возможности для формирования и контроля исполнения комплексных групповых миссий.

С использованием комплекса отработана групповая миссия, предполагающая сбор группы в указанной области пространства и дальнейшее ее движение с сохранением

заданного строя. Текстовое сообщение с описанием миссии в виде JSON-строки, которое рассылается всем роботам группы, приведено на рисунке 11.

```
{ "from": "RoboServer",  
  "to": "broadcast",  
  "msg_type": "MISSION_START",  
  "payload": "{ \"tasks\": [  
    { \"name\": \"remoteformationcontrol\",  
      \"location\": {\"x\": 100, \"y\": 150},  
      \"course_angle_0\": 180,  
      \"formation\": [[1, 0, 0, 0],  
                     [2, 1, 0.5, 30],  
                     [3, 1, 0.5, 30]]},  
  ]}" }
```

Рисунок 11 – Текстовое сообщение с описанием миссии

Выполнение миссии разбивается на следующую последовательность элементарных действий:

1. Определение роли робота в заданной формации и вычисление его начального положение в окрестности точки сбора группы.
2. Перемещение робота в область сбора.
3. В зависимости от назначенной роли выполнение одного из двух действий: отработка команд от оператора (для робота-лидера); движение за установленным на лидере инфракрасным маяком с сохранением желаемого положения относительно него (для робота-ведомого).

Результаты экспериментов по отработке описанной миссии представлены на рисунке 12.

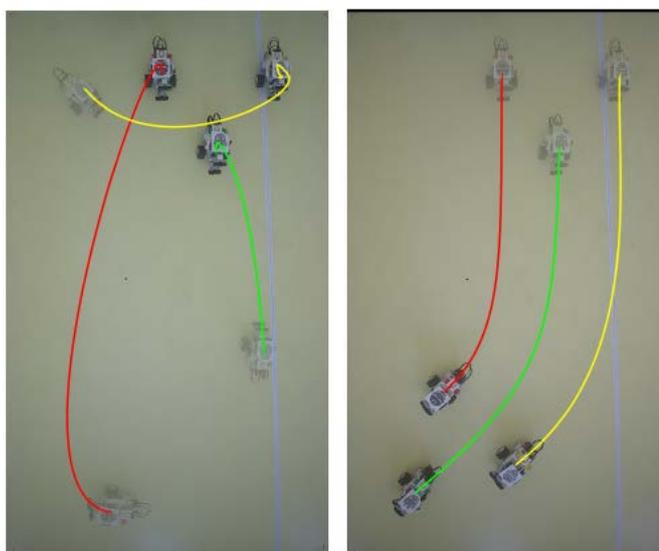


Рисунок 12 – Результаты экспериментов по отработке групповой миссии. Слева – траектории движения роботов при сборе группы; справа – при следовании вдоль траектории, определяемой командами оператора

*Обобщение и оценка полученных результатов.* Поставленная в рамках блока задача управления формациями неголономных агентов с изменяемым лидером в неизвестной среде решена в полном объеме. В рамках решения этой задачи разработаны: алгоритм формирования ситуационной модели внешней среды с использованием данных, получаемых от ЛСО, механизмы определения лидера формации на основе анализа построенной модели и численного решения некоторой оптимизационной задачи, а также цифровые алгоритмы управления АПР, используемые в различных режимах функционирования группы с учетом изменения ролей отдельных ее членов. Помимо этого, выполнены работы по созданию программно-аппаратного комплекса (имитационного стенда), предназначенного для тестирования коммуникационных и алгоритмических схемы, используемых при координации действий и управлении группировками роботов. В дальнейшем этот комплекс будет задействован для отработки алгоритмов управления формациями движущихся агентов.

В предложенном подходе решение по выбору лидера формации принимается на основе анализа ситуационной модели среды, однако возможность использования более широкой модели не отвергается. Она может строиться в процессе выполнения миссии и использоваться, например, для уточнения положения АПР, принятия стратегических решений и долгосрочного планирования. Вопросы построения и использования такой модели рассматриваются в рамках другой задачи данного блока.

В дальнейшем (при реализации этапа 2020 года) будут разработаны подходы к определению подходящей либо наилучшей структуры формации при выполнении сложной исследовательской миссии, а также алгоритмы управления группой АПР при возможных изменениях структуры формации.

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* Развиваемый в проекте подход к управлению формациями неголономных агентов в неизвестной среде является новым и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными решениями. В частности, развиваемый в проекте событийный подход к управлению формациями в среде с препятствиями, в отличие от методов, основанных на потенциальных функциях [64, 67], не требует непрерывной коррекции траектории АПР – ее пересчет происходит только при возникновении определенного набора событий. Кроме того, в отличие от [64, 66, 67] в предлагаемом подходе роботам для принятия решения и формирования управляющих воздействий не требуется обозревать все окружающее его пространство, достаточно информации, получаемой от ЛСО; в отличие от [64-66, 68, 69], где препятствия грубо аппроксимируются набором простейших геометрических фигур (как правило, кругов), в предложенных алгоритмах для управления АПР строится

достаточно точная модель среды, при этом, не накладывает никаких ограничений на вид самих препятствий.

Разработанный алгоритм выделения выпуклого контура препятствия для формирования модели внешней среды по сравнению с известным алгоритмом LРАА (Largest Polar Angle Algorithm), предложенным в [78], генерирует меньшее число точек и является робастным (в некотором смысле) по отношению к неточностям измерений.

Разработанные цифровые алгоритмы управления формациями в отличие от большинства известных в литературе учитывают возможности АПР обеспечивать требуемую динамику группы и учитывают ограничения на ресурсы управления. Также стоит отметить, что они не требуют непрерывного измерения параметров движения АПР и значительных вычислительных ресурсов, что упрощает их реализацию на борту.

*Достоверность полученных результатов* подтверждена вычислительными экспериментами, а также строгостью и обоснованностью используемого математического аппарата при решении рассматриваемой задачи.

**3) Разработка информационно-коммуникационной технологии обеспечения взаимодействия автономных распределенных компонент гетерогенной робототехнической группировки, выполняющей динамическую миссию в режиме реального времени.**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач и их сравнительная оценка.* Применение скоординированных групп автономных подводных роботов представляется наиболее перспективной и многообещающей технологией, обеспечивающей решение самого широкого спектра океанографических задач [79]. Групповое выполнение комплексных широкомасштабных миссий, как правило, связано с длительным пребыванием роботов в заданной акватории, что в условиях изменчивой и плохо прогнозируемой подводной среды, а также вследствие несовершенства измерительных и навигационных приборов, неизбежно ведет к возникновению незапланированных событий различной природы [80]. Осуществление своевременной корректировки групповой стратегии в этом случае значительно затрудняется высокой вычислительной сложностью требующихся к решению задач многофакторного планирования и малыми возможностями (скоростью и расстоянием передачи) гидроакустической коммуникации. С целью обеспечения высокого уровня работоспособности действующей разнородной группировки возникает задача организации группового движения таким образом, чтобы, во-первых, гарантировать возможность регулярных коммуникационных сессий с требуемой частотой, во-вторых, обеспечить

разбиение задачи планирования групповой стратегии и ее децентрализованное решение на различных АПР, и, в-третьих, наделить группу способностью оперативно реагировать на происходящие события с учетом всех действующих ограничений.

*Методика решения задачи*, поставленной на настоящем этапе НИР, базируется на подходе, основанном на групповых рандеву, когда планирование миссий осуществляется в два последовательных этапа: сначала на основании ограничений верхнего уровня строится (во времени и пространстве) последовательность запланированных групповых сборов, движение роботов между которыми регулируется уже планировщиками более низкого уровня с учетом решаемых роботами конкретных задач. Подход на основе групповых сборов предоставляет возможность периодического полного коммуникационного обмена внутри группы, а выбор таких точек с учетом прогнозируемых изменений и уже запланированных событий обеспечивает неизменность состава группы на каждом рабочем периоде в отсутствие нештатных ситуаций. В качестве метода планирования используется общепринятый для такого класса задач эволюционный подход со встроенными методами локального поиска и специализированными эвристиками для учета дополнительных ограничений. Технология эффективной передачи данных внутри группы в процессе группового сбора основана на теории графов и коммуникационных систем.

*В результате решения задачи* предложен двухуровневый подход к динамическому планированию стратегий разнородных групп автономных подводных роботов, а также разработаны алгоритмы планирования, соответствующие каждому уровню системы управления, а также схемы и протоколы промежуточных коммуникационных процедур. Результаты исследования опубликованы в работах [76, 81, 82].

*Двухуровневая система управления*. Эффективное планирование реальных подводных миссий для групп АПР является комплексной и нетривиальной задачей, особенно в жестких временных рамках, когда необходима оперативная реакция группы на изменения внешней среды и непредвиденные возмущения. В связи с этим, на первый план выходит быстрое и точное локальное планирование с учетом ближайших ожидаемых изменений. Группа должна быть в состоянии обеспечить сбор и корректировку текущей групповой стратегии в автономном режиме, используя только бортовые вычислительные мощности, что накладывает дополнительные ограничения на классы решаемых задач.

Предлагается использование двухуровневой системы управления для обеспечения выполнения комплексных динамических миссий разнородной группы роботов в условиях ограниченной коммуникации. Согласно предлагаемому подходу, на верхнем уровне реализуется планирование глобальной групповой стратегии (изменения действующего

состава группы, множества решаемых задач, коммуникационная активность), а на нижнем уровне регулируется движение отдельных АПР и локальное выполнение заданий. Так, цель динамического планировщика миссии на верхнем уровне – произвести декомпозицию миссии на последовательность рабочих периодов ограниченной длительности таким образом, чтобы обеспечить групповое движение требуемыми свойствами, такими как коммуникационная устойчивость, неизменность состава, пониженной вычислительной нагрузкой и т. д. В свою очередь, задача планировщика нижнего уровня – обеспечить выполнение задач, запланированных на текущий рабочий период.

Описанная декомпозиция миссии базируется на известном подходе групповых рандеву, который заключается в последовательном планировании действий всех роботов до момента ближайшего сбора группы в заранее оговоренной области. В разработанном же подходе предлагается выбирать не только ближайшую точку группового сбора, но и планировать последующие сборы сразу на все время длительности миссии с учетом всех прогнозируемых изменений, корректируя его в случае возникновения незапланированных событий. В этом случае цикл функционирования группы на каждом рабочем периоде может быть представлен в виде следующей блок-схемы (рисунок 13). Согласно приведенной схеме, группа изначально осуществляет работы по заранее спланированной групповой стратегии. Начиная выполнение работ, каждый АПР, зная задания всех других роботов, а также временные рамки следующего рабочего периода, может самостоятельно осуществлять формирование локальной групповой стратегии уже на следующий период. По завершению работ, все роботы собираются в заранее оговоренной области, где устанавливают единое информационное пространство и осуществляют коммуникационный обмен, отчитываясь о проделанных работах, своем текущем состоянии и обнаруженных изменениях в условиях выполнения миссии. При отсутствии значимых изменений, все роботы группы обмениваются теми планами, которые они выработали на последнем рабочем периоде. Лучший выработанный план принимается текущим для нового рабочего периода и рассылается всем АПР в группе для начала выполнения работ. В случае же, если были обнаружены значимые изменения, ведущие к потере актуальности текущей глобальной стратегии группы, запускается процедура корректировки расписания рабочих периодов. Затем, уже на основании выработанного расписания, роботы группы осуществляют планирование действий на ближайший рабочий период.

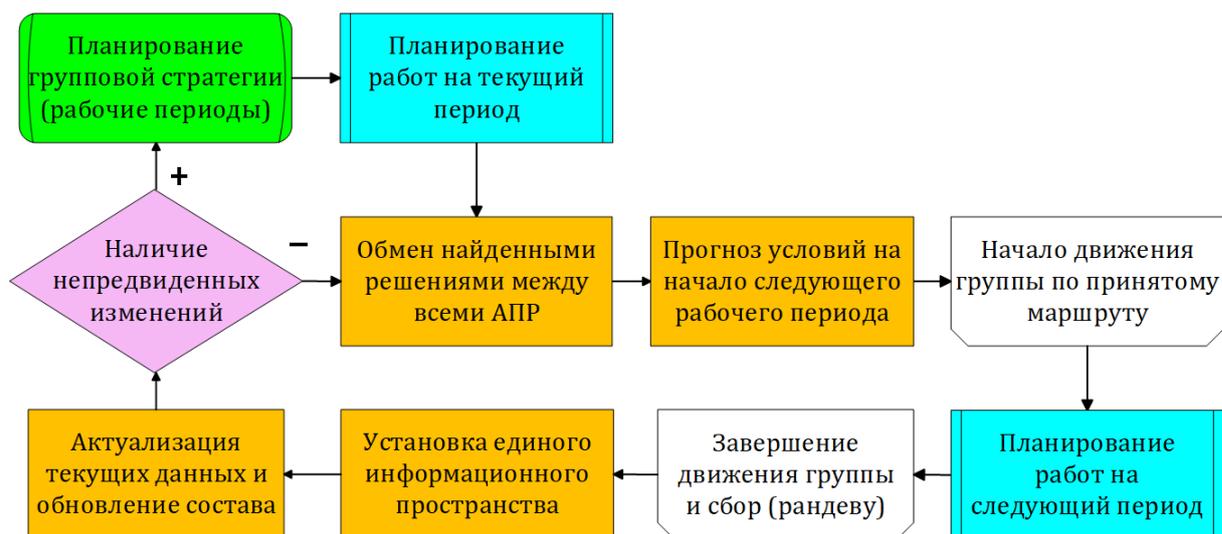


Рисунок 13 – Блок-схема режимов автономного функционирования группы при выполнении миссии на основе разработанного подхода (зеленый блок – верхний уровень, голубые блоки – нижний уровень, оранжевые блоки – коммуникационная активность)

*Групповая коммуникация.* Каждый раз при осуществлении группового сбора действующие роботы группы прибывают в обозначенную область для осуществления информационного обмена, включающего, согласно схеме на рисунке 13, актуализацию знаний о среде и текущем составе группы, а также согласование стратегии на ближайший рабочий период. Полный информационный обмен может быть осуществлен только в том случае, если каждый АПР будет в состоянии передать данные любому другому АПР группы напрямую либо опосредованно (транзитом через других роботов). Другими словами, коммуникационный граф  $G$ , в котором вершины представлены роботами группы, а дуги связывают только те пары роботов, которые могут установить связь между собой напрямую, должен являться связным (рисунок 14). Стоит заметить, что полносвязность подобного коммуникационного графа не является обязательным требованием, но, в то же время, является рекомендуемым, так как во многом определяет степень коммуникационной устойчивости группы в случае возникновения нештатных ситуаций [83]. Для выполнения требования по связности графа  $G$  в условиях ограниченной дальности передачи данных (в особенности, если группа является неоднородной по этому параметру) сбор группы всегда осуществляется в некоторой ограниченной области, размер которой определяется заранее в зависимости от коммуникационных возможностей АПР.

По завершению прибытия всех АПР в область сбора определяется конфигурация действующей группы в виде графа  $G$ , на котором с использованием алгоритма Прима определяется минимальное остовное дерево. Это позволяет определить набор дуг

минимальной суммарной длины (цветные дуги на рисунке 14), по которым данные могут быть распространены по всей сети АПР наиболее эффективно (максимальная скорость и минимальные потери за счет передачи на преимущественно короткие расстояния). Среди вершин выделенного подграфа определяется вершина с максимальным количеством смежных ребер. Если таких вершин существует несколько, то среди них выбирается вершина с наименьшей суммой длин исходящих из нее дуг. Соответствующий выбранной вершине АПР принимает на себя роль агрегатора всех актуальных данных, после чего каждой дуге присваивается направление, ведущее в сторону агрегирующего робота. Конечный ориентированный ациклический граф теперь может быть представлен в виде дерева, где робот-агрегатор является корнем.

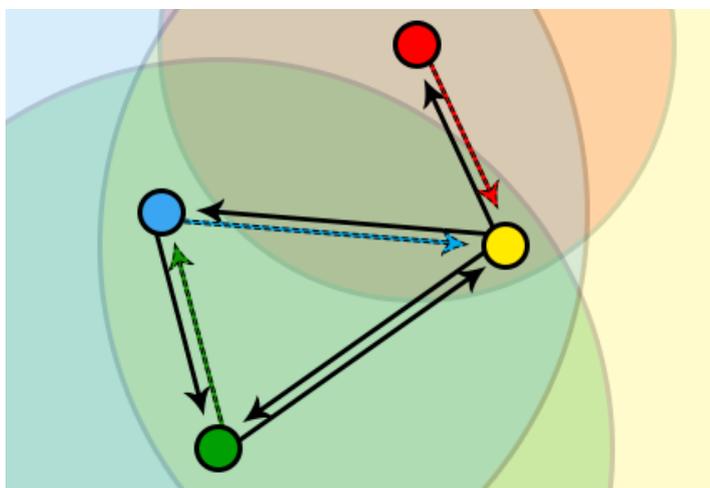


Рисунок 14 – Направление прямого распространения информации внутри сети роботов в процессе проведения процедуры полной актуализации данных

Процедура актуализации данных заключается в передаче агрегирующему роботу информации (набора фактов), полученной каждым АПР в процессе выполнения своих задач на последнем рабочем периоде. При этом процесс передачи осуществляется последовательно от концевых вершин дерева к корневой. Каждый факт здесь представляет собой структуру вида < Объект | Состояние объекта | Время измерения >, где в качестве объекта могут выступать как природные и техногенные объекты, включая АПР, так и целые области морского дна. Каждый АПР, принимая информацию от робота ярусом ниже, сверяет каждый полученный факт со своей текущей базой знаний, после чего, по результатам сравнения, либо добавляет его в свою базу как новый факт, либо обновляет уже существующий факт (если полученная информация более новая), либо игнорирует (в противном случае). Получив информацию от роботов, чьи дуги для него являются входящими, АПР отправляет уже обновленную базу знаний по исходящей дуге

роботу ярусом выше. Таким образом, по завершению обхода всего дерева, агрегирующий робот становится носителем наиболее полной и актуальной базы знаний, которую он затем отправляет в обратном направлении от корня дерева к концевым узлам. Это позволяет добиться идентичных знаний у каждого робота в группе при значительной минимизации общего объема передаваемых данных. Дальнейшая коммуникация группы осуществляется по аналогичной схеме на дереве описанной структуры.

Процедура передачи данных между всеми компонентами робототехнической группы осуществляется посредством сервиса сообщений, основанного на технологии веб-сокетов. Выбранная технология обеспечивает двухсторонний обмен текстовой информацией между участниками. Преимуществом технологии является использование протокола TCP, который гарантирует целостность сетевых пакетов. Сообщение в системе является объектом с некоторым набором полей, которые при передаче преобразуются в JSON-строку [84]. Данный формат был выбран в связи с малой избыточностью служебных символов, а также является удобным для чтения человеком, что значительно упрощает отладку сервиса. Обмен сообщениями между агентами осуществляется через сервисное приложение (рисунок 15), а встроенный сервис функций обратного вызова обеспечивает обработку сообщений. Передаваемые сообщения имеют следующую структуру <Отправитель; Получатель; Тип сообщения; Время отправки; Текст сообщения>.

The screenshot shows a logging application interface. On the left, there are two sections: 'Log levels' and 'Initiators'. 'Log levels' has checkboxes for ALL, CRITICAL, ERROR, WARNING, INFO, and DATA, with ALL and INFO selected. 'Initiators' has checkboxes for ALL, RobotHUB, Foxy, Canary, VirtualRobot10, and VirtualRobot11, with ALL and VirtualRobot11 selected. The main area is a table with columns: Timestamp, Level, Initiator, Module, Message, and Value. The table contains 30 rows of log entries.

Timestamp	Level	Initiator	Module	Message	Value
23:18:59:546	INFO	RobotHUB	Engine	Application is started	
23:18:59:548	INFO	RobotHUB	Engine	NTP service loaded. NTP-server: 192.168.1.100. Offset: 0	
23:18:59:564	INFO	RobotHUB	Engine	OpenCV library loaded	
23:19:00:240	INFO	RobotHUB	Engine	GUI created	
23:19:00:254	INFO	RobotHUB	Engine	WS server created	
23:19:00:408	INFO	RobotHUB	WSServer	Server started	
23:19:00:409	INFO	RobotHUB	Engine	Message server started	
23:21:50:869	INFO	RobotHUB	Engine	Starting mission: DemoMission	
23:21:51:171	INFO	RobotHUB	Engine	Starting external app	
23:21:51:171	INFO	RobotHUB	Engine	Response received	
23:21:51:471	INFO	Foxy	DemoMis...	Starting mission	
23:21:51:471	INFO	Canary	DemoMis...	Starting mission	
23:21:51:773	INFO	Foxy	DemoMis...	Requesting virtual robot	
23:21:51:773	INFO	Canary	DemoMis...	Requesting virtual robot	
23:21:52:428	INFO	VirtualRob...	DemoMis...	Sending current target 0. Path: (2200,78) (1708,85) (1450,...	
23:21:52:428	INFO	VirtualRob...	DemoMis...	Sending current target 0. Path: (1801,290) (1750,347) (13...	
23:21:52:485	INFO	RobotHUB	WSServer	New connection: /192.168.1.107 (9935d6f1-9346-41d6-82...	
23:21:52:485	INFO	RobotHUB	Engine	Robot connected: VirtualRobot10(DESKTOP-43NUUPT/19...	
23:21:52:486	INFO	RobotHUB	WSServer	New connection: /192.168.1.107 (13fd8774-15dd-41ca-b3...	
23:21:52:486	INFO	RobotHUB	Engine	Robot connected: VirtualRobot11(DESKTOP-43NUUPT/19...	
23:21:52:730	INFO	Foxy	DemoMis...	Parsing received coordinates	
23:21:52:730	INFO	Foxy	DemoMis...	Starting movement	
23:21:52:730	INFO	Canary	DemoMis...	Parsing received coordinates	
23:21:52:730	INFO	Canary	DemoMis...	Starting movement	
23:21:52:561	INFO	VirtualRob...	Engine	Virtual robot VirtualRobot10(id: 9935d6f1-9346-41d6-822f-...	
23:21:52:583	INFO	VirtualRob...	Engine	Virtual robot VirtualRobot11(id: 13fd8774-15dd-41ca-b31f-...	
23:21:57:731	INFO	Foxy	DemoMis...	Target reached	
23:21:57:731	INFO	Foxy	DemoMis...	Requesting new target	
23:21:58:031	INFO	VirtualRob...	DemoMis...	Sending current target 1. Path: (110,552) (206,623) (275,8...	
23:21:58:332	INFO	Foxy	DemoMis...	Parsing received coordinates	
23:21:58:332	INFO	Foxy	DemoMis...	Starting movement	
23:22:03:332	INFO	Canary	DemoMis...	Target reached	
23:22:03:332	INFO	Canary	DemoMis...	Requesting new target	
23:22:03:633	INFO	VirtualRob...	DemoMis...	Sending current target 1. Path: (1634,864) (2012,1237)	

Рисунок 15 – Сервисное приложение для логирования коммуникационной активности

АПР

*Планировщик миссий.* Задача планировщика на верхнем уровне – регулировать действующий состав разнородной группы во времени, управляя последовательностью групповых сборов во времени и пространстве. Планирование такого расписания должно осуществляться с учетом одновременно нескольких факторов различной природы: требованиями к частоте и месту проведения сеансов связи; запланированных событий (расширение группы, подзарядка) и прогнозируемых изменений (выход из строя, изменение области работ); ограничений верхнего уровня на действующий состав АПР (групповое движение, дальность связи) и др.

Был разработан подход к планированию групповых динамических миссий для функционально разнородной группы АПР в условиях топливных ограничений [81]. В исследованной постановке необходимо таким образом спланировать групповые сборы, чтобы каждый сбор либо инициировал одно из событий, связанных с подзарядкой роботов (выход из группы для подзарядки, либо прием в группу уже заряженного робота), либо обеспечивал требуемую частоту актуализации данных. Порядок и длительность подзарядки каждого робота при этом должны быть спланированы так, чтобы обеспечивать максимальную производительность тех АПР, которые остаются для выполнения задач. Производительность в данном случае оценивается по размеру работающей группы, ее средней скорости и оснащенности обследовательским оборудованием.

Таким образом, от искомого расписания групповых сборов требуется соответствие следующим критериям (в порядке убывания значимости):

1. Поддержание работоспособности всех роботов в группе (своевременная подзарядка каждого АПР с учетом количества доступных зарядных станций);
2. Соблюдение требуемой частоты коммуникационных сеансов;
3. Постоянная оснащенность действующей группировки АПР всеми типами бортового оборудования;
4. Минимальное количество одновременно заряжающихся роботов на протяжении всей миссии;
5. Отсутствие излишне частых групповых сборов, так как каждый такой сбор временно отвлекает АПР от выполнения текущих задач.

Рассматриваемая задача сформулирована в терминах класса задач составления расписания. Используемая дискретизация пространства поиска позволяет ценой незначительных погрешностей одновременно облегчить кодирование решения и ускорить процесс его поиска. В качестве целевой функции выступает функция потерь, оценивающая производительность одновременно заряжающихся роботов на каждом сегменте времени, а также накладывающая дополнительные взвешенные штрафы за

нарушение условий допустимости. Несмотря на большое разнообразие представленных в литературе алгоритмов составления расписаний и их модификаций, нацеленных на улучшение тех или иных аспектов задачи, наиболее часто применимыми на протяжении уже многих лет остаются эволюционные алгоритмы (ЭА) ввиду их крайне высокой эффективности, в особенности на задачах большой размерности [85, 86]. Естественный параллелизм ЭА позволяет легко реализовывать распределенное решение задачи на нескольких вычислительных узлах, в то время как «any-time»-природа алгоритма гарантирует получение некоторого допустимого решения в любой момент остановки вычислений, что крайне важно для расчетов в реальном времени.

Таким образом, в качестве планировщика миссий на верхнем уровне предлагается использование модификации ЭА, адаптированной под специфику задачи. При реализации ЭА используется сжатое представление расписания, что позволяет значительно понизить размерность задачи и, следовательно, вычислительно-временные затраты на поиск ее решения. Разработанная процедура восстановления полного вида решения осуществляет не только декодирование решения, но и его локальную оптимизацию, объединяя или переупорядочивая смежные события. Используются специализированные процедуры генерации стартовой популяции, позволяющие параллельно заполнять поколение допустимыми решениями низкого качества и недопустимыми решениями высокого качества. Это обеспечивает разнообразие генетического материала, а также возможность алгоритму быстро выйти в области поиска на границах допустимости, где, предположительно, находятся наиболее эффективные решения. Применяются два оператора скрещивания, многорежимная мутация, авторская схема локального поиска.

Предложенный иерархический подход, а также алгоритмы, реализующие планирование на различных уровнях, были программно реализованы на языке C++ в виде единой системы управления миссией в разрабатываемом моделирующем комплексе на базе межплатформенной среды Unity (рисунок 16). Эффективность работы подхода была подтверждена в рамках серии вычислительных экспериментов на специально сгенерированном тестовом наборе задач из шести классов, различающихся по одной из трех степеней разнородности условий, а также одним из двух уровней динамики условий. Предложенный подход демонстрирует высокую эффективность на всех группах тестовых задач без потери качества даже на самых сложных постановках. Параллельный расчет одновременно на разных роботах обеспечивает повышенную отказоустойчивость группы в целом, а предложенные коммуникационные схемы позволяют группе эффективно функционировать при минимальных объемах и скоростях передачи данных.

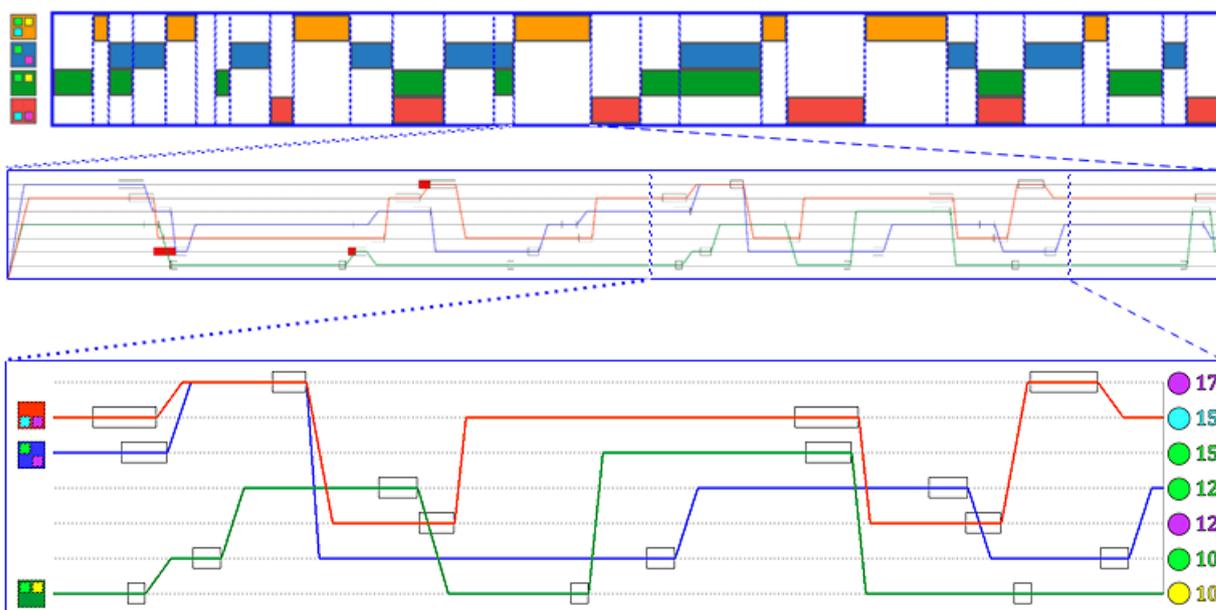


Рисунок 16 – Пример сгенерированной миссии по патрулированию ряда объектов в условиях топливных ограничений на разных масштабах планирования

*Обобщение и оценка полученных результатов.* Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. Предложен общий подход к организации управления разнородной группой автономных роботов при выполнении длительных динамических миссий в условиях ограниченной коммуникации. Разработан метод формирования групповой стратегии, осуществляющий планирование групповых рандеву на основании запланированных действий роботов и прогнозируемых событий с учетом текущего состояния группы. Децентрализованный подход к планированию на верхнем уровне позволяет при необходимости оперативно скорректировать текущую стратегию в процессе рандеву силами действующей группы. Схема передачи постепенно обновляемой информации по основному графу коммуникационной сети АПР в процессе актуализации данных обеспечивает всех участников обмена идентичными актуальными знаниями о среде и состоянии группы без необходимости установки связи между каждой парой роботов напрямую.

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* Предложенная схема формирования групповой стратегии на основе последовательных групповых сборов объединяет ряд существующих методов управления автономными робототехническими группами в рамках некоторого единого общего подхода, позволяющего обеспечить движение группы сразу несколькими важными свойствами, такими как коммуникационная устойчивость [87], децентрализованность механизмов планирования, возможность учета ограничений различной природы. Разработанный алгоритм

планирования точек групповых сборов отличает наличие специализированных конструктивных эвристик и эвристик улучшения, наборе адаптированных генетических операторов, оригинальные схемы кодирования и оценки качества решений. Схема информационного обмена обеспечивает оперативную актуализацию данных внутри группы при минимальных требованиях к коммуникационному каналу. Разработанный подход может применяться для класса задач, связанных с управлением группами роботов в различных средах в условиях ограниченной коммуникации.

*Достоверность полученных результатов* подтверждена вычислительными экспериментами при решении тестового набора задач планирования с предрассчитанными оптимальными решениями.

#### **4) Разработка метода и алгоритма качественного исследования многокомпонентных дискретно-событийных систем на основе оригинальных логических и алгебраических методов.**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач.* Широко распространенным приемом при моделировании сложных технических систем является высокоуровневое описание их функционирования с целью акцентировать внимание на события, которые вызывают смену состояния системы. Такие модели получили название дискретно-событийных систем (ДСС), а теория, описывающая методы управления ими, известна как теория супервизорного управления (ТСУ, P.J. Ramadge, W.M. Wonham). Система и спецификация в рамках ТСУ моделируются в виде конечных автоматов, генерирующих формальные языки, слова которых представляют собой последовательности событий, возникающих в системе. Современное состояние ТСУ представлено в работах [88, 89]. Супервизор как средство управления ДСС препятствует возникновению событий, допускающих управление, если это ведет к реализации нежелательного поведения системы. При невозможности построения централизованного управления используется набор локальных супервизоров, совместные действия которых должны обеспечить требуемое поведение системы, определяемое так называемой спецификацией. Децентрализованное супервизорное управление реализуется набором автоматов, каждый из которых наблюдает часть поведения системы и управляет подмножеством всех управляемых событий системы. Как известно, одним из условий существования децентрализованного супервизора является ко-наблюдаемость языка спецификации [90]. Для уменьшения вычислительной сложности алгоритмов построения супервизоров применяются формальные абстракции автоматов, соответствующих системе и спецификации, например, основанные на отношениях бисимуляции и ее вариациях, конфликтной эквивалентности и других [91]. При переходе к абстракциям необходимо

обеспечить сохранение свойств языков, генерируемых абстрагированным и исходным автоматом, в том числе ко-наблюдаемость. Для получения условий сохранения предложено использовать оригинальный метод логико-алгебраических уравнений, который позволяет алгоритмически генерировать критерии сохранения свойств систем при некоторых действующих между ними отображениях типа морфизмов [92].

*Характеристика задач и результаты исследований.* Пусть дискретно-событийная система как модель высокоуровневого описания функционирования многокомпонентного робототехнического комплекса задается генератором  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  некоторого формального языка  $L(G)$ . Здесь  $Q$  – множество состояний  $q$ ;  $\Sigma$  – множество событий;  $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$  – функция переходов;  $q_0 \in Q$  – начальное состояние;  $Q_m \subset Q$  – множество маркированных состояний. Из множества всех событий выделяются множества  $\Sigma_c$  и  $\Sigma_o$  управляемых и наблюдаемых событий,  $\Sigma_c, \Sigma_o \subseteq \Sigma$ ,  $\Sigma_{uc} = \Sigma \setminus \Sigma_c$ ,  $\Sigma_{uo} = \Sigma \setminus \Sigma_o$ .

Предположим, что спецификация на поведение ДСС задана некоторым формальным языком  $K \subseteq L(G)$ . Основной задачей теории супервизорного управления является алгоритмическое построение супервизора, обеспечивающего функционирование системы в рамках наложенной спецификации, т. е. такого объекта  $J$ , что  $L(J/G) = \overline{K}$ , где  $\overline{K}$  есть префиксное замыкание  $K$ . Поскольку, как правило, в сложной технической системе затруднено централизованное наблюдение всех аспектов ее поведения, зачастую имеется несколько пространственно распределенных средств наблюдения и управления – локальных супервизоров. Пусть локальный супервизор  $J_{loc_i}$  наблюдает некоторое подмножество  $\Sigma_{loc_i,o}$  множества  $\Sigma$  и управляет некоторым подмножеством  $\Sigma_{loc_i,c}$  множества  $\Sigma$ ,  $\bigcup_{i=1}^n \Sigma_{loc_i,c} = \Sigma_c$ ,  $\bigcup_{i=1}^n \Sigma_{loc_i,o} = \Sigma_o$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

*Задача децентрализованного управления.* Пусть задан генератор  $G$  над алфавитом  $\Sigma$ , язык  $K \subseteq L(G)$ , и множества  $\Sigma_{loc_i,o}$ ,  $\Sigma_{loc_i,c} \subseteq \Sigma$ ,  $i = 1 \dots n$ . Требуется построить локальные супервизоры  $J_{loc_i}$ , такие что  $Agg(J_{loc_i})$  является супервизором для  $G$ , обеспечивающим  $L(Agg(J_{loc_i})/G) = \overline{K}$ . Здесь  $Agg(J_{loc_i})$  означает некоторое правило агрегирования решений локальных супервизоров  $J_{loc_i}$ , обеспечивающее достижение желаемого поведения управляемой системы, например, конъюнкция или дизъюнкция решений локальных супервизоров.

Наравне с управляемостью, одним из условий существования децентрализованного супервизора является ко-наблюдаемость языка спецификации. Язык  $K$  называется *ко-наблюдаемым* относительно  $L(G)$ ,  $\Sigma_{loc_i,c}$ ,  $\Sigma_{loc_i,o}$  и  $P_i$ ,  $i = 1 \dots n$ , если  $\forall s \in \overline{K}$  и  $\forall \sigma \in \Sigma_c = \bigcup_{i=1}^n \Sigma_{loc_i,c}$

$$s\sigma \in \bar{K} \ \& \ s\sigma \notin L(G) \rightarrow \exists i \in \{1, \dots, n\}: [P_i^{-1}(P_i(s))]\sigma \cup \bar{K} = \emptyset \ \text{и} \ \sigma \in \Sigma_{loc_i,c},$$

или, другими словами и для случая  $n = 2$ ,  $\forall s, s_1, s_2 \in \Sigma^* (P_1(s) = P_1(s_1))$ ,

$$P_2(s) = P_2(s_2) \rightarrow ((\forall \sigma \in \Sigma_{loc_1,c} \cap \Sigma_{loc_2,c}) s \in \bar{K}, s\sigma \in L(G), s_1\sigma, s_2\sigma \in \bar{K} \rightarrow s\sigma \in \bar{K}) \ \&$$

$$\ \& ((\forall \sigma \in \Sigma_{loc_2,c} \setminus \Sigma_{loc_1,c}) s \in \bar{K}, s\sigma \in L(G), s_2\sigma \in \bar{K} \rightarrow s\sigma \in \bar{K}).$$

Поскольку ко-наблюдаемость требует проверки каждый раз при изменении спецификации, а известные полиномиальные алгоритмы проверки ко-наблюдаемости существенным образом зависят от размерности автоматов, порождающих рассматриваемые языки, для уменьшения этих размерностей оказывается полезным применение автоматных абстракций. Простейшим способом абстракции является сокрытие, т. е. акт преобразования события в так называемое тихое событие  $\tau$ . Тихое событие может рассматриваться как общее ненаблюдаемое событие и обычно не включается в алфавит. Для ряда других популярных способов построения абстракций автоматов, задействованных в построении супервизорного управления, оригинальным методом логико-алгебраических уравнений получены условия сохранения свойства ко-наблюдаемости языка спецификации. Одним из них является правило множества активных событий.

*Правило множества активных событий.* Пусть  $q \xrightarrow{\sigma} q'$  означает, что  $\delta(\sigma, q) = q'$ , а  $q \overset{\sigma}{\Rightarrow} q'$  означает, что существует строка  $s \in (\Sigma \cup \tau)^*$ , такая что  $\delta(\sigma, q) = q'$  и  $P_\tau(s) = \sigma$ . Здесь  $P_\tau(s)$  есть натуральная проекция, которая стирает тихое событие  $\tau$  из строк  $s \in (\Sigma \cup \tau)^*$ . Для автомата  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  бинарное отношение  $\sim_{inc} \subseteq Q \times Q$  определяется следующим образом:  $q \sim_{inc} q'$ , если  $q_0 \xrightarrow{\varepsilon} q \Leftrightarrow q_0 \xrightarrow{\varepsilon} q'$ , и

$$\forall p \in Q, \forall \sigma \in \Sigma \quad p \xrightarrow{\sigma} q \Leftrightarrow p \xrightarrow{\sigma} q'.$$

Для состояния  $q \in Q$  множество активных событий определяется как  $\Sigma(q) = \{\sigma \in \Sigma \mid \delta(q, \sigma) \text{ определено}\}$ . *Правило множества активных событий:* два состояния, эквивалентных относительно  $\sim_{inc}$  и имеющие одно и то же множество активных событий, могут быть объединены, приводя к конфликтно эквивалентному автомату. Оригинальным методом логико-алгебраических уравнений получены условия сохранения свойства ко-наблюдаемости языка спецификации при редукции ДСС согласно правилу множества активных событий.

*Предложение.* Пусть ДСС  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$  подвергается редукции согласно правилу множества активных событий относительно языка  $K$ , и  $G' = (Q', \Sigma', \delta', q'_0, Q'_m)$  является результатом этой редукции.  $K$  является ко-наблюдаемым относительно  $G$ ,  $\Sigma_{loc_i,c}$

$\Sigma_{loc_i,o} \subseteq \Sigma$ ,  $i = 1,2$ , тогда и только тогда, когда  $K$  ко-наблюдаем относительно  $G'$ ,  $\Sigma_{loc_1,o}'$ ,  $\Sigma_{loc_2,o}'$ , и  $(\Sigma_{loc_1,c} \setminus \Sigma_{loc_2,c})' = \Sigma_{loc_1,c} \setminus \Sigma_{loc_2,c}$ ,  $(\Sigma_{loc_2,c} \setminus \Sigma_{loc_1,c})' = \Sigma_{loc_2,c} \setminus \Sigma_{loc_1,c}$ ,  $(\Sigma_{loc_1,c} \cap \Sigma_{loc_2,c})' = \Sigma_{loc_1,c} \cap \Sigma_{loc_2,c}$ .

Поскольку проверка неконфликтности локальных супервизоров, реализующих модульные спецификации, сводится к проверке свойства неблокируемости, методом логико-алгебраических уравнений также получены условия сохранения неблокирования при построении модульного супервизора ДСС.

*Обобщение и оценка полученных результатов.* Предложенный метод исследования ДСС является универсальным и может использоваться для уменьшения вычислительной сложности решения различных задач теории супервизорного управления ДСС, в том числе связанных с децентрализацией и модульностью управления, а также частичным наблюдением событий. Аналогичным образом могут быть получены условия применимости различных абстракций автоматов, задействованных в построении супервизорного управления, при условии сохранения ко-наблюдаемости языка спецификации, неблокирования и других свойств ДСС.

*Новизна и практическая значимость полученных результатов.* В рамках автоматного представления системы и ограничений на её поведение как объектов теории супервизорного управления ДСС получены новые условия применимости процедур уменьшения размерности рассматриваемых при построении супервизоров автоматов. Оригинальным методом логико-алгебраических уравнений получены условия сохранения свойств ко-наблюдаемости языка спецификации и неблокирования, существенных для реализации децентрализованного супервизорного управления ДСС. Полученные результаты позволяют снизить вычислительную сложность алгоритмов теории супервизорного управления ДСС.

*Достоверность полученных результатов* подтверждена вычислительными экспериментами, а также строгостью и обоснованностью математического аппарата, используемого при решении рассматриваемой задачи.

## **5) Алгоритмы построения общих функций Ляпунова для систем с переключениями**

*Выбор направления исследований. Методы решения задач.* В современной теории управления активно изучаются гибридные системы, описываемые уравнениями с переключениями правых частей в ходе процесса управления [93-95]. Наличие переключений существенно затрудняет решение задач анализа динамики и синтеза стабилизирующих управлений, поэтому актуальной задачей является развитие теории

управления для такого рода гибридных систем [96]. Основным, а часто и единственным строгим методом исследования динамики гибридных систем обычно выступает метод функций Ляпунова (см., например, [97-100]). Как следует из капитальных обзоров [93-95], наиболее изучены вопросы построения общих квадратичных функций Ляпунова (ОКФЛ) для двумерных линейных дифференциальных систем, дискретные системы и системы более высоких размерностей в этом плане значительно менее изучены. В докладе предлагается алгоритм построения общих функций Ляпунова в виде квадратичных форм или форм четвертой степени для семейств трехмерных переключаемых систем, правые части которых являются линейными функциями или однородными полиномами третьей степени.

Рассмотрим семейство систем следующего вида

$$x(k+1) = A^{(i)}x(k), \quad x \in R^3, i = 1, 2, \dots, N, \quad k \in N_0 = \{0, 1, 2, \dots\} \quad (1)$$

Для этого семейства линейных трехмерных дискретных систем будем строить общую квадратичную функцию Ляпунова в виде  $V(x) = x^T S x$ , где симметричная матрица  $S = (s_{ij}), i, j = 1, 2, 3$  зависит от пяти параметров  $\alpha, \beta, d_{12}, d_{13}, d_{23}$  следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{11} = \alpha, \quad 0 < \alpha < 1 \\ s_{22} = \beta\sqrt{1 - \alpha^2}, \quad 0 < \beta < 1 \\ s_{33} = \sqrt{(1 - \alpha^2)(1 - \beta^2)}, \\ s_{12} = s_{21} = d_{12}\sqrt{s_{11}s_{22}}, \quad -1 < d_{12} < 1 \\ s_{13} = s_{31} = d_{13}\sqrt{s_{11}s_{33}}, \quad -1 < d_{13} < 1 \\ s_{23} = s_{32} = d_{23}\sqrt{s_{22}s_{33}}, \quad -1 < d_{23} < 1. \end{array} \right. \quad (2)$$

Матрица  $S$  будет положительно определенной при любых значениях параметров из указанных диапазонов при выполнении неравенства

$$1 + 2d_{12}d_{13}d_{23} - d_{12}^2 - d_{13}^2 - d_{23}^2 > 0. \quad (3)$$

Отметим, что если для семейства (1) существует ОКФЛ, то, не ограничивая общности, ее можно представить так, чтобы коэффициенты удовлетворяли (2) и (3).

Вычисляя первую разность от  $V(x)$  в силу  $i$ -той системы семейства (1), получим квадратичную форму

$$\Delta V_i(x) = x^T (A^{(i)T} S A^{(i)} - S) x \quad (4)$$

Проверка отрицательной определенности квадратичных форм (4) проводится с помощью критерия Сильвестра.

Таким образом, алгоритм построения ОКФЛ для семейства (1) заключается в следующем. Разбиваем все пять диапазонов изменения параметров, указанные в (2), сетками из конечного числа точек. Для каждого фиксированного набора значений параметров проверяем неравенства (3) и неравенства критерия Сильвестра для (4). Если

все они выполнены, то ОКФЛ построена и задается формулами (2) при текущих значениях параметров. Если же хотя бы одно из упомянутых неравенств нарушено, то переходим к новой точке в пространстве параметров и повторяем все вычисления.

Если вместо семейства дискретных линейных систем (1) рассматривается семейство линейных дифференциальных систем вида  $\dot{x} = A^{(i)}x$ , то алгоритм построения ОКФЛ остается тем же, только вместо первых разностей (4) используются производные в силу систем  $W_i(x) = x^T (A^{(i)T}S + SA^{(i)})x$ .

Теперь рассмотрим построение общей функции Ляпунова для семейства (1) в виде формы четвертой степени

$$V_4(x) = V_2^{(1)}(x)V_2^{(2)}(x) \quad (5)$$

Здесь  $V_2^{(1)}(x)$  и  $V_2^{(2)}(x) \sim$  квадратичные формы, коэффициенты которых удовлетворяют (2), (3) и выбираются независимо. Поэтому (5) будет положительно определенной формой четвертой степени от трех переменных. Вычисляя первую разность в силу  $i$ -той системы (1), получим форму четвертой степени  $\Delta V_4^{(i)} = V_4(A^{(i)}x) - V_4(x)$

Алгоритм построения ОФЛ в классе форм четвертой степени полностью аналогичен описанному выше алгоритму построения ОКФЛ с той лишь разницей, что теперь требуется проводить проверку положительной определенности форм четвертой степени  $W_i = -\Delta V_4^{(i)}$ . Такую проверку будем выполнять на основе предложенного в [101] перехода к квадратичным формам от большего числа переменных.

Пусть дана форма 4-ой степени от трех переменных  $Q_4(x) = q_{1111}x_1^4 + q_{1112}x_1^3x_2 + \dots + q_{3333}x_3^4$ .

Введем новые переменные

$$y_1 = x_1^2, y_2 = x_1x_2, y_3 = x_1x_3, y_4 = x_2^2, y_5 = x_2x_3, y_6 = x_3^2.$$

В новых переменных форма  $Q_4(x)$  принимает вид квадратичной формы

$$P(y) = q_{1111}y_1^2 + q_{1112}y_1y_2 + \dots + q_{3333}y_6^2 = y^T M y.$$

Новые переменные не являются независимыми, они связаны квадратичными равенствами

$$\begin{cases} y_1y_4 - y_2^2 = y^T B_1 y = 0 \\ y_1y_6 - y_3^2 = y^T B_2 y = 0 \\ y_4y_6 - y_5^2 = y^T B_3 y = 0 \\ y_2y_3 - y_1y_5 = y^T B_4 y = 0 \\ y_2y_5 - y_3y_4 = y^T B_5 y = 0 \\ y_3y_5 - y_2y_6 = y^T B_6 y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Если квадратичная форма  $P(y)$  положительно определена при квадратичных условиях (6), то форма 4-ой степени  $Q_4(x)$  также положительно определена. Так как на

множестве (6) значения квадратичной формы  $P(y)$  совпадают со значениями квадратичной формы с матрицей  $M + \sum_{i=1}^6 \lambda_i B_i$  при любых коэффициентах  $\lambda_i \in R$ , то тем самым установлена справедливость следующего утверждения.

**Утверждение.** *Если для некоторых коэффициентов  $\lambda_i \in R$ ,  $i = \overline{1,6}$  линейная комбинация  $M + \sum_{i=1}^6 \lambda_i B_i$  является положительно определенной матрицей, то форма 4-ой степени  $Q_4(x)$  положительно определена.*

Таким образом, проверка отрицательной определенности первых разностей в алгоритме построения ОФЛ в виде формы 4-ой степени для семейства (1) сводится к задаче оптимизации в шестимерном пространстве коэффициентов  $\lambda_i \in R$ ,  $i = \overline{1,6}$ . Отметим, что предлагаемый здесь подход можно применять и для форм более высоких четных степеней и систем более высокой размерности, однако при этом очень быстро растет размерность получаемой задачи оптимизации.

Как показывают примеры, применение наряду с квадратичными формами также и форм четвертой и более высоких степеней расширяет возможности построения общих функций Ляпунова для систем с переключениями.

Результаты данного раздела опубликованы в [102-106].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в рамках этапа НИР 2019 г. выполнены в полном объеме и в соответствии с государственным заданием ИДСТУ СО РАН на 2017-2020 гг. по теме «Технологии разработки проблемно-ориентированных самоорганизующихся мультиагентных систем группового управления: методы, инструментальные средства, приложения» (№ гос. рег. АААА-А17-117032210078-4). Содержание НИР раскрыто в плане НИР ИДСТУ СО РАН на 2017-2020 гг.

В процессе выполнения работ на этапе НИР 2019 г. получены следующие результаты:

1) Разработаны новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях.

2) Разработана новая технология создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети.

3) Разработаны входной язык логического программирования и командный интерпретатор, включающий подсистему конструктивного автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул и подсистему управления логическим выводом.

4) Разработаны алгоритмы управления неголономными агентами в мультиагентной системе с изменяемым лидером.

5) Разработана информационно-коммуникационная технология обеспечения взаимодействия автономных распределенных компонент гетерогенной робототехнической группировки, выполняющей динамическую миссию в режиме реального времени.

6) Разработаны алгоритмы качественного исследования многокомпонентных дискретно-событийных систем и систем с переключениями.

По результатам этапа НИР 2019 г. опубликовано 17 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus [5-11, 31-32, 38, 56, 70, 73, 76, 81, 82, 102]; 18 работ в изданиях, включенных в базу данных РИНЦ [12-18, 53-55, 57, 63, 75, 77, 103-106]. Общее количество публикаций по результатам этапа НИР 2019 г. – 36, из них в журналах – 12.

Полный перечень публикаций по результатам этапа НИР 2019 г. приведен в приложении А.

Наиболее значимые результаты этапа НИР 2019 г.:

1. Разработан новый метод обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях. Этот метод, в отличие от других методов обеспечения надежности распределенных вычислений, базируется на применении нового адаптивного, мультисценарного алгоритма перераспределения вычислительных ресурсов РВС в случае отказа процесса решения задачи. Предложены новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений путем интегрированного тестирования в узлах сети как модулей, так и планов решения задач, в которые эти модули входят. Применение разработанных методов и алгоритма позволило повысить эффективность процесса решения важных крупномасштабных практических задач исследования энергетической безопасности России и Вьетнама. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., к.т.н. Феоктистов А.Г., к.т.н. Сидоров И.А., к.т.н. Горский С.А., Костромин Р.О.

2. Разработана технология автоматизации создания мультиагентной системы управления гибридными вычислениями в пакете прикладных микросервисов. Эта технология сочетает надежность и доступность использования локальных вычислительных ресурсов с эластичностью облачных вычислений. В отличие от аналогичных систем, агенты реализованы на основе микросервисного подхода, обеспечивающего их многократное использование, упрощение процессов развертывания, обновления, тестирования и взаимодействия с помощью легковесных коммуникационных протоколов. Практическое применение разработанных средств обусловлено ориентацией на решение задач качественного анализа моделей двоичных динамических систем, широко используемых в различных предметных областях. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., д.т.н. Опарин Г.А., к.т.н. Богданова В.Г., к.т.н. Горский С.А., Пашинин А.А.

3. Разработан подход к управлению формациями автономных подводных роботов (АПР) в условиях неизвестной внешней среды. В рамках данного подхода разработаны алгоритм формирования ситуационной модели внешней среды с использованием данных, получаемых от локатора секторного обзора, механизмы определения лидера формации посредством анализа построенной модели и численного решения некоторой квадратичной задачи оптимизации, а также цифровые алгоритмы управления АПР для различных режимов функционирования группы в условиях изменяющегося лидера. В отличие от известных решений разработанный подход не требует непрерывной коррекции траектории движения каждого АПР и не предъявляет особых требований к форме препятствий, в нем для вычисления управляющих команд АПР используют информацию лишь об ограниченной части окружающего пространства.

Разработанные цифровые алгоритмы управления формациями в отличие от большинства известных в литературе учитывают возможности АПР обеспечивать требуемую динамику группы и учитывают ограничения на ресурсы управления. Также стоит отметить, что они не требуют непрерывного измерения параметров движения АПР и значительных вычислительных ресурсов, что упрощает их реализацию на борту. *Авторы результата:* к.т.н. Ульянов С.А., к.т.н. Максимкин Н.Н.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms / G. Tel. // Cambridge University Press, 2000. – 596 p.
2. Бондаренко А.А. Обеспечение отказоустойчивости высокопроизводительных вычислений с помощью локальных контрольных точек / А.А. Бондаренко, М.В. Якобовский // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Вычислительная математика и информатика. – 2014. – Т. 3, № 3. – С. 20–36.
3. A Survey on Scheduling Heuristics in Grid Computing Environment / M. Kumar Mishra et al. // I. J. Modern Education and Computer Science. – 2014. – Vol. 6, № 10. – P. 57–83.
4. Survey on Grid Resource Allocation Mechanisms / M.B. Qureshi et al. // J. Grid Computing. – 2014. – Vol. 12, № 2. – P. 399–441.
5. Subject-Oriented Computing Environment for Solving Large-Scale Problems of Energy Security Research / I. Bychkov et al. // Proc. of the Int. Conf. «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, Russia, February 18-20, 2019: Journal of Physics. Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. – P. 052030-1-052030-12.
6. Continuous Integration in Distributed Applied Software Packages / A. Feoktistov et al. // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 1531-1536.
7. Studying the Natural Gas Market under Demand Uncertainty Using a Heterogeneous Distributed Computing Environment / V.I. Zorkalzev et al. // Proc. of the Int. Conf. «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, Russia, February 18-20, 2019: Journal of Physics. Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – P. 072005-1-072005-6
8. Toolkit for Simulation Modeling of Queue Systems in Grid // A. Feoktistov et al. // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 51-59.
9. Methods and Tools for Evaluating the Reliability of Information and Computation Processes in Grid and Cloud Computing Systems // A. Feoktistov et al. // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 60-69.

10. Sidorov I.A. Meta-monitoring System for Ensuring a Fault Tolerance of the Intelligent High-Performance Computing Environment / I.A. Sidorov, T.V. Sidorova, Ya.V. Kurzybova // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 99-107.

11. Fereferov E.S. Framework for Preparing Subject Data in Testing Modules of Scientific Applications / E.S. Fereferov, A.G. Feoktistov, I.V. Bychkov // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 70-77.

12. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ в Orlando Tools / А.Г. Феоктистов и др. // Тр. ИСП РАН. – 2019. – Т. 31, № 2. – С. 83–96.

13. Гетерогенная распределенная вычислительная среда для решения крупномасштабных задач исследования энергетической безопасности / И.В. Бычков и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. V Междунар. конф. и молодежной школы (ИТНТ-2019). – Самара: Новая техника, 2019. – С. 445–454.

14. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ / А.Г. Феоктистов и др. // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2019): Короткие статьи и описания плакатов XIII Междунар. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 464.

15. Предметно-ориентированная распределенная вычислительная среда поддержки принятия решений по обеспечению живучести систем энергетики / И.В. Бычков и др. // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т., Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019. – С. 13–15.

16. Феоктистов А.Г. Система машинного обучения агентов управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т., Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019. – С. 216–218.

17. Феоктистов А.Г. Система обучения агентов управления вычислениями в гетерогенной распределенной среде / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, А.Н. Черных // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2019): Тр. VIII Междунар. конф. – М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2019. – С. 556-562.

18. Сидоров И.А. Средство тестирования выделяемых узлов кластера и освобождения их ресурсов в процессе обработки потока заданий / И.А. Сидоров, А.Г.

Феоктистов // Суперкомпьютерные дни в России: Тр. Междунар. конф. – М.: МАКС Пресс, 2019. – С. 229-230.

19. Еделев А.В. Применение комбинаторного моделирования для исследования развития систем энергетики / А.В. Еделев, В.И. Зоркальцев, А.Г. Феоктистов // Марчуковские научные чтения – 2019: Тез. Междунар. конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики». – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – С. 136.

20. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management / I. Bychkov et al. // Proc. of the XII Int. Symp. «Intelligent Systems», INTELS 2016, Moscow, Russia, October 5-7, 2016: Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 162-167.

21. Опарин Г.А. Планирование схем решения задач в инструментальном комплексе САТУРН/ПЗ / Г.А. Опарин, Д.Г. Феоктистов // Компьютерная логика, алгебра и интеллектуальное управление: Тр. Всерос. школы. – Иркутск: Изд-во ИрВЦ СО РАН, 1994. – Т. 1. – С. 5–13.

22. Agent-Based Approach to Monitoring and Control of Distributed Computing Environment / I.V. Bychkov et al. // Proc. Of the 13th Int. Conf. «Parallel Computing Technologies», PaCT 2015, Petrozavodsk, Russia, August 31 – September 4, 2015: Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9251. – P. 253-257.

23. Balaji P. Fault Tolerance Techniques for Scalable Computing / P. Balaji, D. Buntinas, D. Kimpe // Scalable Computing and Communications Theory and Practice. – Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2013. – P. 212–245.

24. Bogdanova V.G. Multiagent Approach to Controlling Distributed Computing in a Cluster Grid System / V.G. Bogdanova et al. // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2014. – Vol. 53, № 5. – P. 713–722.

25. Feoktistov A.G. Logical-Probabilistic Analysis of Distributed Computing Reliability / A.G. Feoktistov, I.A. Sidorov // Proc. of the 39th Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 30 – June 3, 2016: IEEE. 2016. – P. 247–252.

26. HTCondor [Электронный ресурс]. – URL: <http://research.cs.wisc.edu/htcondor> (дата обращения: 08.12.2019).

27. GridWay Metascheduler [Электронный ресурс]. – URL: <http://gridway.org> (дата обращения: 08.12.2019).

28. Пяткова Н.И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 198 с.

29. Jonsson H. Identifying Critical Components in Technical Infrastructure Networks / H. Jonsson, J. Johansson, H. Johansson // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. – 2008. – Vol. 222, № 2. – P. 235–243.
30. Methods and Software for Computer-Aided Design of the Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems / Ye.I. Somov et al. // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). – 2016. – Vol. 7, № 4. – P. 613-624.
31. Oparin G. Qualitative Analysis of Autonomous Synchronous Binary Dynamic Systems / G. Oparin, V. Bogdanova, A. Pashinin // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). – 2019. – Vol. 10, №. 3. – P. 407-419.
32. Bogdanova V.G. Multiagent Technology for Parallel Implementation of Boolean Constraint Method for Qualitative Analysis of Binary Dynamic Systems / V.G. Bogdanova, S.A. Gorsky // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 1043-1048.
33. Dubrova E. A SAT-based algorithm for finding attractors in synchronous Boolean networks / E. Dubrova, M. Teslenko // IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics. – 2011. – Vol. 8, № 5. – P. 1393-1399.
34. Dubrova E. A SAT-Based Algorithm for Finding Short Cycles in Shift Register Based Stream Ciphers / E. Dubrova, M. Teslenko // IACR Cryptology ePrint Archive. – 2016. – 1068.
35. An Efficient Method for Dynamic Analysis of Gene Regulatory Networks and in Silico Gene Perturbation Experiments / A. Garg et al. // Proc. of the 11th Annual Int. Conf. Research in Computational Molecular Biology, RECOMB 2007, Oakland, CA, USA, April 21-25, 2007: Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – Vol. 4453. – P. 62–76.
36. Naldi A. Decision Diagrams for the Representation and Analysis of Logical Models of Genetic Networks / A. Naldi, D. Thieffry, C. Chaouiya // Proc. of the Int. Conf. on Computational Methods in Systems Biology, CMSB 2007, Edinburgh, United Kingdom, September 20-21, 2007: Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – Vol. 4695. – P. 233-247.
37. A Parallel Attractor Finding Algorithm Based on Boolean Satisfiability for Genetic Regulatory Networks / W. Guo et al. // PLoS ONE. – 2014. – 9(4): e94258.
38. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations / G.A. Oparin et al. // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 236-241.

39. Richardson C. *Microservices: From Design to Deployment* / C. Richardson, F. Smith // NGINX Inc., 2016. – 74 p. [Электронный ресурс]. – URL: [https://ungrid.unal.edu.co:8888/img/Microservices\\_Designing\\_Deploying.pdf](https://ungrid.unal.edu.co:8888/img/Microservices_Designing_Deploying.pdf) (дата обращения: 08.12.2019).
40. Newman S. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems* / S. Newman // O'Reilly Media, 2015. – 282 p.
41. Savchenko D. *Microservices Validation: Methodology and Implementation* / D. Savchenko, G. Radchenko // Proc. of the 1st Ural Workshop on Parallel, Distributed, and Cloud Computing for Young Scientists, Ural-PDC 2015, Yekaterinburg, Russia, 2015: CEUR WS Proceedings. – 2015. – Vol. 1513. – P. 21-28.
42. Kehrer S. *AUTOGENIC: Automated Generation of Self-configuring Microservices* // S. Kehrer, W. Blochinger // Proc. of the 8th Int. Conf. on Cloud Computing and Services Science, CLOSER 2018, Funchal, Madeira, Portugal, March 19-21, 2018: SCITEPRESS. – 2018. – Vol. 1. – P. 35–46.
43. Open Issues in Scheduling Microservices in the Cloud / M. Fazio et al. // IEEE Cloud Computing. – 2016. – Vol. 3, №. 5. – P. 81-88.
44. Gorodetskii V.I. *Self-organization and Multiagent Systems: I. Models of Multiagent Self-organization* / V.I Gorodetskii // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2012. – Vol. 51. – №. 2. – P. 256-281.
45. Rodrigues N. *Dynamic Composition of Service Oriented Multi-agent System in Self-organized Environments* / N. Rodrigues, P. Leitão, E. Oliveira // Proc. of the Workshop on Intelligent Agents and Technologies for Socially Interconnected Systems, IAT4SIS '14, Prague, Czech Republic, August 18-22, 2014: ACM. – 2014. – P. 1-6.
46. Oberhauser R. *Microflows: Lightweight Automated Planning and Enactment of Workflows Comprising Semantically-Annotated Microservices* / R. Oberhauser // Proc. of the Sixth Int. Symp. on Business Modeling and Software Design, BMSD 2016, Rhodes, Greece, June 20-22, 2016: SCITEPRESS. – 2016. – Vol. 1. – P. 134-143.
47. Florio L. *Decentralized Self-Adaptation in Large-Scale Distributed Systems* / L. Florio // Proc. of the 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering. Bergamo, Italy, August 30 - September 04, 2015: ACM. – 2015. – P. 1022-1025.
48. Burguillo J.C. *Self-organizing Coalitions for Managing Complexity: Agent-based Simulation of Evolutionary Game Theory Models using Dynamic Social Networks for Interdisciplinary Applications* / J.C. Burguillo // Springer International Publishing. – 2018. – 348 p.

49. Collective Information Processing and Pattern Formation in Swarms, Flocks, and Crowd / M. Moussaid et al. // *Topics in Cognitive Science (TopiCS)*. – 2009. – Vol. 1, № 3. – P. 469–497.

50. Sebastio S. Computational Field Framework for Collaborative Task Execution in Volunteer Clouds / S. Sebastio, M. Amoretti, A. A. Lluch Lafuente // *Proc. of the 9th Int. Symp. on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, SEAMS 2014, Hyderabad, India, June 02 - 03, 2014: ACM*. – 2014. – P. 105-114.

51. Сервис-ориентированная технология создания и применения децентрализованных мультиагентных решателей вычислительных задач / И.В. Бычков и др. // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2018. – № 12. – С. 36-44.

52. Distributed Solvers of Applied Problems Based on Microservices and Agent Networks / G.A. Oparin et al. // *Proc. of 41st Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 22-26, 2018: IEEE*. – 2018. – P. 1415-1420.

53. Организация управления гибридными вычислениями в пакете прикладных микросервисов / И.В. Бычков и др. // *Материалы XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного Федерального университета, 2019. – Т. 3. – С. 40-43.*

54. Опарин Г.А. Параллельное решение задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, С.А. Горский // *Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2019): Тр. VIII Междунар. конф. – М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2019. – С. 59-66.*

55. Опарин Г.А. Конструктивный подход к проверке истинности квантифицированных булевых формул в решателе HPC2QALL / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, С.А. Горский // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2019. – № 3 (15). – С. 91-101.

56. The Synthesis of Stabilizing Feedback for Binary Dynamic Systems: A Logical Approach / G.A. Oparin et al. // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)*. – 2019. – Vol. 10, №. 3. – P. 479-486.

57. Опарин Г.А. Управление конвейерно-параллельными вычислениями при решении задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. – 2019. – № 3 (15). – С. 79-90.

58. The Applied Problems Solving Technology Based on Distributed Computational Subject Domain Model: a Decentralized Approach / I.V. Vychkov et al. // Короткие статьи и описания плакатов XIII Междунар. конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2018). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. – С. 34-48.
59. Rindos A. Dew Computing: the Complementary Piece of Cloud Computing / A. Rindos, Y. Wang // Proc. of the Int. Conf. on Big Data and Cloud Computing (BDCloud), Social Computing and Networking (SocialCom), Sustainable Computing and Communications (SustainCom), BDCLOUD-SocialCom-SustainCom 2016, Atlanta, GA, USA, October 8-10, 2016: IEEE. – 2016. – P. 15-20.
60. Muggleton S. Inductive Logic Programming / S. Muggleton // New generation computing. – 1991. – Vol. 8, №. 4. – С. 295-318.
61. Kowalski R. Predicate Logic as Programming Language / R. Kowalski // Proc. of the 6th IFIP Congress 1974, Stockholm, Sweden, August 5-10, 1974: North-Holland. – 1974. – 569-574.
62. Apt K.R. Contributions to the Theory of Logic Programming / K.R. Apt, M.H. Van Emden // Journal of the ACM. – 1982. – Vol. 29, №. 3. – С. 841-862.
63. Давыдов А.В. Проверка свойства ко-наблюдаемости формального языка при помощи логического вывода / А.В. Давыдов, Н.В. Нагул, А.А. Ларионов // Тр. XIII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019), Москва, 17-20 июня 2019 г. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1925-1929.
64. Li X. An Adaptive SOM Neural Network Method to Distributed Formation Control of a Group of AUVs / X. Li, D. Zhu // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65, № 10. – P. 8260-8270.
65. Lee G. Decentralized Behavior-Based Formation Control of Multiple Robots Considering Obstacle Avoidance / G. Lee, D. Chwa // Intelligent Service Robotics. – 2018. – Vol. 11, № 1. – P. 127-138.
66. Gomes R. Attainable-Set Model Predictive Control for AUV Formation Control / R. Gomes, F.L. Pereira // Proc. of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop, Porto, Portugal, November 6–9, 2018: IEEE. – 2018. – P. 1-6.
67. Formation Control for Autonomous Robots with Collision and Obstacle Avoidance Using a Rotational and Repulsive Force-Based Approach / A.D. Dang et al. // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2019. – Vol. 16, № 3. – P. 1-16.
68. Pang S. Joint Formation Control with Obstacle Avoidance of Towfish and Multiple Autonomous Underwater Vehicles Based on Graph Theory and the Null-Space-Based Method / S. Pang, Y. Li, H. Yi // Sensors. – 2019. – Vol. 11. – P. 1424-8220.

69. Cooperative Path Planning of Multiple Autonomous Underwater Vehicles Operating in Dynamic Ocean Environment / Y. Zhuang et al. // *ISA Transactions*. – 2019. – Vol. 94. – P. 174-186.
70. Hierarchical Control System Design Problems for Multiple Autonomous Underwater Vehicles / I. Bychkov et al. // *Proc. of the Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2019)*, Tomsk, Russia, April 18-20, 2019: IEEE. – P. 1-6.
71. Hybrid Control Approach to Multi-AUV System in a Surveillance Mission / I. Bychkov et al. // *Information Technology in Industry*. – 2018. – Vol. 6, № 1. – P. 20-26.
72. Zavlanos M.M. A Distributed Auction Algorithm for the Assignment Problem / M.M. Zavlanos, L. Spesivtsev, G.J. Pappas // *Proc. of 47th IEEE Conf. on Decision and Control, Cancun, Mexico, December 9-11, 2008: IEEE*. – 2008. – P. 1212-1217.
73. Ul'yanov S. Formation Path-Following Control of Multi-AUV Systems with Adaptation of Reference Speed / S. Ul'yanov, N. Maksimkin // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)*. – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 487-500.
74. Vassilyev S. A VLF-based Technique in Applications to Digital Control of Nonlinear Hybrid Multirate Systems / S. Vassilyev, S. Ulyanov, N. Maksimkin // *12th Int. Conf. on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Science (ICNPAA 2018 World Congress)*, Yerevan, Armenia, 3-6 July, 2018: *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – V. 1798. – P. 020170(1)-020170(10).
75. Ульянов С.А. Управление строем АНПА с учетом ограничений на ресурсы управления / С.А. Ульянов, Н.Н. Максимкин // *Тр. XIII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019)*, Москва, 17-20 июня 2019 г. – М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1220-1224.
76. Kostylev D. Development of the Complex Modelling System for Intelligent Control Algorithms Testing / D. Kostylev, A. Tolstikhin, S. Ul'yanov // *Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 943-948.
77. Костылев Д.А., Толстихин А.А. Реализация базовых сервисов программно-аппаратного комплекса для исследования поведения группировок автономных мобильных роботов // *Наука и молодежь: сб. Тр. Пятой Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых*, Иркутск, 16–17 мая 2019 г. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – С. 512-518.
78. A Real-Time Reaction Obstacle Avoidance Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles in Unknown Environments / Z. Yan et al. // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, № 2. – P. 1424-8220.

79. Task Allocation and Path Planning for Collaborative AUVs Operating Through an Underwater Acoustic Network / Y. Deng et al. // *Journal of Robotics*. – 2003. – Vol. 2013 (483095). – P. 1-15.
80. Hybrid Motion Planning Task Allocation Model for AUV's Safe Maneuvering in a Realistic Ocean Environment / S.M. Zadeh et al. // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2019. – Vol. 94, № 1. – P. 265-282.
81. Kenzin M. Autonomous Coordination of Heterogeneous Vehicles for Persistent Monitoring Problem with Route and Fuel Constraints / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // *Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings*. – 2019. – V. 2430. – P. 78-87.
82. Bychkov I.V. Two-Level Evolutionary Approach to Persistent Surveillance for Multiple Underwater Vehicles with Energy Constraints / I.V. Bychkov, M.Y. Kenzin, N.N. Maksimkin // *Tr. SPIIRAS*. – 2019. – Vol. 2, № 18. – P. 267-301.
83. Staranowicz A. A Survey and Comparison of Commercial and Open-Source Robotic Simulator Software / A. Staranowicz, G. L. Mariottini // *In Proc. of the 4th Int. Conf. on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA'11, Heraklion, Crete, Greece, May 25 - 27, 2011: ACM*. – 2011. – P. 56:1–56:8.
84. The BRICS Component Model: A Model-based Development Paradigm for Complex Robotics Software Systems / H. Bruyninckx et al. // *Proc. of the 28th Annual ACM Symp. on Applied Computing, SAC '13, Coimbra, Portugal, March 18 - 22, 2013: ACM*. – 2013. – P. 1758-1764.
85. Calis B. A Research Survey: Review of AI Solution Strategies of Job Shop Scheduling Problem / B. Calis, S. Bulkan // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2015. – Vol. 26 (5). – P. 961–973.
86. Vincent L. A Survey on Various Optimization Techniques with Respect to Flexible Job Shop Scheduling / L. Vincent, C. Durai // *International Journal of Scientific and Research Publications*. – 2014. – Vol. 4, № 3. – P. 1-7.
87. Kenzin M. Hybrid Evolutionary Approach to Multi-Objective Mission Planning for Group of Underwater Robots / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // *Proc. of the 8th Int. Conf. on Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education, CITech 2015, Almaty, Kazakhstan, September 24-27, 2015: Mathematical Modeling of Technological Processes, Communications in Computer and Information Science. Communications in Computer and Information Science book series*. – 2015. – Vol. 549. – P. 73-84.

88. Wonham W.M. Supervisory Control of Discrete-Event Systems / W.M. Wonham, K. Cai // Communication and Control engineering: Springer International Publishing, 2019. – 487 p.
89. Lafortune S. Discrete Event Systems: Modeling, Observation, and Control / S. Lafortune // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. – 2019. – Vol. 2. – P. 141-159.
90. Cassandras C.G. Introduction to Discrete Event Systems / C.G. Cassandras, S. Lafortune // Springer, 2008. – 772 p.
91. Hill R.C. Modular Supervisory Control with Equivalence-Based Abstraction and Covering-Based Conflict Resolution / R.C. Hill, D.M. Tilbury, S. Lafortune // Discrete Event Dynamic Systems. – 2010. – Vol. 20, № 1. – P. 139-185.
92. Nagul N.V. Generating Conditions for Preserving the Properties of Controlled Discrete Event Systems / N.V. Nagul // Automation Remote Control. – 2016. – Vol. 77, № 4. – P. 672-686.
93. Stability Criteria for Switched and Hybrid Systems / R. Shorten et al. // SIAM Rev. – 2007. – Vol. 49, № 4. – P. 545-592.
94. Шпилевая О.Я. Переключаемые системы: устойчивость и проектирование (Обзор) / О.Я. Шпилевая, К.Ю. Котов // Автометрия. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 71-87.
95. Hai L. Stability and Stabilizability of Switched Linear Systems: A Survey of Recent Results / L. Hai, P.J. Antsaklis // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2009. – Vol. 54, № 2. – P. 308-322.
96. Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory / Ed. by V. D. Blondel, A. Megretski // Princeton University Press, 2004. – 334 p.
97. Liberzon D. Switching in Systems and Control / D. Liberzon // Birkhauser Basel, 2003. – 233 p.
98. Васильев С.Н. Анализ динамики гибридных систем с помощью общих функций Ляпунова и множественных гомоморфизмов / С.Н. Васильев, А.А. Косов // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 27-47.
99. Александров А.Ю. Об устойчивости и стабилизации механических систем с переключениями / А.Ю. Александров, А.А. Косов, Я. Чэнь // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 6. – С. 5-17.
100. Aleksandrov A.Yu. On the Asymptotic Stability of Switched Homogeneous Systems / A.Yu. Aleksandrov, A.A. Kosov, A.V. Platonov // Systems & Control Letters. – 2012. – Vol. 61, № 1. – P. 127-133.
101. Сиразетдинов Т.К. К задаче построения функций Ляпунова для исследования устойчивости в целом решения систем с полиномиальной правой частью / Т.К.

Сиразетдинов, А.Б. Аминов // В кн. Метод функций Ляпунова и его приложения. Под ред. Матросова В.М., Васильева С.Н. – Новосибирск: Наука, 1981. – С. 72-87.

102. Kosov A.A. On Asymptotic Stability of Homogeneous Singular Systems with Switching / A.A. Kosov, M.V. Kozlov // Automation and Remote Control. – 2019. – Vol. 80, №3. – P. 429-436.

103. Kosov A.A. Construction of Exact Solutions and Analysis of Stability Complex Systems by Reduction to Ordinary Differential Equations with Power Nonlinearities / A.A. Kosov, E.I. Semenov // Журнал СВМО. – 2019. – Vol. 21, № 1. – P. 60-69.

104. Косов А.А. Об асимптотической устойчивости однородных сингулярных систем с переключениями / А.А. Косов, М.В. Козлов // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 3. – С. 45–54.

105. Обзор работ В. Н. Щенникова по исследованию конвергенции нелинейных почти периодических систем методом сравнения / А.А. Косов и др. // Журнал СВМО. 2019. – Т. 21, № 2. – С. 175-186.

106. Косов А.А. Об устойчивости взаимосвязанных нелинейных осцилляторов / А.А. Косов // Материалы Междунар. симп., посвященного 100-летию математического образования в Восточной Сибири и 80-летию со дня рождения проф. О. В. Васильева. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. – С. 232-233.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Перечень публикаций по результатам этапа НИР 2019 г.

1. Subject-Oriented Computing Environment for Solving Large-Scale Problems of Energy Security Research / I. Bychkov et al. // Proc. of the Int. Conf. «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, Russia, February 18-20, 2019: Journal of Physics. Conference Series. – 2019. – Vol. 1368. – P. 052030-1-052030-12.
2. Continuous Integration in Distributed Applied Software Packages / A. Feoktistov et al. // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 1531-1536.
3. Studying the Natural Gas Market under Demand Uncertainty Using a Heterogeneous Distributed Computing Environment / V.I. Zorkalzev et al. // Proc. of the Int. Conf. «Information Technologies in Business and Industry», Novosibirsk, Russia, February 18-20, 2019: Journal of Physics. Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – P. 072005-1-072005-6
4. Toolkit for Simulation Modeling of Queue Systems in Grid // A. Feoktistov et al. // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 51-59.
5. Methods and Tools for Evaluating the Reliability of Information and Computation Processes in Grid and Cloud Computing Systems // A. Feoktistov et al. // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 60-69.
6. Sidorov I.A. Meta-monitoring System for Ensuring a Fault Tolerance of the Intelligent High-Performance Computing Environment / I.A. Sidorov, T.V. Sidorova, Ya.V. Kurzybova // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 99-107.
7. Fereferov E.S. Framework for Preparing Subject Data in Testing Modules of Scientific Applications / E.S. Fereferov, A.G. Feoktistov, I.V. Bychkov // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings. – 2019. – Vol. 2430. – P. 70-77.

8. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ в Orlando Tools / А.Г. Феоктистов и др. // Тр. ИСП РАН. – 2019. – Т. 31, № 2. – С. 83–96.
9. Гетерогенная распределенная вычислительная среда для решения крупномасштабных задач исследования энергетической безопасности / И.В. Бычков и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. V Междунар. конф. и молодежной школы (ИТНТ-2019). – Самара: Новая техника, 2019. – С. 445–454.
10. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ / А.Г. Феоктистов и др. // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2019): Короткие статьи и описания плакатов XIII Междунар. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 464.
11. Предметно-ориентированная распределенная вычислительная среда поддержки принятия решений по обеспечению живучести систем энергетики / И.В. Бычков и др. // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т., Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019. – С. 13–15.
12. Феоктистов А.Г. Система машинного обучения агентов управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т., Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2019. – С. 216–218.
13. Феоктистов А.Г. Система обучения агентов управления вычислениями в гетерогенной распределенной среде / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, А.Н. Черных // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2019): Тр. VIII Междунар. конф. – М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2019. – С. 556-562.
14. Сидоров И.А. Средство тестирования выделяемых узлов кластера и освобождения их ресурсов в процессе обработки потока заданий / И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов // Суперкомпьютерные дни в России: Тр. Междунар. конф. – М.: МАКС Пресс, 2019. – С. 229-230.
15. Еделев А.В. Применение комбинаторного моделирования для исследования развития систем энергетики / А.В. Еделев, В.И. Зоркальцев, А.Г. Феоктистов // Марчуковские научные чтения – 2019: Тез. Междунар. конф. «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики». – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. – С. 136.
16. Oparin G. Qualitative Analysis of Autonomous Synchronous Binary Dynamic Systems / G. Oparin, V. Bogdanova, A. Pashinin // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). – 2019. – Vol. 10, №. 3. – P. 407-419.

17. Bogdanova V.G. Multiagent Technology for Parallel Implementation of Boolean Constraint Method for Qualitative Analysis of Binary Dynamic Systems / V.G. Bogdanova, S.A. Gorsky // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 1043-1048.
18. Microservice-oriented Approach to Automation of Distributed Scientific Computations / G.A. Oparin et al. // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 236-241.
19. Организация управления гибридными вычислениями в пакете прикладных микросервисов / И.В. Бычков и др. // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2019) в 4-х т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного Федерального университета, 2019. – Т. 3. – С. 40-43.
20. Опарин Г.А. Параллельное решение задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, С.А. Горский // Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2019): Тр. VIII Междунар. конф. – М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2019. – С. 59-66.
21. Опарин Г.А. Конструктивный подход к проверке истинности квантифицированных булевых формул в решателе HPC2QALL / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, С.А. Горский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3 (15). – С. 91-101.
22. The Synthesis of Stabilizing Feedback for Binary Dynamic Systems: A Logical Approach / G.A. Oparin et al. // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). – 2019. – Vol. 10, №. 3. – P. 479-486.
23. Опарин Г.А. Управление конвейерно-параллельными вычислениями при решении задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3 (15). – С. 79-90.
24. Давыдов А.В. Проверка свойства ко-наблюдаемости формального языка при помощи логического вывода / А.В. Давыдов, Н.В. Нагул, А.А. Ларионов // Тр. XIII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019), Москва, 17-20 июня 2019 г. – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1925-1929.

25. Hierarchical Control System Design Problems for Multiple Autonomous Underwater Vehicles / I. Bychkov et al. // Proc. of the Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2019), Tomsk, Russia, April 18-20, 2019: IEEE. – P. 1-6.
26. Ul'yanov S. Formation Path-Following Control of Multi-AUV Systems with Adaptation of Reference Speed / S. Ul'yanov, N. Maksimkin // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA). – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 487-500.
27. Ульянов С.А. Управление строем АНПА с учетом ограничений на ресурсы управления / С.А. Ульянов, Н.Н. Максимкин // Тр. XIII Всерос. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2019), Москва, 17-20 июня 2019 г. – М.: ИПУ РАН, 2019. С. 1220-1224.
28. Kostylev D. Development of the Complex Modelling System for Intelligent Control Algorithms Testing / D. Kostylev, A. Tolstikhin, S. Ul'yanov // Proc. of the 42nd Int. Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia, May 20-24, 2019: IEEE. – 2019. – P. 943-948.
29. Костылев Д.А., Толстихин А.А. Реализация базовых сервисов программно-аппаратного комплекса для исследования поведения группировок автономных мобильных роботов // Наука и молодежь: сб. Тр. Пятой Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иркутск, 16–17 мая 2019 г. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – С. 512-518.
30. Kenzin M. Autonomous Coordination of Heterogeneous Vehicles for Persistent Monitoring Problem with Route and Fuel Constraints / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings.– 2019. – V. 2430. – P. 78-87.
31. Bychkov I.V. Two-Level Evolutionary Approach to Persistent Surveillance for Multiple Underwater Vehicles with Energy Constraints / I.V. Bychkov, M.Y. Kenzin, N.N. Maksimkin // Tr. SPIIRAS. – 2019. – Vol. 2, № 18. – P. 267-301.
32. Kosov A.A. On Asymptotic Stability of Homogeneous Singular Systems with Switching / A.A. Kosov, M.V. Kozlov // Automation and Remote Control. – 2019. – Vol. 80, №3. – P. 429-436.
33. Kosov A.A. Construction of Exact Solutions and Analysis of Stability Complex Systems by Reduction to Ordinary Differential Equations with Power Nonlinearities / A.A. Kosov, E.I. Semenov // Журнал СВМО. – 2019. – Vol. 21, № 1. – P. 60-69.

34. Косов А.А. Об асимптотической устойчивости однородных сингулярных систем с переключениями / А.А. Косов, М.В. Козлов // Автоматика и телемеханика. – 2019. – № 3. – С. 45–54.

35. Обзор работ В. Н. Щенникова по исследованию конвергенции нелинейных почти периодических систем методом сравнения / А.А. Косов и др. // Журнал СВМО. 2019. – Т. 21, № 2. – С. 175-186.

36. Косов А.А. Об устойчивости взаимосвязанных нелинейных осцилляторов / А.А. Косов // Материалы Междунар. симп., посвященного 100-летию математического образования в Восточной Сибири и 80-летию со дня рождения проф. О. В. Васильева. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2019. – С. 232-233.