

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-А17-117032210078-4
Рег. № ИКРБС
Инв. № 2018-05

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДСТУ СО РАН
академик



И.В. Бычков
2018 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

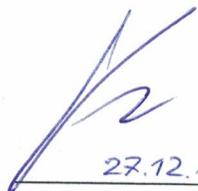
ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ
ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ: МЕТОДЫ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
СРЕДСТВА, ПРИЛОЖЕНИЯ
(промежуточный, этап 2)

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

Развитие технологий и стандартов GRID

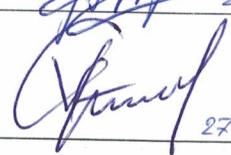
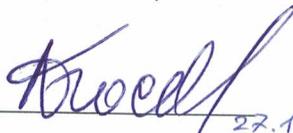
Программа IV.38.1. Методы и технологии создания и интеграции гетерогенных распределенных информационно-вычислительных ресурсов для поддержки междисциплинарных научных исследований на основе сервис-ориентированной парадигмы

Руководитель НИР,
академик


27.12.18 И.В. Бычков
подпись, дата

Иркутск 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

| | | |
|--|--|--|
| Руководитель темы академик |  27.12.2018 | И.В. Бычков (введение, разделы 1-2, заключение) |
| Исполнители темы: | | |
| зам. директора по н.р. д-р техн. наук |  27.12.18 | Г.А. Опарин (введение, раздел 1, заклучение) |
| зам. директора по н.р. канд. техн. наук |  27.12.18 | Н.Н. Максимкин (введение, раздел 2, заклучение) |
| зам. лаб. канд. техн. наук. |  27.12.18 | А.П. Новопашин (раздел 1) |
| зав. лаб. канд. техн. наук |  27.12.18 | С.А. Ульянов (раздел 2) |
| вед. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук |  27.12.2018 | А.А. Косов (раздел 2) |
| вед. науч. сотр. канд. техн. наук. |  27.12.18 | А.Г. Феоктистов (раздел 1) |
| ст. науч. сотр. канд. техн. наук. |  27.12.18 | В.Г. Богданова (раздел 1) |
| ст. науч. сотр. канд. физ.-мат. наук |  27.12.18 | Н.В. Нагул (раздел 2) |
| науч. сотр. канд. техн. наук. |  27.12.18 | С.А. Горский (раздел 1) |
| науч. сотр. канд. техн. наук. |  27.12.18 | И.А. Сидоров (раздел 1) |
| науч. сотр. |  27.12.18 | А.В. Давыдов (раздел 2) |
| мл. науч. сотр. |  27.12.18 | М.Ю. Кензин (раздел 2) |

| | | |
|-------------------------------------|--|---------------------------|
| мл. науч. сотр. |  _____ 27.12.18 | А.А. Пашинин (раздел 1) |
| программист |  _____ 27.12.18 | К.В. Беденко (раздел 2) |
| программист |  _____ 27.12.18 | Р.О. Костромин (раздел 1) |
| программист |  _____ 27.12.18 | Д.А. Костылев (раздел 2) |
| программист |  _____ 27.12.18 | А.А. Ларионов (раздел 2) |
| программист |  _____ 27.12.18 | А.А. Толстихин (раздел 2) |
| Нормоконтролёр канд. техн. наук. |  _____ 27.12.18 | Е.С. Фереферов |

РЕФЕРАТ

Отчет 69 с., 8 рис., 1 табл., 92 источника, 1 приложение..

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 2018 г. разработаны новые мультиагентные алгоритмы и технология для эффективного управления заданиями распределенных пакетов прикладных программ в процессе решения больших научных и прикладных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде; созданы новые алгоритмы (алгоритм формирования булевой модели свойства и мультиагентный алгоритм проверки выполнимости свойства) и построены булевы модели для качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений; разработана спецификация логического языка для нехорновской системы логического программирования на основе позитивно-образованных формул; разработаны новые алгоритмы управления группировкой автономных подводных роботов, обеспечивающих движение по заданному криволинейному пути с сохранением желаемой геометрической конфигурации; разработан новый двухуровневый подход к динамическому планированию широкомасштабных миссий для гетерогенной группы подводных роботов; разработаны новые эффективные способы стабилизации положения равновесия нелинейных механических систем, описываемых уравнениями Лагранжа второго рода, при измерении только части обобщенных координат и без построения наблюдателя для полного вектора состояния.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|-----------|
| СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ..... | 2 |
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1 Разработка методов и средств создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях..... | 9 |
| 2 Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации..... | 27 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 55 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 58 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 66 |

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. Гергеля, 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, B. 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 2018 году:

- 1) Разработать новые эффективные алгоритмы самоорганизации виртуальных сообществ агентов, выбора их лидеров и распределения ими ресурсов в процессе адаптивного управления заданиями в гетерогенной вычислительной сети.
- 2) Разработать новые булевы модели и алгоритмы качественного исследования двоичных динамических систем.

Выбор направления исследований обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

Характеристика задач и результаты исследований:

- 1) **Разработка новых эффективных алгоритмов самоорганизации виртуальных сообществ агентов, выбора их лидеров и распределения ими ресурсов в процессе адаптивного управления заданиями в гетерогенной вычислительной сети.**

Выбор направления исследований. Методы решения задач. В настоящее время высокопроизводительные вычисления являются неотъемлемым звеном процесса решения сложных научных и прикладных задач широкого спектра, которые зачастую существенно различаются своими требованиями к вычислительным системам. Это приводит к разнообразию необходимых программно-аппаратных платформ и коммуникационных сред, а также актуализирует исследования, связанные с интеграцией данных компонентов в единую гетерогенную распределенную вычислительную среду (ГРВС). Управление заданиями в такой среде – нетривиальная проблема.

На уровне ГРВС применяются различные метапланировщики, например, GridWay [1], обеспечивающие распределение заданий между ее узлами, где функционируют системы управления прохождением заданий (СУПЗ). К их числу относятся, например, такие известные зарубежные системы, как PBS (Portable Batch System) [2] и HTCondor (High Throughput Computing with Condor) [3]. Известные российские разработки – система управления прохождением параллельных заданий

(СУПЗ) [4] и система управления заданиями Cleo [5]. Организация взаимодействия между метапланировщиками и СУПЗ, как правило, базируется на использовании компонентов связующего программного обеспечения (СПО), такого как пакет Globus Toolkit [6]. К средствам, реализующим управление вычислениями на уровне приложений, относят AppLeS (Application-Level Scheduling) [7], Nimrod/G [8] и другие системы.

Связующее программного обеспечения является достаточно сложным для применения пользователями ГРВС, т.е. специалистами в своих предметных областях, не обладающими необходимыми навыками системного программирования и администрирования. В этой связи активно разрабатываются системы управления потоками заданий, упоминаемые в зарубежной литературе как WMS (Workflow Management System) [9]. В таких системах вопросы организации взаимодействия с компонентами СПО, метапланировщиками и СУПЗ в процессе управления вычислениями по большей части экранированы от пользователей. В то же время WMS предоставляют пользователям в той или иной степени возможности учета специфики предметной области решаемых задач. К классу WMS относятся: Askalon, Kepler, Pegasus, Taverna, Triana и другие программные комплексы [10].

Анализ возможностей вышеперечисленных систем, а также тенденций развития средств и методов управления вычислениями в ГРВС [11, 12] позволяет сделать вывод о необходимости интеллектуализации процесса управления, как можно более полного учета специфики предметных областей решаемых задач и согласования предпочтений владельцев ресурсов среды с критериями качества выполнения заданий. Актуальным подходом к решению данных проблем является разработка и применение мультиагентных алгоритмов, основанных на самоорганизации агентов [13] в сочетании с элементами экономической теории [14].

В результате решения задачи разработаны новые мультиагентные алгоритмы и технология для эффективного управления заданиями распределенных пакетов прикладных программ (РППП) в процессе решения больших научных и прикладных задач в ГРВС, которая обеспечивает в отличие от известных проблемно-ориентированных сред интеграцию моделей Grid и облачных вычислений. Результаты решения задачи опубликованы в [15-26].

Функционирование разработанных алгоритмов базируется на применении уникальной концептуальной модели [27], агрегирующей знания о специфике решаемых задач РППП и свойствах среды, а также оригинальной системе машинного обучения агентов [22].

Схема управления заданиями представлена на рисунке 1. На основе постановки задачи, сформулированной конечным пользователем РППП на модели ГРВС, пользовательским агентом выполняется построение множества $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ планов решения задачи. Затем агент-организатор объединяет ресурсных агентов в виртуальное сообщество на основе знаний о соответствии классов заданий по выполнению модулей, входящих в планы решения задачи, и ресурсов среды. В виртуальное сообщество включаются агенты, представляющие ресурсы, в которых могут быть выполнены какие-либо модули планов решения задачи. Избрание участниками виртуального сообщества агента-лидера производится в процессе их локальных взаимодействий на основе модифицированного древесного алгоритма с учетом коммуникационной топологии сети агентов.

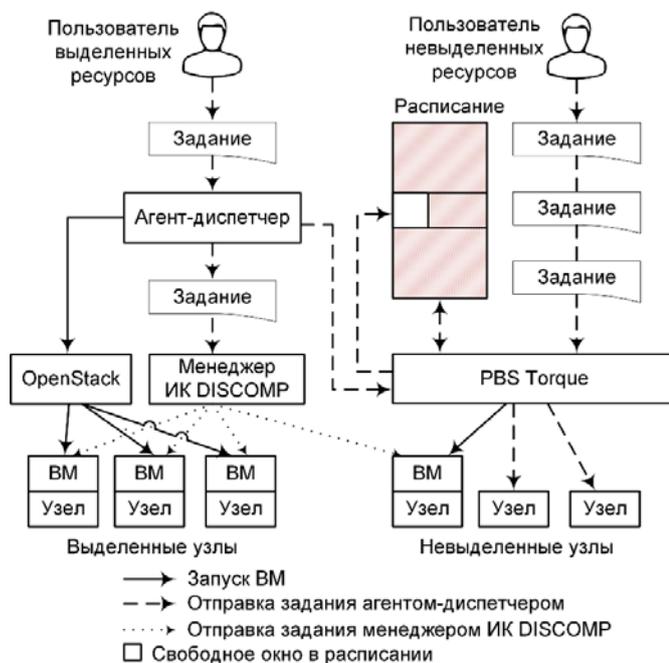


Рисунок 1 – Схема мультиагентного управления заданиями пользователей в гетерогенной распределенной вычислительной среде с применением виртуальных машин

Формирование агентами предложений по выполнению модулей планов решения задачи и определение победителей торгов в рамках тендера реализуется на основе модели однораундового аукциона Викри второй цены [28]. Применение тендера вычислительных работ позволяет использовать помимо их стоимости, являющейся единственным условием в рамках аукциона, дополнительные критерии качества выполнения заданий такие, как время решения задачи, надежность вычислений, безопасность информации и другие ограничения. В случае многовариантных расчетов агенты виртуального сообщества

параллельно выполняют один и тот же модуль, а торги ведутся за право обработки вариантов данных с помощью этого модуля.

Агент-лидер проводит тендер и определяет оптимальный план $p_{opt} \in P$ решения задачи, а также ресурсных агентов (победителей торгов), участвующих в выполнении модулей этого плана. Определение плана и его исполнителей производится на основе многокритериального лексикографического правила выбора с учетом заданных критериев эффективности решения задачи, упорядоченных по степени их значимости.

Выполнение модулей плана p_{opt} в назначенных агентами выделенных ресурсах среды осуществляется средствами инструментальных комплексов DISCOMP или Orlando Tools [21] в асинхронном режиме по готовности данных. Агент-диспетчер запускает необходимое число виртуальных машин (ВМ) с помощью средств платформы OpenStack [29] и передает задание менеджеру вычислительных работ данного комплекса, который затем отправляет задание на запуск модулей вычислительным клиентам, размещенным в ВМ.

Особенностью предложенной схемы управления ресурсами является то, что в случае возникновения очереди заданий в выделенных ресурсах агент-диспетчер направляет задание на запуск ВМ в невыделенные ресурсы центра коллективного пользования при наличии свободных окон в расписании обслуживания заданий системы PBS Torque [30].

Алгоритм формирования виртуального сообщества агентов. Данный алгоритм включает три основных этапа его работы.

- I. *Определение классов модулей задания.* Классы модулей задания определяются агентом-классификатором с использованием разработанной ранее системы классификации заданий.
- II. *Формирование виртуального сообщества агентов.* В виртуальное сообщество вступают агенты, которые представляют ресурсы, соответствующие классам модулей.
- III. *Построение топологии коммуникационной сети агентов.* Топология строится в виде ориентированного дерева $G = \langle V, U \rangle$, где V – множество вершин графа, представляющих вычислительные узлы ГРВС, на которых размещены агенты, U – множество ребер графа, представляющих коммуникационные каналы связи между этими узлами. Дерево G описывается булевой матрицей смежности A размерности $n \times n$, элемент которой $a_{ij} = 1$ означает, что существует дуга (v_i, v_j) , n – число агентов виртуального сообщества.

Процесс построения дерева G включает следующие действия:

- в связном неориентированном графе, представляющем модель коммуникационной среды агентов виртуального сообщества, выбирается начальная вершина, соответствующая одному из агентов и являющаяся наилучшей по заданному критерию качества (показателю надежности, производительности или другой характеристики вычислительного узла агента);
- в соответствии с этим выбором формируется подграф исходного графа в виде дерева, вершины которого взаимно-однозначно соответствуют агентам виртуального сообщества;
- ребра полученного подграфа ориентируются по направлению от начальной вершины по направлению к дочерним вершинам.

Алгоритм выбора лидера. Используется модифицированная версия древесного алгоритма выбора лидера. Функционирование алгоритма характеризуется следующими особенностями:

- алгоритм является модификацией распределенного древесного волнового алгоритма [31];
- любой из агентов, которому соответствует листовая вершина дерева G , может инициировать работу алгоритма, сообщив об этом другим агентам виртуального сообщества;
- агенты взаимодействуют посредством посылки сообщений через коммуникационные каналы;
- коммуникационные протоколы гарантируют невозможность пропажи сообщений из-за ошибок коммуникаций или отката к контрольной точке;
- агенты используют дополнительные служебные сообщения (например, подтверждения о доставке сообщений);
- алгоритм выполняется в фоновом режиме – агенты продолжают решение своих текущих задач при взаимодействии между собой путем обмена сообщениями.

Алгоритм выбора лидера включает три основных этапа его работы.

- I. *Процедура проведения прямой волны.* Формирование агентами a_1, a_2, \dots, a_n своих критериев качества c_1, c_2, \dots, c_n . Отправка сформированной информации агентами, представленными вершинами дерева более низкого уровня, агентам, связанными с ними и представленными вершинами дерева следующего, более высокого уровня.
- II. *Действия агента, представленного корневой вершиной.* Выбор лидера виртуального сообщества агентов:

$$k_l = \arg \max_{i=1,n} \{c_i\},$$

где k_l – это индекс агента-лидера.

III. *Процедура обратной волны.* Рассылка результатов выбора лидера в соответствии с топологией коммуникационной среды агентам виртуального сообщества.

Выбор одного из волновых алгоритмов для реализации выбора лидера виртуального сообщества агентов обусловлен рядом важных свойств, присущих алгоритмам данного класса [31]: завершение работы за конечное число шагов, обеспечение принятия определенного решения, причинно-следственная обусловленность принятого решения всеми участниками процесса. Результаты сравнения оценок сложности различных распределенных волновых алгоритмов по числу сообщений приведены в таблице 1, где m – это число обменов сообщениями алгоритма обхода, на котором базируется волновой алгоритм угасания.

Таблица 1 – Оценка сложности распределенных волновых алгоритмов

| Алгоритм | Топология коммуникационной среды агентов | Оценка сложности алгоритма по числу сообщений |
|----------------------------------|--|---|
| Древесный | Дерево | $2 \times n - 2$ |
| Ченя – Робертса | Кольцо | $O(n \times \log n)$ |
| Петерсона/Долева – Клейва – Роде | | $1,5 \times n \times \log n$ |
| Угасания | Заранее неизвестная | $n \times m$ |
| «Задиры» | топология | $O(n^2)$ |

На основе приведенных в таблице 1 данных можно сделать вывод о преимуществе древесного алгоритма по числу обменов сообщениями в сравнении с другими волновыми алгоритмами. Разработка модифицированной версии древесного алгоритма, приведенного в работе [31], обусловлена тем, что исходный алгоритм не обеспечивает отсутствие коллизий при передаче сообщений между агентами.

Алгоритм распределения вычислительных ресурсов. В рамках данного алгоритма выбор лидера совмещается с проведением тендера вычислительных работ [22]. При проведении прямой волны агенты передают свои ставки вместе с критериями качества.

Агент, представленный корневой вершиной выбирает лидера и определяет победителей тендера. Обратной волной передается информация о лидере и победителях торгов. В результате существенно снижаются накладные расходы на взаимодействие агентов.

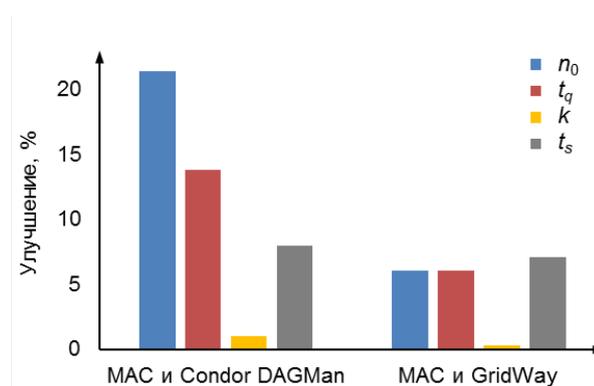
Данный алгоритм включает шесть основных этапов его работы.

- I. *Планирование вычислений.* На основе процедурной или непроцедурной постановки задачи, сформулированной пользователем пакета на модели ГРВС, агентом планирования вычислений выполняется построение плана p решения задачи.
- II. *Формирование виртуального сообщества агентов.* Объединение агентов в виртуальное сообщество осуществляется на основе знаний о соответствии классов заданий и ресурсов ГРВС. Эти знания заносятся в модель ГРВС администраторами среды. В виртуальное сообщество включаются агенты, представляющие ресурсы, в которых могут быть выполнены модули плана p .
- III. *Выбор лидера.* Избрание участниками виртуального сообщества агента координатора производится в процессе их локальных взаимодействий на основе модифицированного древесного алгоритма с учетом коммуникационной топологии сети агентов.
- IV. *Проведение тендера вычислительных работ.* Формирование агентами предложений по выполнению модулей плана p и определение победителей торгов в рамках тендера реализуется на основе модели однораундового аукциона Викри второй цены. Применение тендера вычислительных работ позволяет использовать помимо их стоимости, являющейся единственным условием в рамках аукциона, дополнительные критерии качества выполнения заданий такие, как время решения задачи, надежность вычислений, безопасность информации и другие ограничения. В случае многовариантных расчетов агенты виртуального сообщества параллельно выполняют один и тот же модуль, а торги ведутся за право обработки вариантов входных данных с помощью этого модуля.
- V. *Подведение итогов торгов.* Определение агентов (победителей торгов), участвующих в выполнении модулей плана p , производится на основе правил многокритериального выбора с учетом заданных критериев эффективности решения задачи, упорядоченных по степени их значимости.
- VI. *Процесс вычислений.* Выполнение модулей плана p в назначенных агентами ресурсах осуществляется в асинхронном режиме по готовности данных.

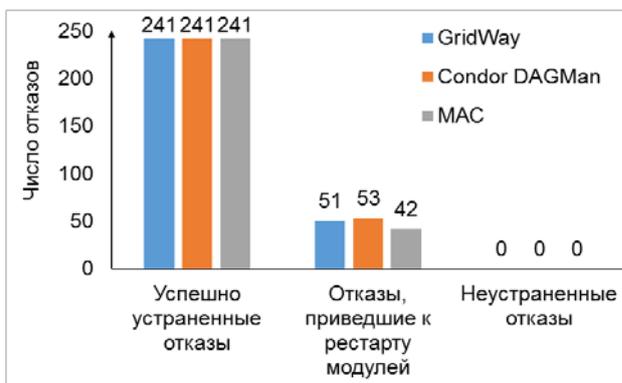
Этапы III-V данного алгоритма совмещены. Это обеспечивает повышение эффективности мультиагентного управления.

Рассмотренные алгоритмы обеспечивают поддержку основных принципов самоорганизации МАС (автономность агентов, возникновение глобального порядка только в процессе простых локальных взаимодействий агентов, наличие эмерджентных свойств в системе, обеспечение отказоустойчивости за счет избыточности информационно-вычислительных и управляющих ресурсов, адаптивность к изменяющимся состояниям среды, иерархичность и масштабируемость системы).

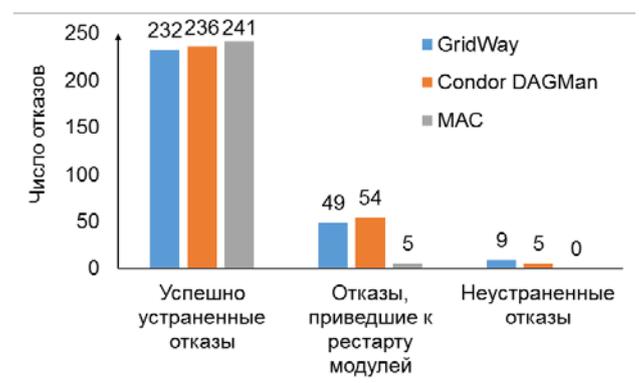
На рисунке 2 приведены результаты сравнения процессов функционирования разработанной МАС с широко известными метапланировщиками GridWay [32] и Condor DAGMan [33]. На рисунке 2.а отражено улучшение показателей эффективности управления под управлением МАС в сравнении с Condor DAGMan и GridWay. На данном рисунке использованы следующие обозначения: n_0 – число заданий с нулевым временем ожидания, t_q – среднее время пребывания задания в очереди, k – коэффициент полезного использования ресурсов ГРВС, t_s – общее время выполнения заданий потока. Рисунки 2.б и 2.в демонстрируют преимущество МАС по сравнению с теми же системами в обеспечении отказоустойчивости к отказам программно-аппаратного обеспечения узлов среды и компонентов систем управления, установленных в этих узлах.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Результаты сравнения процессов функционирования разработанной МАС с метапланировщиками GridWay и Condor DAGMan

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Разработанные алгоритмы, в отличие от известных, базируются на комплексном представлении вычислительных знаний о программных модулях для решения задач в предметных областях и работы с объектами среды, схемных знаний о модульной структуре модели и алгоритмов, продукционных знаний для поддержки принятия решений по выбору оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния среды, знаний о свойствах приложений и их заданий, а также знаний о программно-аппаратной инфраструктуре среды и административных политиках в ее узлах.

Разработанные алгоритмы интегрированы в инструментальные комплексы [21] для создания распределенных пакетов прикладных программ. Применение этих алгоритмов позволило повысить эффективность процесса решения крупномасштабных междисциплинарных задач регулирования транспортных потоков [17], повышения эффективности IP-телефонии [16], исследования топливно-энергетического комплексов с точки зрения обеспечения их энергетической безопасности [21-23], оптимизации складской логистики [19] и анализа эффективности метода мультистарта при поиске глобального минимума многоэкстремальных функций [15, 20]. В частности, решение этих задач позволило совместно со специалистами из смежных предметных областей выявить критически важные объекты газотранспортной сети России и оптимизировать процессы транспортной и складской логистики на крупном хладокомбинате, являющегося вторым по объему единовременного хранения в России от Урала до Дальнего Востока.

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

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием методов организации параллельных и распределенных вычислений, проверкой их адекватности посредством полунатурного и имитационного моделирования [22, 24, 26], а также решением вышеперечисленных научных и прикладных задач в ГРВС.

2) Разработка новых булевых моделей и алгоритмов качественного исследования двоичных динамических систем.

Выбор направления исследований. Методы решения задач и их сравнительная оценка. Спектр приложений двоичных динамических моделей необычайно широк и с каждым годом количество объектов и задач, где требуется их использование, только возрастает. Классическим примером является двоичный синхронный автомат, являющийся моделью многих дискретных устройств в системах управления, вычислительной технике, телемеханике. К современным приложениям двоичных динамических моделей относятся задачи биоинформатики, экономики, социологии и ряда других, казалось бы далеких от применения двузначных переменных, областей. В связи с

этим в существенной степени повышается актуальность разработки новых и совершенствование существующих методов качественного анализа поведения траекторий двоичных динамических систем (ДДС).

В отличие от количественного анализа качественный дает возможность аналитику ответить на вопрос о правильности функционирования системы в типичных для нее ситуациях (выполнении в системе требуемого динамического свойства, представленного в виде некоторой совокупности ограничений на характер поведения траекторий ДДС). Для ДДС, функционирование которых рассматривается на конечном интервале времени, такие ограничения являются булевыми и записываются на языке булевых уравнений или булевых формул с кванторами. Первый тип ограничений приводит к необходимости решения SAT-задачи (задачи булевой выполнимости [34]); второй тип ограничений связан с решением задачи TQBF (проверки истинности квантифицированных булевых формул [35]). Первая задача является типичным представителем класса сложности NP, а вторая задача – класса сложности PSPACE.

Теоретическая возможность использования булевых ограничений (а именно, булевых уравнений) в качественном анализе ДДС впервые была продемонстрирована в работе [36]. Следует однако отметить, что применение этого подхода на практике в то время сдерживалось отсутствием эффективных алгоритмов и программ решения булевых уравнений (особенно с большим числом неизвестных переменных), позволяющих в существенной степени сократить пространство поиска. В последнее десятилетие в результате интенсивных исследований в этой области появилось достаточное количество разнообразных эффективных решателей булевых уравнений (SAT-решателей), использующих современные достижения (новые эвристики, быстрые структуры данных, параллельные вычисления и др.) в решении задачи булевой выполнимости. Аналогичные процессы (но с некоторым запаздыванием) наблюдаются и в области создания все более эффективных алгоритмов и программ решения задачи TQBF. Таким образом, к настоящему времени имеются все необходимые предпосылки систематического развития разрабатываемого коллективом исполнителей метода булевых ограничений [37] в качественном анализе ДДС, его программной реализации и применении в решении научных и прикладных задач.

Кроме метода булевых ограничений, к ДДС применимы и другие методы качественного анализа, к которым относятся дедуктивный анализ, model checking и метод редукции. Каждый из этих методов (включая и метод булевых ограничений) имеет свои ограничения, преимущества и недостатки. Общим недостатком является то, что все

методы носят переборный характер, и проблема сокращения перебора является фундаментальной для этих методов. Важность дедуктивного анализа [38], подразумевающего применение аксиом и правил вывода для доказательства правильности функционирования системы, признается широким кругом специалистов, но это трудоемкий и поэтому редко применяемый метод. В методе model checking [39] в качестве языка спецификации требуемого свойства используется язык темпоральных логик, который непривычен для специалистов по автоматной динамике. Метод редукции [40] связан с построением упрощенной (в определенном смысле) модели исходной системы, исследовании ее свойств и условий переносимости этих свойств в исходную сложную систему. Условия переносимости свойств носят при этом только достаточный характер. Простота идеи метода редукции в качественном анализе ДДС сталкивается с проблемой выбора упрощенной системы, удовлетворяющей всем условиям метода.

Практическое использование метода булевых ограничений для решения задач качественного анализа ДДС включает следующие этапы:

1. Построение модели динамического свойства в виде булевого ограничения того или иного типа, удовлетворяющей логической спецификации свойства и уравнениям динамики двоичной системы.
2. Представление полученной модели в международном формате DIMACS [41] или QDIMACS [42].
3. Запуск эффективного параллельного (распределенного) SAT или TQBF решателя с представленной в нужном формате булевой моделью (в качестве входных данных) для проверки выполнимости динамического свойства ДДС.

Методика решения задачи, поставленной на настоящем этапе НИР, основана на методе булевых ограничений, логике предикатов, методах синтаксического анализа и символических преобразований, методах анализа и синтеза теории ДДС, теории конечных автоматов и параллельных методах решения SAT и TQBF задач.

В результате решения задачи разработаны новые алгоритмы (алгоритм формирования булевой модели свойства и мультиагентный алгоритм проверки выполнимости свойства) и булевы модели для качественного исследования динамических свойств ДДС. Результаты исследования опубликованы в работах [37, 43-49].

Математическая модель ДДС. Рассматриваются ДДС, векторно-матричное уравнение которых имеет вид

$$x^t = F(x^{t-1}, u^{t-1}), \quad (1)$$

где $x \in B^n$ – вектор состояния, $B = \{0,1\}$, n – размерность вектора состояния; $u \in B^m$ – вектор входа (управления), m – размерность вектора входа; $t \in T = \{1,2,\dots,k\}$ – дискретное время (номер такта); $F(x)$ – векторная функция алгебры логики, называемая функцией переходов ($F: B^n \times B^m \rightarrow B^n$). Для каждого состояния $x^0 \in B^n$ и конечной последовательности $u(t) = (u^0, u^1, \dots, u^{k-1})$ состояний вектора управления ($u^t \in B^m$) определим траекторию $x(t, x^0, u(t))$ системы (1) как конечную последовательность состояний x^0, x^1, \dots, x^k из множества B^n . Величина k в определении множества T предполагается наперед заданной постоянной. Такое ограничение является вполне естественным, так как при качественном анализе поведения траекторий ДДС практический интерес представляет вопрос о том, что можно сказать о выполнимости какого-либо динамического свойства при фиксированном, не слишком большом k . Выбор величины k в каждом конкретном случае осуществляется исходя из априорных сведений о длительности протекания процессов в моделируемой дискретной системе.

Известно [36], что система булевых уравнений (1) эквивалентна одному булевому уравнению вида

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) = \bigvee_{i=1}^k \bigvee_{i=1}^n (x_i^t \oplus F_i(x^{t-1}, u^{t-1})) = 0, \quad (2)$$

где x_i^t – i -тая компонента вектора x^t ; \oplus – сложение по модулю 2; F_i – i -тая компонента вектора F . При $k=1$ (рассматриваются только одношаговые переходы) уравнение (2) приобретает вид

$$\Phi_1(x^0, x^1, u^0) = \bigvee_{i=1}^n (x_i^1 \oplus F_i(x^0, u^0)) = 0. \quad (3)$$

Решения этого уравнения определяют нагруженный направленный граф, состоящий из 2^n вершин, отмеченных одним из 2^n состояний множества X . Вершины x^0 и x^1 графа соединены дугой, помеченной состоянием входа $u \in U$ и направленной от состояния x^0 к состоянию x^1 . Такой граф в теории двоичных автоматов называется диаграммой переходов. Представление поведения ДДС в виде диаграммы переходов весьма наглядно (например, при построении траекторий и исследовании их свойств), но практически реализуемо лишь для небольших размерностей n и m двоичных векторов $x \in B^n$ и $u \in B^m$.

С учетом (3) уравнение (2) запишем

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) = \bigvee_{t=1}^k \Phi_1(x^{t-1}, x^t, u^{t-1}). \quad (4)$$

Языковые средства спецификации динамических свойств. Наиболее удобно задавать спецификацию динамического свойства на языке формальной логики. Следуя работе [40] обозначим через $X^0 \in B^n$, $X^1 \in B^n$, $X^* \in B^n$ – множества начальных, допустимых и целевых состояний.

Основными синтаксическими элементами логической формулы динамического свойства являются: 1) предметные переменные (компоненты векторов x^0, x^1, \dots, x^k , время t); 2) ограниченные кванторы существования и всеобщности; 3) логические связки \vee, \wedge ; 4) заключительные формулы. Заключительная формула представляет утверждение о принадлежности некоторых состояний множества траекторий $x(t, x^0)$ ($x^0 \in X^0$) оценочным множествам X^* и X^1 . Следует отметить, что использование ограниченных кванторов существования и всеобщности обеспечивает привычный для специалиста по динамике вид записи динамического свойства.

В процессе построения булевой модели свойства для системы (1) ограниченные кванторы заменяются на обычные согласно следующим определениям:

$$\forall(y : A(y))B(y) \Leftrightarrow \forall y(A(y) \rightarrow B(y)),$$

$$\exists(y : A(y))B(y) \Leftrightarrow \exists y(A(y) \wedge B(y)),$$

где $A(y)$ – предикат, ограничивающий значение переменной y .

В силу конечности области изменения переменной t , ограниченные кванторы существования и всеобщности по этой переменной заменяются на равносильные формулы, не содержащие кванторов

$$\forall(t : t \in T)A(t) = \bigwedge_{t=1}^k A(t),$$

$$\exists(t : t \in T)A(t) = \bigvee_{t=1}^k A(t).$$

При построении булевых моделей элементы множеств X^0, X^1, X^* определяются соответственно нулями следующих булевых уравнений $G^0(x) = 0, G^1(x) = 0, G^*(x) = 0$ или характеристическими функциями этих множеств $\overline{G^0(x)}, \overline{G^1(x)}, \overline{G^*(x)}$.

Алгоритм формирования булевой модели свойства по логической формуле спецификации свойства и уравнениям динамики ДДС [37, 47-48]. Основой построения булевой модели спецификации динамического свойства служит получаемая для заданной системы (1) булева формула одношагового перехода $\Phi_1(x^0, x^1, u^0)$ уравнения (3). Основные шаги алгоритма: конвертирование функции F системы (1) из входного формата ([47]) во внутреннее представление; формирование левой части уравнения $x^1 \oplus F(x^0, u^0) = 0$; получение (с помощью символьных преобразований, с использованием таблицы истинности или преобразования из АНФ в КНФ – в зависимости от структуры левой части уравнения) требуемого выходного формата; упрощение функции одношагового перехода Φ_1 ; формирование на ее основе функции k -шагового перехода Φ_k уравнения (2) по формуле (4); построение булевой модели динамического свойства в виде булева ограничения (булева уравнения или квантифицированной булевой формулы), удовлетворяющего логической спецификации свойства и уравнениям динамики системы.

Мультиагентный алгоритм проверки выполнимости свойства. Высокая вычислительная сложность SAT и TQBF задач актуализирует разработку программных средств ее решения с использованием технологий параллельных и распределенных вычислений и применения сервис-ориентированного подхода для обеспечения прозрачного доступа конечного пользователя к ресурсам высокопроизводительных вычислительных сред. В демонстрационном прототипе распределенного решателя задач качественного исследования ДДС [44, 45] используется агентский, ориентированный на прикладные микросервисы, способ организации вычислений на основе прямых семантических взаимодействий агентов решателя. Агенту решателя делегируются права на запуск прикладного модуля. В зависимости от входных данных, заданных пользователем с помощью непроцедурной постановки задачи «Дано-Найти», формируется активная группа агентов решателя с помощью логического вывода на распределенной базе знаний KB (Knowledge Base), являющейся представлением вычислительной модели предметной области.

Разработаны булевы модели для решения следующих задач качественного исследования ДДС:

- синтез управления в ДДС для общего случая описания динамики управляемого объекта, заданного уравнением (1) [43];
- синтез линейного регулятора для частного случая описания динамики управляемого объекта, заданного уравнениями $x^t = A^c x^{t-1} = (A \oplus BP)x^{t-1}$, $u^{t-1} = Px^{t-1}$, где A , B и P – двоичные матрицы соответственно состояния, управления и параметров регулятора [46];
- проверка выполнимости свойств типа достижимости [37, 47, 48].

Принцип действия разработанных объектов. Продемонстрируем применение разработанных алгоритмов и моделей к организации процесса децентрализованного управления вычислениями на основе микросервисов и сетей агентов на важной с практической точки зрения и трудной в вычислительном плане задаче синтеза управления в ДДС, векторно-матричное уравнение которой имеет вид (1).

Пусть заданы два состояния $c^0, c^* \in B^n$. Назовем c^0 начальным состоянием, c^* – конечным (целевым) состоянием. Необходимо синтезировать такое управление $u(t)$ (если оно существует), которое переводит систему (1) из начального состояния $x^0 = c^0$ в конечное состояние $x^k = c^*$ за k тактов, т.е. c^* достижимо из состояния c^0 за k тактов. Следует отметить, что эта задача в настоящее время относится к числу важнейших задач [50] исследования динамики поведения генных регуляторных сетей, представленных дискретной по времени и состоянию моделью (1). С теоретической точки зрения модель (1) является существенно нелинейной и к ней неприменимы существующие методы теории управления. С практической точки зрения полученное управление может быть полезно для создания лекарственных средств для лечения заболеваний.

В силу существенной нелинейности системы (1) задачу синтеза управления $u(t)$ сформулируем как задачу булевой выполнимости. Воспользовавшись формулами одношагового перехода (3) и k -шагового перехода (4) с учетом начального ($x^0 = c^0$) и конечного ($x^k = c^*$) состояний получим булево уравнение

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \Big|_{\substack{x^0=c^0 \\ x^k=c^*}} = 0. \quad (5)$$

Необходимое управление $u(t) = (u^0, u^1, \dots, u^{k-1})$ (если оно существует) является решением этого уравнения.

Представим условия $x^0 = c^0$ и $x^k = c^*$ в форме булевых уравнений. Тогда (5) примет вид

$$\bigvee_{i=1}^n (x_i^0 \wedge \bar{c}_i \vee \bar{x}_i^0 \wedge c_i^0) \vee (\bigvee_{i=1}^n (x_i^k \wedge \bar{c}_i^* \vee \bar{x}_i^k \wedge c_i^*)) \vee \Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) = 0$$

где нижний индекс i обозначает номер компоненты векторов x^0, c^0, x^k, c^* .

В иллюстративном примере рассматриваемая задача решается для систем (1), которые заданы в формате «.cnet» [51]. Пусть длина управляющей последовательности не превышает пяти ($k \leq 5$). Для системы из [50], динамика которой представлена уравнениями вида

$$\begin{aligned} x_1^t &= \overline{u_1^{t-1}} \\ x_2^t &= x_1^{t-1} \wedge u_2^{t-1}, \\ x_3^t &= (x_1^{t-1} \vee x_2^{t-1}) \end{aligned}$$

требуется найти управляющие последовательности длиной $k = 2$ и $k = 3$ при $c^0 = (0,0,0)$ и $c^* = (0,1,1)$.

Сеть агентов распределенного решателя, созданного на основе описанных выше алгоритмов, показана на рисунке 3. Решить задачу T на распределенной базе знаний КВ означает, что на основании отношений, зафиксированных в локальных базах агентов, нужно найти минимально необходимое для ее решения множество $M^* \subseteq M$ модулей, установленных в разных узлах вычислительного поля [43, 52], и организовать децентрализованное управление их исполнением так, чтобы получить значения параметров из множества $B_0 \subset P$ по заданным значениям параметров из множества $A_0 \subset P$, где P – множество параметров КВ.

При постановке задачи $T = (\{VFcnet, C0, CN\}, \{CSL2, CSL4\})$ формируется самоорганизующаяся активная группа агентов $Ag^* \subset Ag$ ($Ag^* = \{Ag_1, Ag_2, Ag_4, Ag_5, Ag_8\}$) в результате распределенного логического вывода на модели КВ. Множество $M^* \subset M$ включает следующие модули:

$$M^* = \{M1, BF1conv, CSL2solv, CSL3solv, M8\}.$$

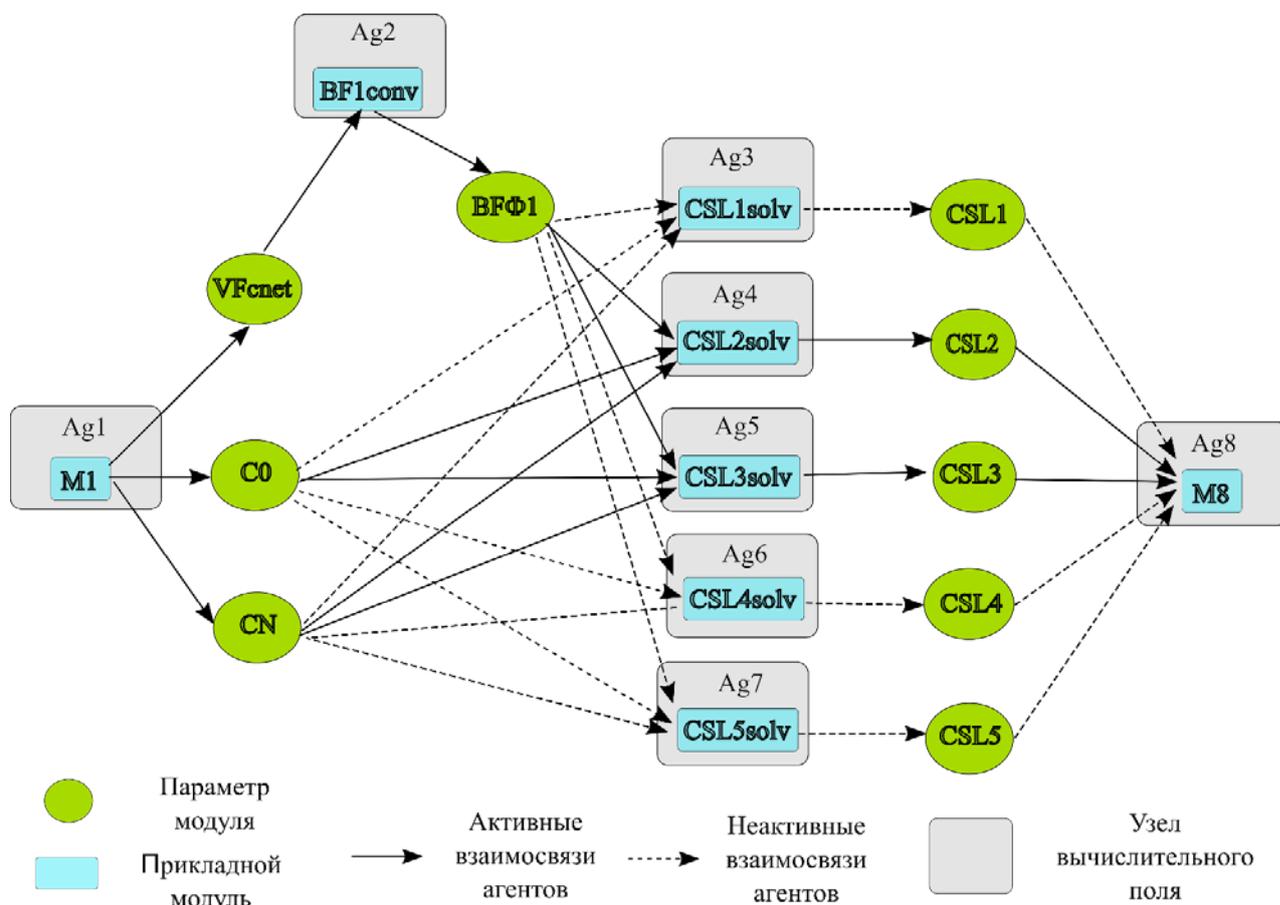


Рисунок 3 – Распределенный решатель для задачи синтеза управления в ДДС

Множество P включает следующие параметры: BFΦ1 – функция Φ_1 из (3); C0 – начальное состояние; CN – конечное состояние; CSL1, CSL2, ..., CSL5 – управляющие последовательности $u(t)$ соответственно для $k=1, k=2, \dots, k=5$; VFcnet – функция F в формате «.cnet».

Модули множества M^* предназначены для следующих действий. Модуль M1 отправляет вектор-функцию F в формате «.cnet» (VFcnet), модуль BF1conv преобразует F в булеву функцию Φ_1 из (3), модули CSL2solv и CSL3solv конструируют булевы функции Φ_2 и Φ_3 для $k=2$ и $k=3$, затем решают соответствующие SAT задачи для уравнений (5). Модуль M8 получает результаты, которые являются управляющими последовательностями заданной длины k (параметры CSL k) в случае, если задача выполнима, или выдает ответ «управления нет» в противном случае. В иллюстративном примере при заданных C0 и CN для $k=2$ управление не найдено, для $k=3$ построена следующая управляющая последовательность длины 3:

$$u(t) = (u_1^0 = 0, u_2^0 = 0, u_1^1 = 0, u_2^1 = 1, u_1^2 = 1, u_2^2 = 1).$$

Проведено сравнение вычислительных затрат решения задачи T на вычислительной модели КВ с использованием централизованной и децентрализованной схем управления запуском модулей. Время выполнения вычислительных модулей одинаково для обоих способов управления, тогда как накладные расходы на межмодульные коммуникации посредством передачи сообщений при использовании сети агентов в среднем в два раза меньше, чем при использовании центрального узла для управления решением задачи.

Распределенный решатель протестирован так же на примерах, описанных в [50, 51] и случайных сгенерированных примерах большей размерности. Экспериментальное решение задач качественного исследования ДДС было проведено с использованием разработанных исполнителями проекта программных средств [49, 53] и вычислительных ресурсов [54], и подтвердило эффективность представленного подхода.

Обобщение и оценка полученных результатов. Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. На основе логического метода булевых ограничений разработаны алгоритмы формирования булевой модели и проверки выполнимости динамического свойства ДДС. Разработаны новые булевы модели для решения задач качественного анализа ДДС. Анализ процессов построения булевых моделей свойств и проверки выполнимости свойств позволяет разработать единую стандартизованную технологию решения задач качественного анализа на основе метода булевых ограничений.

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Уникальность разработанных на основе метода булевых ограничений моделей заключается в интеграции в одной модели как описания свойства, так и уравнений динамики конкретного объекта. Сведение решения задач качественного анализа к решению SAT и 2QBF задач допускает естественное распараллеливание по данным и обеспечивает высокую масштабируемость при увеличении размерности задачи. Разработанный подход имеет большое практическое значение в силу широкого использования ДДС в качестве моделей как в теоретических, так и прикладных исследованиях.

Достоверность полученных результатов подтверждена вычислительными экспериментами при решении задач качественного исследования для автономных ДДС [37], неавтономных существенно нелинейных ДДС [43] и ДДС с аддитивным входением управляющих воздействий [46].

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 2018 году:

1) Разработать спецификацию логического языка программирования: формальное описание грамматики языка; описание семантики языковых конструкций для нехорновской системы логического программирования.

2) Разработать алгоритмы управления группировкой автономных подводных роботов, обеспечивающих движение по заданному криволинейному пути с сохранением желаемой геометрической конфигурации;

3) Разработать расширенную модель групповой миссии, включающую в себя новые сущности, ограничения и правила, а также эволюционный алгоритм маршрутизации с новыми дополнительными эвристиками для повышения эффективности групповой работы в условиях высокой динамики изменения состава действующей группировки.

4) Разработать эффективные способы стабилизации положения равновесия нелинейных механических систем, описываемых уравнениями Лагранжа второго рода, при измерении только части обобщенных координат и без построения наблюдателя для полного вектора состояния.

Выбор направления исследований обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

Характеристика задач и результаты исследований:

1) Разработка спецификации логического языка программирования: формальное описание грамматики языка; описание семантики языковых конструкций для нехорновской системы логического программирования.

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. Разработано формальное описание грамматики языка ПОФ как языка для логического программирования. В отличие от формального математического описания исчисления, данный язык хорошо приспособлен для программирования на компьютере. Введены удобные конструкции описания формулы, в частности обеспечивающие возможность декларировать формулы и термы с последующим использованием ссылок на них. Кроме того, в грамматике учтены ограничения, которые позволяют использовать исчисление ПОФ для реализации в виде системы логического программирования.

Грамматика в форме Бэкуса-Наура.

%Слово, начинающееся с маленькой буквы

LOWER_WORD: /[a-z][a-zA-Z0-9_]*/

%Слово, начинающееся с большой буквы

UPPER_WORD: /[A-Z][a-zA-Z0-9_]*/

%Любой текст взятый в одинарные кавычки

SINGLE_QUOTED: /['](\\|\\\\|'|\^|\\\\|)+[']/

%Число

NUMBER: /[+-]?[0-9]+([v][0-9]+)?([.][0-9]+)?([eE][+-][0-9]+)?/

%Слово начинающееся со знака "#". Используется для обозначения ссылки на ранее объявленный объект (далее просто "ссылка")

sharp_word: "#" (LOWER_WORD | UPPER_WORD)

%Переменная – это любое слово начинающееся с большой буквы

variable: UPPER_WORD

%Функтор – или слово, начинающееся с маленькой буквы, или текст взятый в одинарные кавычки или число

functor: LOWER_WORD | SINGLE_QUOTED | NUMBER

%Список термов

term_list: (term ",")* term

%Терм – это переменная или константа (функтор) или функция, то есть функтор и взятый в скобки список термов

term: variable | functor ("(" term_list ")")?

%Конъюнкт – это непустой список термов или ссылок

conjunct: ((term | sharp_word) ",")* (term | sharp_word)

%Непустой список переменных

var_list: ((variable | sharp_word) ",")* (variable | sharp_word)

%Непустой Список экзистенциальных ПОФ или ссылок.

epcf_list: ((epcf | sharp_word) ",")* (epcf | sharp_word)

```

%Непустой список универсальных ПОФ или ссылок.
apcf_list: ((apcf | goal | sharp_word) ",")* (apcf | goal | sharp_word)

%Объявление термина
def_term: sharp_word "=" term

%Объявление универсальной ПОФ
def_apcf: sharp_word "=" apcf

%Объявление экзистенциальной ПОФ
def_epcf: sharp_word "=" epcf

%Объявление целевого вопроса
def_goal: sharp_word "=" goal

def: def_term | def_apcf | def_epcf | def_goal

%Универсальная ПОФ
apcf: "?" "[" (var_list)? "]" "[" (conjunct)? "]" ("{" epcf_list "}")

%Экзистенциальная ПОФ
epcf: "!" "[" (var_list)? "]" "[" (conjunct)? "]" ("{" apcf_list "}")

%Целевой вопрос. Это универсальная ПОФ, без консеквента
goal: "?" "[" (var_list)? "]" "[" (conjunct)? "]"

%Программа – это список деклараций и список экзистенциальных по-формул (баз)
programm: def* epcf_list

Пример программы вычисляющей ряд чисел Фибоначчи
#F1 = F(1,1)
#F2 = F(2,1)
#Goal = ![X][F(10,X)]

```

```

?[][#F1,#F2]{
    ![]X,Y,N[]F(N,X),F(+N,1),Y[]{}
        ?[]F(+N,2),+(X,Y)[]
    },
    #Goal
}

```

Архитектура разрабатываемой на основе построенной грамматики системы подразумевает использование среды исполнения программ, в основе которой лежит движок логического вывода для исчисления ПОФ. Для реализации движка использован системный язык программирования Rust, что позволяет использовать среду исполнения на разных операционных системах и устройствах. Кроме того, данная система подразумевает интерфейс взаимодействия с внешними приложениями, что позволяет использовать ее как часть более сложного комплекса, в нашем случае в качестве верхнего уровня управления группами роботов.

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-резольюции. Использование такого подхода позволяет гарантировано 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 записывается следующим образом: “ $\sim a_1 \vee \dots \vee \sim a_n \vee a_0$ ”, на языке Пролога: “ $a_0:-a_1,\dots,a_n$ ”. Читается как “из a_1 и \dots 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 том числе в процедурном стиле, и не использовать терминологию связанную с АДТ.

Но 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 необитаемых подводных аппаратов (АНПА) как мультиагентной системы.

Достоверность полученных результатов может быть проверена использованием разрабатываемого языка для планирования действий на верхнем уровне иерархической системы управления группы автономных подводных роботов [55], а также расширением возможностей при формализации и проверке свойств дискретно-событийных систем на основе исчисления ПОФ [56, 57].

2) Разработка алгоритмов управления группировкой автономных подводных роботов, обеспечивающих движение по заданному криволинейному пути с сохранением желаемой геометрической конфигурации.

Выбор направления исследований. Методы решения задач. Задача управления строем мобильных роботов при движении вдоль заданной траектории, в англоязычной литературе называемая Cooperative Path-Following (CPF), является традиционной для робототехнических приложений и активно исследуется в литературе [58, 59], в том числе для группировок автономных подводных роботов (АПР) [59, 60, 61]. Традиционные подходы к ее решению заключаются в разработке двухуровневой системы управления, где нижний уровень обеспечивает движение АПР вдоль заданной для него траектории, а верхний уровень ответственен за согласование параметров движения роботов с целью поддержания заданной геометрической конфигурации группы в процессе движения. В

рамках реализации проекта в 2018 году была исследована постановка задачи CPF, в которой только лидер группы имеет информацию о пути следования, а остальные участники, используя схему «лидер-ведомый» [62], должны, управляя собственным движением, удерживать заданное положение относительно своих лидеров [63]. В отличие от известных постановок, в рассматриваемой постановке в комплексе учитываются погрешности измерений и ограничения на ресурсы управления роботом. Для поддержания строя при выполнении сложных маневров предложены специальные механизмы адаптации, обеспечивающие подстройку скорости движения группы под текущее значение показателя кривизны отслеживаемого пути. Предложены цифровые алгоритмы управления роботами группы. С использованием вычислительной технологии для анализа и синтеза нелинейных цифровых систем управления [64] проведены тестовые расчеты для группы из 4 АПР. Для синтеза регуляторов использовалась упрощенная нестационарная модель относительного движения роботов и метод адаптивного управления на основе составления таблицы коэффициентов управления, определяемых для каждой области разбиения пространства допустимых значений нестационарных параметров модели [65].

Модель АПР. Рассматривается группа малоприводных АПР, движение которых описывается следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi_B) - v \sin(\psi_B), & \mathbf{F} &= m_u \dot{u} + d_u, \\ \dot{y} &= u \sin(\psi_B) + v \cos(\psi_B), & 0 &= m_v \dot{v} + m_{ur} u r + d_v, \\ \dot{\psi}_B &= r, & \mathbf{G} &= m_r \dot{r} + d_r. \end{aligned} \quad (6)$$

где x, y – координаты робота в глобальной системе координат, ψ_B – угол рыскания, u, v – продольная и поперечная скорости, r – угловая скорость рыскания; $m_u = m + \Delta m_u$, $m_v = m + \Delta m_v$, $m_r = I_z + \Delta m_r$, m, I_z – номинальные значения массы и момента инерции относительно вертикальной оси АПР; \mathbf{F}, \mathbf{G} – управляющие сила и момент, d_u, d_v, d_r – различного рода возмущения.

Постановка задачи. Предполагается, что группа организована по схеме «лидер-ведомый», и имеется АПР, который не является ведомым ни для какого другого АПР, называемый лидером группы. Задача лидера заключается в слежении за материальной точкой, движущейся вдоль заданной кривой и называемой виртуальной целью. Остальные роботы группы как ведомые должны в процессе движения удерживать заданное положение относительно своих лидеров. Курс группы ψ_d , ее скорость u_d , а также другие параметры, включая $r_d = \dot{\psi}_d$, \dot{u}_d и \dot{r}_d , определяются законом управления виртуальной

цели. Можно показать, что динамика пары «лидер-ведомый» в подвижной, связанной с виртуальной целью системе координат, может быть представлена уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{s}_e &= -v_{ll} \cos(\psi_l) + r_d y_e + v_{lf} \cos(\psi_f), \\ \dot{y}_e &= -v_{ll} \sin(\psi_l) - r_d s_e + v_{lf} \sin(\psi_f), \\ \dot{\psi}_f &= r_f + \dot{\beta}_f - r_d.\end{aligned}$$

Здесь нижний индекс $l(f)$ соответствует лидеру (ведомому), $\beta = \arctan(v/u)$ – угол скольжения, $v_l = (u^2 + v^2)^{1/2}$ – модуль вектора скорости, $\psi = \psi_B + \beta - \psi_d$. Относительные координаты (s_e, y_e) определяются соотношениями

$$\begin{bmatrix} s_e \\ y_e \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_f - x_l \\ y_f - y_l \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \cos \psi_d & \sin \psi_d \\ -\sin \psi_d & \cos \psi_d \end{bmatrix},$$

где (x_l, y_l) , (x_f, y_f) – глобальные координаты лидера и ведомого, соответственно.

Пусть желаемое положение ведомого относительно лидера в координатах (s_e, y_e) задано вектором (s_e^*, y_e^*) . Заметим, что для лидера группы, который является ведомым в паре с виртуальной целью, $s_e^* = 0$ и $y_e^* = 0$.

Задача управления строем АПР при движении вдоль заданной траектории может быть сформулирована следующим образом: определить законы управления для F и G всех АПР группы, действующих как ведомые, а также закон управления для скорости виртуальной цели u_d , обеспечивающие

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |s_e(t) - s_e^*| \leq s_e^\infty, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |y_e(t) - y_e^*| \leq y_e^\infty,$$

где положительные постоянные s_e^∞ , y_e^∞ определяют предельные ошибки стабилизации положения ведомого относительно лидера.

Законы управления. Очевидно, что для обеспечения сохранения формации группы при выполнении сложных маневров необходимо подстраивать скорость ее движения, задаваемую виртуальной целью, под текущее значение показателя кривизны пути, а именно: притормаживать при совершении поворотов и разгоняться на прямых участках. Построены законы управления, обеспечивающие такое поведение цели:

$$\begin{cases} \dot{u}_d = k_d(u_d(t) - u_d^*(t)), & u_d^*(t) = \bar{u}_d + (\underline{u}_d - \bar{u}_d) |c_c(t)| / \bar{c}_c, \\ \dot{\psi}_d = c_c(t)u_d, \end{cases}$$

где \bar{u}_d , \underline{u}_d – нижняя и верхняя граница диапазона изменения скорости u_d ; c_c – кривизна кривой, \bar{c}_c – ограничения на кривизну ($|c_c(t)| \leq \bar{c}_c$).

Построены цифровые законы управления ведомыми в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t) &= \mathbf{F}_c(t_k) + \mathbf{F}_s(t_k), \quad \mathbf{G}(t) = \mathbf{G}_c(t_k) + \mathbf{G}_s(t_k), \quad t \in T_k @ [t_k, t_{k+1}), \quad t_k = kh, \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \mathbf{F}_c(t_k) &= d_u(t_k) + m_u(\hat{v}_{ffk}^* \cos \beta(t_k) - v_{ff}(t_k) \dot{\beta}(t_k) \sin \beta(t_k)), \quad \mathbf{G}_c(t_k) = d_r(t_k) + m_r(\hat{r}_{dk} - \ddot{\beta}(t_k)), \\ \mathbf{F}_s(t_k) &= \text{sat}(k_1 \Delta \hat{s}_{e,k-1} + k_2 \Delta \hat{v}_{ff,k-1} + k_3 z_k^s, \bar{\mathbf{F}}_s), \quad \mathbf{G}_s = \text{sat}(k_4 \Delta \hat{y}_{e,k-1} + k_5 \Delta \hat{\psi}_{f,k-1} + k_6 \Delta \hat{r}_{f,k-1} + k_7 z_k^y, \bar{\mathbf{G}}_s), \\ z_k^s &= z_{k-1}^s + h \hat{s}_{e,k-1}, \quad z_k^y = z_{k-1}^y + h \hat{y}_{e,k-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где h – период управления (общий для всех АПР группы); \mathbf{F}_c , \mathbf{G}_c – слагаемые управления поступательным и вращательным движением АПР, призванные парировать возмущения d_u , d_r в уравнении (6), компенсировать боковые смещения и отслеживать изменения курса и скорости группы; \mathbf{F}_s , \mathbf{G}_s – стабилизирующие составляющие управления, $\bar{\mathbf{F}}_s$, $\bar{\mathbf{G}}_s$ – ресурсы управления, выделенные на стабилизацию, $\text{sat}(\sigma, \bar{\sigma}) = \text{sign}(\sigma) \min(|\sigma|, \bar{\sigma})$ – функция типа «насыщение»; $\Delta \hat{s}_{e,k-1}$, $\Delta \hat{y}_{e,k-1}$, $\Delta \hat{\psi}_{f,k-1}$, $\Delta \hat{v}_{ff,k-1}$, $\Delta \hat{r}_{f,k-1}$ оценки переменных $\Delta s_e = s_e - s_e^*$, $\Delta y_e = y_e - y_e^*$, $\Delta \psi_f = \psi_f - \psi_f^*$, $\Delta v_{ff} = v_{ff} - v_{ff}^*$, $\Delta r_f = r_f + \dot{\beta} - r_d - \dot{\psi}_f^*$ для момента времени t_{k-1} ; \hat{r}_{dk} , \hat{v}_{ffk}^* оценки производных \dot{r}_d и \dot{v}_{ff}^* , вычисленные на основе данных, полученных от лидера в момент t_k ; $v_{ff}^*(t)$, $\dot{v}_{ff}^*(t)$, $\psi_f^*(t)$, $\dot{\psi}_f^*(t)$ – некоторые параметры желаемого движения лидера в формации, также вычисляемые на основе информации от лидера.

Для апробации предложенных законов управления проведены численные расчеты для группировки крупногабаритных АПР с $m = 2234.5$ кг и $I_z = 2000$ Нм², равномерно распределенных по окружности радиуса 7 м. В расчетах период управления (общий для всех АПР) $h = 0.2$ с. Параметры k_i в законах управления (7) синтезированы с использованием сублинейных векторных функций Ляпунова [64]. Результаты численного моделирования движения такой группы представлены на рисунках 4 и 5. На рисунке 4

приведены траектории АПР при движении вдоль пути, представляющей часть синусоиды, а на рисунке 5 – соответствующие этим траекториям графики ошибок стабилизации ведомых относительно своих лидеров в координатах (s_e, y_e) , а также скорости поступательного движения роботов.

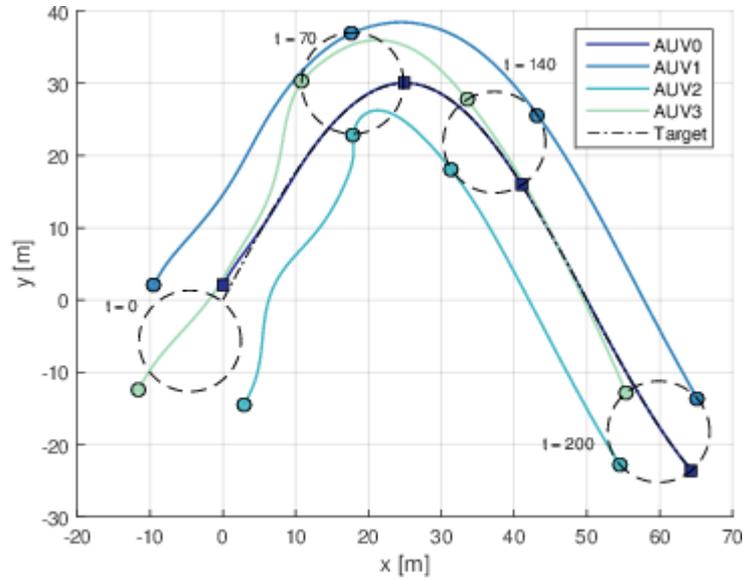


Рисунок 4 – Траектория формации

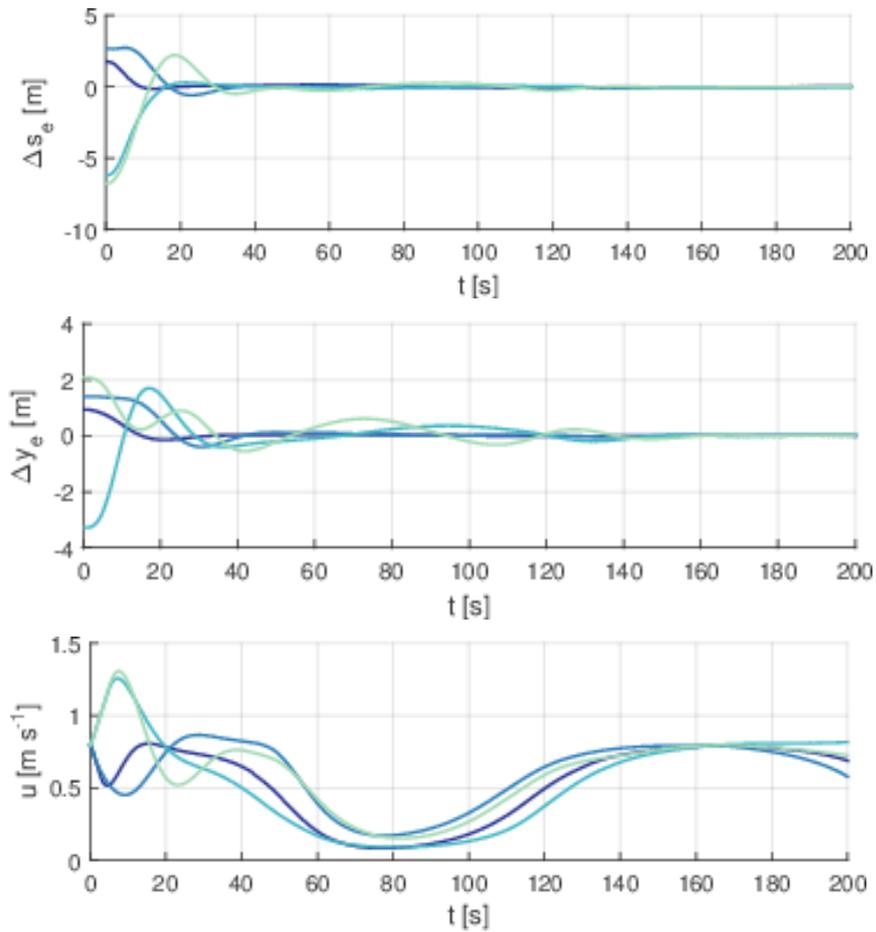


Рисунок 5 – Изменение ошибок стабилизации и скорости АПР

Разработанный алгоритм отслеживания траектории использован при разработке двухуровневой системы управления группой АПР в миссии по обследованию придонной области [66, 67].

Обобщение и оценка полученных результатов. Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. Исследована новая постановка задачи управления группой роботов при движении вдоль заданного криволинейного пути, учитывающая многие факторы неопределенности и возмущений, присущие реальной подводной среде. Предложены законы цифрового управления строем АПР, использующие простой механизм обмена данными между АПР на основе организации регулярных сеансов связи, а также механизм адаптации скорости движения группы под текущее значение показателя кривизны отслеживаемого пути.

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Разработанные цифровые алгоритмы управления группой АПР в задаче отслеживания криволинейного пути в отличие от известных в литературе в комплексе учитывают погрешности измерений, их дискретность по времени, ограничения на ресурсы управления, неопределенности инерционных параметров АПР, а также возможные изменения в траектории и скорости движения группы. Кроме того, используемый механизм адаптации скорости группы к кривизне отслеживаемого пути обеспечивает сохранение заданной конфигурации при выполнении сложных групповых маневров. Важно, что в предлагаемом решении разработка системы управления группой АПР не завершается выделением областей значений для параметров законов управления, допустимых с точки зрения решения рассматриваемой задачи, как это сделано в большинстве известных работ, а предоставляется возможность определять параметры по явным алгоритмам с использованием сублинейных векторных функций Ляпунова. Также стоит отметить, что разработанные законы управления не требуют непрерывного измерения параметров движения АПР и значительных вычислительных ресурсов, что упрощает его реализацию на борту.

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

3) Развитие методов распределения заданий и групповой маршрутизации гетерогенной группы мобильных роботов для задач выполнения широкомасштабных многоцелевых миссий большой длительности,

подразумевающих необходимость периодического пополнения роботами энергетического запаса аккумуляторных батарей.

Выбор направления исследований. Методы решения задач и их сравнительная оценка. Организация совместной работы группы подводных роботов (АПР) в динамической подводной среде является сложным и нетривиальным процессом: заданный набор задач должен быть выполнен в результате коллективных действий нескольких аппаратов при действующих ограничениях и в условиях изменяющейся внешней обстановки. Разработка и развитие таких автономных многокомпонентных систем напрямую зависит от надежности и эффективности реализации децентрализованного планирования и маршрутизации [68]. Таким образом, на первый план выходит именно эффективная координация внутри сети АПР, в том числе блок системы группового управления, который отвечает за распределение заданий между всеми роботами и планирование индивидуальных маршрутов.

В общем случае, задача распределения целей и планирования маршрутов для группы АПР представляет собой вариацию задачи маршрутизации транспорта (*ЗМТ*) со специализированными пространственно-временными ограничениями, накладываемыми особенностями подводных операций, неопределенной природой динамической среды, а также неточностью измерительных приборов. Многие виды подводных задач, такие как патрулирование, охрана, взятие проб, проведение замеров и др., требуют для своего выполнения не разового проведения соответствующих работ в заданных областях акватории, а регулярной серии таких инспекций роботами группы [69]. При этом, выполнение заданий может подразумевать не только наличие требований к периодичности инспекций, но и существование других, дополнительных условий и ограничений (технических, количественных и т.д.), накладываемых как на возможности отдельных АПР, так и в целом на работу всей группы. Такие задачи маршрутизации, объединяющие в себе целый спектр различных требований и ограничений, в современной литературе принято относить к классу много-атрибутных задач маршрутизации (*multi-attribute vehicle routing problem*) [70], также называемых комплексными задачами маршрутизации (*rich vehicle routing problem*) [71].

Планирование комплексных маршрутов является сложной и трудоемкой задачей, поскольку уже изначально NP-трудный поиск оптимального маршрута для фиксированного флота (*fixed fleet*) транспортных средств здесь осложняется комплексным набором действующих ограничений и, следовательно, плохой окрестностной структурой задачи. Таким образом, не существует алгоритмов, которые бы решали такую задачу за

полиномиальное время, что приводит к классу приближенных эвристических алгоритмов, которые позволяют получать близкие к оптимальным решения за приемлемое вычислительное время.

За последние 10 лет эвристические и метаэвристические подходы к решению ЗМТ получили стремительное развитие, во многом благодаря появлению гибридных алгоритмов, сочетающих в себе несколько изначально независимых вычислительных процедур. Лучшие метаэвристики применяют сложные стратегии поиска по окрестностям, принципы работы точных методов оптимизации и декомпозиционные схемы. Современные методы реализуют высокоуровневые стратегии управления, базируясь на различных структурах памяти (хромосомы, феромоны, нейроны) и опираясь на блок локального поиска, направляющего работу алгоритма в перспективные области пространства поиска [72].

Эволюционные методы неоднократно доказывали свою эффективность при решении различных вариаций ЗМТ, включая маршрутизацию с временными окнами, комплексную маршрутизацию и ряд других постановок, пересекающихся с рассматриваемой в задаче. Согласно представленным в литературе аналитическим исследованиям, гибридные эволюционные алгоритмы (ЭА) позволяют находить близкие к оптимальным решения с лучшей масштабируемостью и за лучшее время, чем в среднем любые другие эвристические и метаэвристические подходы [73]. Эффективность гибридных ЭА обеспечивается сочетанием генетических операторов, учитывающих специфику задачи, с правильно подобранными процедурами локального поиска и аккуратной балансировкой между исследованием пространства поиска (*exploration*) и его разработкой (*exploitation*), что позволяет избежать преждевременной сходимости алгоритма.

На данный момент, в литературе преобладают специализированные модификации эволюционных алгоритмов, направленные на решение конкретных вариаций задач маршрутизации, в то время как подходы, способные решать постановки с широким набором доступных ограничений, практически не представлены [74]. Таким образом, в области маршрутизации разнородных групп одними из наиболее актуальных проблем являются разработка новых моделей комплексных задач маршрутизации и создание эвристических методов их эффективного решения [75].

Методика решения задачи, поставленной на настоящем этапе НИР, основана на гибридном использовании декомпозиционного подхода, популяционных методов (эволюционный алгоритм, генетический алгоритм, муравьиный алгоритм и др.),

эвристических процедур оптимизации и алгоритмов планирования, применяемых к задачам поиска групповых маршрутов и расписаний.

В результате решения задачи предложен двухуровневый подход к динамическому планированию стратегии группы автономных подводных роботов, основанный на декомпозиции миссии на последовательность рабочих периодов с обязательным сбором действующей группировки по окончании каждого из них. Результаты исследования опубликованы в работах [76, 77].

Математическая модель задачи. В общем случае, многозадачные миссии АПР по мониторингу акватории состоят в посещении и обследовании (проведении ряда работ) группой подводных роботов заданного множества целей с рекомендуемой частотой. Задача маршрутизации группы при выполнении длительного мониторинга заключается в построении такого допустимого группового маршрута, который обеспечивал бы, насколько это возможно, своевременное обследование всех целей в условиях периодической смены состава действующей группировки для осуществления подзарядки аккумуляторных батарей. Приведем ее формальную постановку задачи регулярного мониторинга.

Обозначим через T длительность всей миссии. Пусть изначально миссия включает $N = \{1, \dots, n\}$ целей (заданий), расположенных в рамках обозначенной акватории. Кроме своего местоположения, каждая цель $i \in N$ характеризуется также требуемой периодичностью обследований p_i и длительностью разового обследования s_i . Значение периодичности p_i задает длительность временного интервала между каждыми двумя последовательными посещениями i -ой цели аппаратами группы должна составлять ровно p_i . Таким образом, в случае прибытия к цели ранее, чем через установленный интервал p_i , аппарат вынужден будет пребывать в режиме ожидания вплоть до истечения требуемого интервала. В случае прибытия АПР с опозданием, новый интервал p_i будет отсчитываться не от ожидаемого, а от фактического времени последнего обследования цели.

Пусть группа подводных роботов, выполняющая миссию, изначально состоит из m аппаратов. Все аппараты в группе являются функционально идентичными, то есть каждый из них обладает всем необходимым оборудованием для обследования любой цели i за время s_i . При этом, аппараты могут различаться между собой по своей крейсерской скорости v^k движения в водной среде и по емкости своих аккумуляторных батарей $b^k, k = 1, \dots, m$. Здесь предполагается, что все АПР в течении миссии перемещаются между целями со своей равномерной крейсерской скоростью, а емкость аккумуляторов определяется не в единицах энергии, а в средней длительности функционирования АПР.

Ограниченная емкость аккумуляторных батарей вынуждает роботов группы периодически прерывать работу для осуществления подзарядки путем стыковки со специальным зарядным доком или, в случае использования солнечных батарей, простого всплытия на поверхность. Конкретное расположение зарядных баз не является существенным, поскольку нам требуется лишь оценка сверху по времени, требуемому каждому АПР для перемещения до ближайшего дока. (всплытия) из рабочей области акватории. Предполагается, что количество зарядных баз и доков согласовано с количеством аппаратов в группе, что означает, что в процессе выполнения миссии любой АПР группы сможет быть обслужен на зарядной базе в любой момент времени. Обозначим среднюю скорость зарядки любой батареи через постоянную величину $0 < c < 1$. Тогда, для полной зарядки аккумуляторной батареи емкостью b потребуется $c \cdot b$ времени.

Поскольку все заданные цели расположены в ограниченной водной акватории и привязаны к конкретным ее участкам, они могут быть представлены в виде сети, где каждому узлу соответствует одна из целей миссии, что позволяет нам напрямую перейти к решению задачи маршрутизации транспорта на местности, представленной в виде графа $G = (V, \varepsilon)$. Здесь V соответствует множеству целей миссии и дополнительно включает V_0 – установленную заранее точку группового сбора, а ε – множеству траекторий между ними. На рисунке 6 схематически представлен процесс выполнения миссии по мониторингу группой из четырех АПР в предложенной выше постановке.



Рисунок 6 – Схематическое представление выполнения миссии по длительному мониторингу акватории группой АПР с непостоянным составом

Эффективность групповой работы в целом определяется регулярностью обследований всех целей миссии при своевременной подзарядке АПР. Ситуации, когда работы прибывают с опозданием, задерживая обследование цели, являются нежелательными и должны по возможности быть исключены. Таким образом, ставится задача разработки алгоритмического обеспечения для системы управления, реализующей эффективное планирование групповых маршрутов.

Дополнительным ограничением, выходящим за пределы классических постановок задач маршрутизации, здесь является требование *коммуникационной устойчивости* групповых маршрутов, которое заключается в обеспечении возможности для регулярных сборов группы. Такое требование диктуется, в первую очередь, динамической природой реальных подводных миссий: неопределенность внешней среды, ограниченные коммуникационные возможности, вероятность возникновения задержек и неисправностей оборудования могут приводить к непредвиденным изменениям в статусе действующей группировки. Все эти изменения могут происходить в реальном времени и приводить к потере эффективности выбранной ранее групповой стратегии. Таким образом, любые значимые изменения должны инициировать корректировку текущего группового маршрута с целью максимизации эффективности работы группы в новых условиях.

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. Групповая маршрутизация большой размерности сама по себе является задачей высокой вычислительной сложности даже в идеальной (полностью известной и неизменной) среде, поэтому в условиях динамической внешней среды поиск оптимального решения на периоде выполнения миссии T теряет свою целесообразность. В связи с этим, на первый план выходит быстрое и точное локальное планирование с учетом ближайших ожидаемых изменений.

Предлагается использование двухуровневой системы управления для обеспечения выполнения групповых миссий по регулярному мониторингу большой продолжительности. На двух уровнях предлагаемого подхода реализуется динамическое планирование групповой стратегии и локальное распределение целей (маршрутизация), соответственно. Так, цель динамического планировщика миссии на верхнем уровне – производить декомпозицию миссии, обеспечивающую регулярность групповых сборов и общее снижение вычислительной нагрузки для расчета маршрутов аппаратов. В свою очередь, задача планировщика нижнего уровня – распределить цели между аппаратами

группы и выбрать эффективный порядок их обхода с учетом действующих технических требований и пространственно-временных ограничений.

В идеальном случае, когда точки разбиения при декомпозиции миссии соответствуют моментам возникновения любых значимых изменений, задача маршрутизации на каждом рабочем периоде группы (временном отрезке между двумя последовательными точками разбиения) будет являться статичной. Однако, поскольку достоверно предсказаны могут быть только события, связанные с процессом подзарядки аккумуляторных батарей АПР, предлагается следующая схема декомпозиции миссии, основанная на ожидаемом цикле ротации роботов (рисунок 7).



Рисунок 7 – Декомпозиция миссии на основе циклов зарядки АПР

Планировщик миссий. Задача планировщика на верхнем уровне – регулировать действующий состав группы во времени, управляя рабочими циклами каждого аппарата. Поскольку от АПР не требуется всегда работать в группе до полного разряда батарей, и они могут покидать группу, имея некоторый энергозапас, а полная зарядка батарей также не обязательна (хоть и предпочтительна), то при планировании мы получаем возможность подстраивать циклы зарядки каждого робота с целью получения расписания циклов зарядки требуемого качества. От расписания требуется, во-первых, удовлетворять критерию допустимости, то есть обеспечивать своевременную зарядку всех нуждающихся АПР в отсутствие прецедентов выхода роботов из строя по причине нехватки энергии. Во-вторых, по возможности должна быть исключена одновременная зарядка большого количества аппаратов, так как это ведет к значительной потере производительности оставшейся для выполнения целей группировки. В-третьих, в связи с тем, что каждый сбор группы ведет к временному прекращению проведения обследований, необходимо избегать чрезмерной частоты групповых рандеву. Уменьшение количества рандеву может быть осуществлено за счет объединения соседних близкорасположенных событий там, где это возможно, путем их сдвига к единой временной точке.

В задачах составления расписаний большой размерности, как правило, применяется дискретизация пространства поиска, позволяющая ценой незначительных

погрешностей одновременно облегчить кодирование решения и ускорить процесс его поиска. Таким образом, период планирования рассматривается как последовательность равных отрезков времени $T_p = \langle T^1, \dots, T^e \rangle$, $e = T_p/T_0$, где T_0 – длительность каждого такого отрезка. В этом случае, рабочее расписание единичного АПР может быть представлено в виде e -мерного двоичного вектора, в котором i -ый элемент принимает значение нуля, когда аппарат работает вместе с группой на соответствующем отрезке времени T^i , и значение единицы во всех остальных случаях (аппарат на пути к зарядной базе, заряжается, либо возвращается после зарядки). Тогда расписание группы будет представлять собой двоичную матрицу $H = \{h_{ij}\}$ размерности $e \times m$ (рисунок 8).

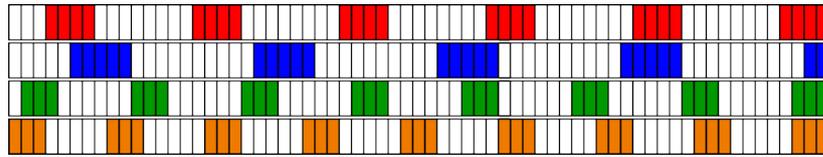


Рисунок 8 – Расписание ротации для группы из четырех аппаратов с различной емкостью аккумуляторов. Цветные клетки соответствуют периодам подзарядки.

Стратегия, направленная на улучшение командной работы, заключается в поощрении присутствия роботов в группировке, выполняющей цели миссии. Чтобы стимулировать такое поведение, мы будем штрафовать АПР за время отсутствия в действующей группировке. В этом случае, функция оценки эффективности группового расписания H будет иметь следующий вид:

$$f_A(H) = \sum_{i=1}^e \left(\left(\sum_{j=1}^m h_{ij} \right) \left(\sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot v^j \right) \right) \rightarrow \min \quad (8)$$

Второй критерий эффективности группового маршрута заключается в минимизации общего количества рандеву, то есть пар (T^i, T^{i+1}) , на которых хотя бы один робот меняет свой статус:

$$f_G(H) = \sum_{i=2}^e \left(1 - \prod_{j=1}^m (1 - |h_{ij} - h_{i-1,j}|) \right) \rightarrow \min \quad (9)$$

Таким образом, ставится задача составления таких расписаний, которые в равной степени удовлетворяли бы сразу двум противоречащим критериям (8) и (9).

Экспериментальным путем нами был определен следующий вид конечного критерия эффективности:

$$f(H) = f_G^2(H) \cdot f_A(H) \rightarrow \min \quad (10)$$

Предлагается использование модификации классического эволюционного алгоритма (ЭА), адаптированной под специфику задачи. В качестве хромосомы используется сжатое векторное представление матрицы-расписания H , что позволяет значительно понизить размерность задачи, а в качестве целевой функции выступает функция (10). При создании новых хромосом используются те генетические операторы, которые, согласно [78], демонстрируют наилучшие результаты именно на задачах составления расписаний, а именно: классическое двухточечное скрещивание, PPOX-скрещивание, случайная- и swar-мутации. Также применяется турнирная процедура отбора, реализованы принципы элитизма и параллельных популяций (островов).

Планировщик маршрутов. Ограниченная длительность каждого рабочего периода группы между двумя последовательными рандеву позволяет сформулировать задачу групповой маршрутизации. Входными параметрами задачи маршрутизации на каждом рабочем периоде служат характеристики всех целей миссии и аппаратов группы, обозначенные в постановке задачи, а также граф G . Начальное состояние каждого объекта миссии наследуется с окончания предыдущего рабочего периода группы.

Определим маршрут единичного АПР как вектор-строку вида $r = \langle V_0, V_1^r, V_2^r, \dots, V_k^r, V_0 \rangle$, представляющую собой индексированный список целей, предписанных текущему аппарату и расположенных в порядке их запланированного обхода. На каждом рабочем периоде все АПР начинают движение из точки сбора группы, возвращаясь туда по завершению выполнения своего маршрута. Итоговый маршрут группы $R = \{r_1, \dots, r_k\}$, $k \leq m$ представляет собой совокупность маршрутов всех АПР, действующих на текущем рабочем периоде. Таким образом, задача маршрутизации заключается в поиске такого группового маршрута, который обеспечивал бы:

- минимальный объем опозданий при посещении всех целей миссии, требующих обследования;
- прибытие всех действующих аппаратов в точку сбора в конце рабочего периода;

- благоприятные условия миссии (отсутствие целей с истекшим/истекающим внутренним таймером, что может привести к опозданиям) на момент завершения рабочего периода, которые будут “переданы” на следующий период работы группы.

Для оценки эффективности различных групповых маршрутов с учетом перечисленных требований и ограничений, предлагается схема на основе списка сценариев желательного и нежелательного поведения группы. Список всех возможных сценариев должен быть составлен человеком-оператором предварительно и загружен на бортовые системы АПР перед началом миссии. Каждый такой сценарий содержит свое значение приоритета относительно других сценариев, описание инициирующих его событий, тип сценария и условия начисления. Согласно предлагаемой схеме, оценка качества решения производится по результатам виртуального “прогона” группы по оцениваемому маршруту с начислением штрафных баллов и баллов поощрения, взвешенных согласно приоритетам соответствующих сценариев.

Для решения задачи разработан оригинальный гибридный эволюционный подход, включающий в себя специализированные генетические операторы, эвристики локального поиска и набор дополнительных процедур для повышения эффективности работы алгоритма при комплексных пространственно-временных ограничениях и в условиях большой размерности задачи. Групповой маршрут R выступает здесь в качестве хромосомы, а оценка приспособленности осуществляется по предложенной выше схеме. В создании начальной популяции принимают участие сразу три конструктивные эвристики: простая случайная вставка (*insertion heuristic*) и две вариаций жадной эвристики «time-oriented nearest-neighbor»; для воспроизводства потомства используется сразу нескольких специализированных генетических операторов: два скрещивания и многорежимная мутация. В качестве операторов скрещивания используются модификации двухточечного кроссовера и оператора адаптивной памяти (*adaptive memory*) [79]. В свою очередь, многорежимная мутация состоит из четырех операторов: добавление новой цели в маршрут, удаление цели из маршрута, изменение цели и смена двух целей местами. Полученные решения-потомки подвергаются локальному поиску, где с помощью процедуры спуска с чередующимися окрестностями (*variable neighborhood descent*) [80] производится их направленное улучшение. Механизмы параллельных популяций с миграцией (модель островов) и простого элитизма применяются на этапе формирования новой популяции, обеспечивая выход из локальных оптимумов, а процедура удаления клонов обеспечивает разнообразие новых популяций. Для повышения эффективности механизма создания новых популяций в целом, параметры, задающие вероятность

применения генетических операторов, корректируются на каждой итерации алгоритма. Эти изменения основываются на оценке текущей способности каждого из операторов привести к улучшению решений, что позволяет осуществлять непрерывную адаптацию алгоритма на всех этапах вычислений. Использование такого механизма самоадаптации позволяет значительно увеличить скорость работы алгоритма в тех случаях, когда одни операторы начинают работать заметно лучше других.

Описанные планировщики для верхнего и нижнего уровня были программно реализованы на языке C++ в виде системы группового управления предложенной структуры и включены в состав разрабатываемого моделирующего комплекса «AUV Multiobjective Mission Planner» для проведения вычислительных экспериментов. Поскольку исследуемые задачи планирования являются оригинальными и не имеют прямых аналогов в литературе, судить об эффективности работы разработанных методов можно лишь в сравнении с найденными для тестовых задач оптимальными решениями. Были предложены три группы тестовых задач малой, средней и большой размерности, соответственно. Для первой группы среднее отклонение найденных алгоритмом решений от оптимального не превышает 0,1%, для второй группы 1,75%, для третьей 2,5%.

Обобщение и оценка полученных результатов. Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. Предложена расширенная модель групповой мультиобъектной миссии в виде новой оригинальной вариации много-атрибутной задачи маршрутизации транспорта. Разработан двухуровневый подход к решению динамической вариации предложенной задачи, в котором на верхнем уровне классический эволюционный алгоритм осуществляет планирование моментов групповых сборов и циклов зарядки, а на нижнем уровне модификация разработанного ранее гибридного эволюционного алгоритма реализует маршрутизацию действующей группы роботов с учетом действующих пространственно-временных ограничений.

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Предложенная постановка задачи группового планирования маршрутов содержит в себе особенности сразу нескольких известных NP-трудных транспортных задач: систематического покрытия и патрулирования (*persistent coverage and tasks patrolling problem*), мультикоммивояжера и нескольких вариаций классической задачи маршрутизации транспорта. В то же время, исследуемая модель характеризуется рядом уникальных особенностей и сложным набором ограничений, что позволяет рассматривать ее как новую оригинальную вариацию комплексной задачи маршрутизации. Подобные постановки могут применяться также и для задач, связанных с управлением группами надводных, наземных или морских автономных роботов. Разработанные для решения

задачи планирования эволюционные подходы отличает авторский набор конструктивных эвристик и генетических операторов, оригинальные схемы кодирования и оценки качества решения, продвинутая процедура самоадаптации алгоритма, в ходе его работы определяющая наиболее эффективные на текущем этапе вычислений цепочки эвристик улучшения.

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

4) Разработка эффективных способов стабилизации положения равновесия нелинейных механических систем, описываемых уравнениями Лагранжа второго рода, при измерении только части обобщенных координат и без построения наблюдателя для полного вектора состояния.

Постановка задачи. Рассмотрим управляемую механическую систему, движения которой описываются уравнениями Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q} + Q_U . \quad (11)$$

Здесь вектор обобщенных координат составной $q = (x^T, y^T)^T \in R^n$ (верхний индекс T здесь и далее означает транспонирование), $x \in R^m$, $y \in R^k$, $n = m + k$, измеряются только компоненты вектора $x \in R^m$, управлять можно только приложением сил в первых m уравнениях, т.е. $Q_U \equiv (u_1, \dots, u_m, 0, \dots, 0)^T$. Кинетическая энергия

$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T A(q) \dot{q}$ является положительно определенной квадратичной формой обобщенных

скоростей $\dot{q} \in R^n$, матрица $A(q)$ является симметричной положительно определенной непрерывно дифференцируемой функцией обобщенных координат. Потенциальную энергию $\Pi(q) = \Pi(x, y)$ считаем непрерывно дифференцируемой функцией координат,

для которой выполнены условия $\Pi(0) = 0$ и $\frac{\partial \Pi(0)}{\partial q} = 0$.

При отсутствии управления $Q_U \equiv 0$ система (11) имеет положение равновесия $q = \dot{q} = 0$, которое не может быть асимптотически устойчивым ввиду отсутствия диссипации. Ставится задача стабилизации положения равновесия системы (11) до асимптотической устойчивости за счет выбора управления по принципу неполной

обратной связи с использованием только доступной измерению части $x \in R^m$ полного вектора $(q^T, \dot{q}^T)^T \in R^{2n}$ состояния системы.

Для решения задачи стабилизации рассмотрим непрерывно дифференцируемую функцию $\tilde{\Pi}(x, w)$ измеряемых обобщенных координат $x \in R^m$ и вспомогательных переменных $w \in R^l$ и выберем закон управления для системы (11) в потенциальном виде

$$Q_U = -\frac{\partial \tilde{\Pi}(x, w)}{\partial q} \quad (12)$$

Введем в рассмотрение также две функции вспомогательных переменных: квадратичную форму $\tilde{T}(\dot{w}) = \frac{1}{2} \dot{w}^T \tilde{A} \dot{w}$, где \tilde{A} - постоянная симметричная положительно определенная матрица, и непрерывно дифференцируемую положительно определенную однородную порядка $\nu+1 > 1$ функцию $\tilde{F}(\dot{w})$. Будем считать, что динамика вспомогательных переменных описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \dot{w}} + \frac{\partial \tilde{F}(\dot{w})}{\partial \dot{w}} = -\frac{\partial \tilde{\Pi}(x, w)}{\partial w} \quad (13)$$

Систему (11), (13), замкнутую управлением (12), можно рассматривать как уравнения движения механической системы с потенциальными и диссипативными силами, для которой вектор обобщенных координат составной $\hat{q} = (x^T, y^T, w^T)^T \in R^{n+l}$, а кинетическая \hat{T} и потенциальная $\hat{\Pi}$ энергия и функция Релея \hat{F} имеют вид $\hat{T} = T + \tilde{T}$, $\hat{\Pi} = \Pi + \tilde{\Pi}$, $\hat{F} = \tilde{F}$. При этом выбор всех функций «с волной» в нашем полном распоряжении. Дифференцируя полную энергию в силу системы (11)-(13), получаем соотношение $\frac{d}{dt} (\hat{T} + \hat{\Pi}) = -(\nu+1)\hat{F}(\dot{w}) \leq 0$. Поэтому, если функцию $\tilde{\Pi}(x, w)$ можно выбрать так, чтобы потенциальная энергия $\hat{\Pi}(x, y, w)$ замкнутой системы была положительно определенной по всем координатам (x, y, w) , то положение равновесия $q = \dot{q} = 0$, $w = \dot{w} = 0$ будет устойчиво по Ляпунову. Если дополнительно удастся показать, что в множестве $\dot{w} = 0$ нет целых траекторий, кроме равновесия $q = \dot{q} = 0$, $w = \dot{w} = 0$, то это равновесие на основании теоремы Барбашина-Красовского будет асимптотически устойчиво.

Основная задача состоит в том, чтобы получить условия на кинетическую и потенциальную энергию исходной системы (11), при выполнении которых стабилизация при помощи указанного выше закона управления (12) может быть осуществлена. Были рассмотрены два случая: линейный, когда кинетическая и потенциальная энергия являются квадратичными формами с постоянными матрицами, и существенно нелинейный, когда потенциальная энергия является обобщенно-однородной функцией координат.

Основные результаты. Линейный случай. Рассмотрим матрицу кинетической энергии в положении равновесия $A(0)$. Эта матрица представима в блочном виде

$$A(0) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{12}^T & A_{22} \end{pmatrix}, \text{ где } A_{11} \text{ и } A_{22} - \text{положительно определенные симметричные матрицы}$$

размеров $m \times m$ и $k \times k$ соответственно. Пусть разложение потенциальной энергии в ряд

Тейлора начинается с квадратичной формы $\Pi_2(x, y) = \Pi_2(q) = \frac{1}{2} q^T C q$, симметричная

матрица которой представима в блочном виде $C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{12}^T & C_{22} \end{pmatrix}$, где C_{11} и C_{22} -

симметричные матрицы размеров $m \times m$ и $k \times k$ соответственно. После линеаризации в окрестности положения равновесия уравнения (11) запишутся в виде

$$A_{11}\ddot{x} + A_{12}\ddot{y} + C_{11}x + C_{12}y = u, \quad A_{12}^T\ddot{x} + A_{22}\ddot{y} + C_{12}^T x + C_{22}y = 0 \quad (14)$$

В соответствии с (12) управление u , входящее в правую часть первого уравнения (14), выбираем в виде

$$u = -\frac{\partial \tilde{\Pi}(x, w)}{\partial x} = -\lambda \tilde{C}_{11}x - \gamma \tilde{C}_{13}w, \quad (15)$$

Здесь вспомогательный потенциал задается формулой

$$\tilde{\Pi}(x, w) = \frac{\lambda}{2} x^T \tilde{C}_{11}x + \gamma x^T \tilde{C}_{13}w + \frac{1}{2} w^T \tilde{C}_{33}w, \text{ где } \lambda \text{ и } \gamma - \text{положительные постоянные, } \tilde{C}_{11}$$

и \tilde{C}_{33} - симметричные положительно определенные матрицы размеров $m \times m$ и $l \times l$

соответственно, \tilde{C}_{13} - матрица размером $m \times l$. Вспомогательную кинетическую энергию

и функцию Релея соответственно возьмем в виде $\tilde{T} = \frac{1}{2} \dot{w}^T \tilde{A}_{33} \dot{w}$, $\tilde{F} = \frac{1}{2} \dot{w}^T \tilde{B}_{33} \dot{w}$, где \tilde{A}_{33} и

\tilde{B}_{33} - симметричные положительно определенные $m \times m$ -матрицы, тогда уравнения (13) для вспомогательных переменных будут линейными

$$\tilde{A}_{33}\ddot{w} + \tilde{B}_{33}\dot{w} + \gamma\tilde{C}_{13}^T x + \tilde{C}_{33}w = 0, \quad (16)$$

В качестве функции Ляпунова для замкнутой системы (14)-(16) рассматриваем полную энергию

$$V = \frac{1}{2}\dot{q}^T A(0)\dot{q} + \tilde{T}(\dot{w}) + \Pi_2(x, y) + \tilde{\Pi}(x, w) \quad (17)$$

Для положительной определенности функции (17) очевидно необходимо, чтобы была положительно определенной квадратичная форма $\Pi_2(0, y)$, т.е. матрица C_{22} . Будем далее считать это условие выполненным, тогда можно показать, что при достаточно большом λ и достаточно малом γ потенциальная энергия $\hat{\Pi}(x, y, w)$ будет положительно определенной функцией координат. Этот факт можно установить в случае квадратичных форм на основе критерия Сильвестра, однако доказательство приводить не будем, поскольку ниже в лемме 1 приведено более общее утверждение. Таким образом, при указанном выборе параметров функция (17) будет сделана положительно определенной по всем переменным.

Дифференцируя функцию (17) в силу системы (14)-(16), получаем соотношение $\dot{V} = -2\dot{w}^T \tilde{B}_{33}\dot{w} \leq 0$, поэтому множество нулей производной определяется равенством $E(\dot{V} = 0) = \{(x, y, w, \dot{x}, \dot{y}, \dot{w}) : \dot{w} = 0\}$. Чтобы воспользоваться теоремой Барбашина-Красовского остается найти условия, при выполнении которых в этом множестве нет целых траекторий, кроме положения равновесия.

Далее будем считать, что число вспомогательных переменных равно числу измеряемых координат $l = m$ и квадратная матрица \tilde{C}_{13} выбрана невырожденной. Из тождества $\dot{w} \equiv 0$ следует, что $w \equiv w^\circ \equiv const$, тогда из (16) следует $x \equiv x^\circ \equiv const$. Введем матрицу $L = C_{12} - A_{12}A_{22}^{-1}C_{22}$, выразим \ddot{y} из второго уравнения (14) и подставим в первое, тогда получим равенство

$$Ly = \left(A_{12}A_{22}^{-1}C_{12}^T - C_{11} \right) x^\circ - \tilde{C}_{12}w^\circ = c_1^\circ = const \quad (18)$$

Введем матрицу $M = A_{22}^{-1}C_{22}$, дважды продифференцируем равенство (18) и заменим \dot{y} его выражением из (14), получим равенство

$$LM\dot{y} = -LA_{22}^{-1}C_{12}^T x^\circ = c_2^\circ = const \quad (19)$$

Повторяя эту операцию над (19) и получаемыми далее равенствами $k-1$ раз, придем к системе равенств

$$LM^i y = c_{i+1}^\circ = const, \quad i = 0, \dots, k-1 \quad (20)$$

Заметим, что правые части в системе (20) выражаются известным образом через x° и w° . Предположим, что пара матриц (M, L) полностью наблюдаема, т.е. матрица наблюдаемости

$$H = \begin{pmatrix} L \\ LM \\ \dots \\ LM^{k-1} \end{pmatrix}$$

имеет полный ранг $\text{rang}H = k$. Тогда система линейных алгебраических уравнений (20) при любых постоянных правых частях имеет единственное постоянное решение $y \equiv y^\circ \equiv const$. А поскольку потенциальная энергия положительно определенная квадратичная форма, то положение равновесия y системы единственное, поэтому $x^\circ \equiv 0$, $y^\circ \equiv 0$, $w^\circ \equiv 0$.

Таким образом, выполнены все условия теоремы Барбашина-Красовского, на основании которой состояние равновесия будет асимптотически устойчиво. Резюмируем все сказанное выше в этом разделе в виде следующей теоремы.

Теорема 1. Если матрица C_{22} является положительно определенной, а пара матриц $(M = A_{22}^{-1}C_{22}, L = C_{12}^T - A_{12}A_{22}^{-1}C_{22})$ полностью наблюдаемой, то при любых симметричных положительно определенных матрицах \tilde{C}_{11} , \tilde{A}_{33} , \tilde{B}_{33} , \tilde{C}_{33} и невырожденной матрице \tilde{C}_{13} , выбирая число $\lambda > 0$ достаточно большим, а число $\gamma > 0$

достаточно малым, можно стабилизировать положение равновесия $q = \dot{q} = 0$, $w = \dot{w} = 0$ замкнутой системы (14)-(16) до асимптотической устойчивости.

В заключение отметим некоторые моменты. Во-первых, условия данной теоремы, накладываемые на матричные коэффициенты, являются по существу и необходимыми для возможности стабилизации указанным управлением (15). Во-вторых, теорема Ляпунова об асимптотической устойчивости по линейному приближению гарантирует, что закон управления (15) обеспечивает стабилизацию положения равновесия и полной системы, с учетом входящих в кинетическую и потенциальную энергию членов выше второго порядка малости. В-третьих, утверждение теоремы 1 остается справедливым и при наличии в правой части первого уравнения (14) любых исчезающих вместе с \dot{x} диссипативных или гироскопических сил $Q(t, q, \dot{q}) \in R^m$, удовлетворяющих условию $\dot{x}^T Q(t, q, \dot{q}) \leq 0$ и допускающих существование предельных в смысле уравнений.

Идеология доказательства асимптотической устойчивости на основе теоремы Барбашина-Красовского и многократного дифференцирования впервые была предложена Г.К.Пожарицким. Однако если к рассматриваемой здесь системе (14)-(16) применять напрямую теорему Пожарицкого, то надо будет набирать ранг матрицы, равный сумме $n+l$ числа обобщенных координат и числа вспомогательных переменных, что существенно больше используемого в теореме 1 числа $k < n$ не измеряемых переменных. В работе [81] число измеряемых переменных равно $m=1$ и для проверки наблюдаемости надо набирать ранг матрицы, равный числу обобщенных координат n . что также всегда больше $k = n-1$. В случаях же $m > 1$ подход [81] вообще не применим.

Отметим также, что задачи стабилизации систем с неполным измерением координат часто решаются с помощью наблюдателей состояния [82] полного порядка, когда используется вектор вспомогательных переменных той же размерности $2n$, что и полная размерность фазового вектора исходной системы, либо редуцированных, когда число вспомогательных переменных может быть уменьшено до числа $s = n+k < 2n$ не измеряемых координат и скоростей. Особенность предлагаемого здесь закона управления (12) заключается в том, что число вспомогательных переменных l равно числу измеряемых обобщенных координат m и может быть существенно меньше n . Поэтому в случаях $k > m$ закон управления (12) при реализации может оказаться более выгодным в вычислительном плане, требующим меньшего быстродействия вычислительного устройства в управляющем контуре, чем наблюдатель Люенбергера [82]. А поскольку уравнения для вспомогательных переменных (13) имеют форму уравнений механической

системы, то соответствующий регулятор во многих случаях может быть реализован прямо в виде соответствующего механизма.

Для нелинейного случая получены аналогичные результаты. Как указано в обзорной статье [83], подобные законы управления, основанные на использовании дополнительных переменных, находят широкие применения в системах гашения колебаний, в частности в виброзащитных системах и системах защиты от воздействия землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в рамках этапа НИР 2018 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 2018 г. получены следующие результаты:

1) Разработаны новые эффективные алгоритмы самоорганизации виртуальных сообществ агентов, выбора их лидеров и распределения ими ресурсов в процессе адаптивного управления заданиями в гетерогенной вычислительной сети.

2) Разработаны новые булевы модели и алгоритмы качественного исследования двоичных динамических систем.

3) Разработана спецификация логического языка программирования: формальное описание грамматики языка; описание семантики языковых конструкций для нехорновской системы логического программирования.

4) Разработаны алгоритмы управления группировкой автономных подводных роботов, обеспечивающих движение по заданному криволинейному пути с сохранением желаемой геометрической конфигурации.

5) Разработан двухуровневый подход к динамическому планированию широкомасштабных миссий для гетерогенной группы подводных роботов.

6) Разработаны эффективные способы стабилизации положения равновесия нелинейных механических систем, описываемых уравнениями Лагранжа второго рода, при измерении только части обобщенных координат и без построения наблюдателя для полного вектора состояния.

По результатам этапа НИР 2018 г. опубликовано 18 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus [15-18, 43, 46, 55-57, 63, 67, 76, 77, 84-88]; 13 работ в изданиях, включенных в базу данных РИНЦ [20-23, 37, 44, 45, 47, 66, 89-92]. Общее количество публикаций по результатам этапа НИР 2018 г. – 33, из них в журналах – 24.

Наиболее значимые результаты этапа НИР 2018 г.:

1. Разработаны новые мультиагентные алгоритмы и технология для эффективного управления масштабируемыми приложениями в процессе решения больших научных и прикладных задач в ГРВС, обеспечивающей в отличие от известных инфраструктур интеграцию Grid и облачных вычислений. Фундаментальной основой мультиагентного управления является уникальная концептуальная модель, агрегирующая знания о специфике решаемых задач и свойствах среды. Эффективность применения разработанной технологии показана в рамках междисциплинарных исследований по решению крупномасштабных практических задач анализа направлений развития топливно-энергетического комплекса России, оптимизации транспортной и складской логистики. *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. Разработан ориентированный на применение в сервис-ориентированной высокопроизводительной вычислительной среде логический метод (метод булевых ограничений) для качественного исследования ДДС на конечном интервале времени. Спецификация динамического свойства записывается на языке логики предикатов с использованием ограниченных кванторов существования и всеобщности. Для исследуемого свойства строится его модель в виде булева уравнения или квантифицированной булевой формулы, удовлетворяющая логической спецификации свойства и уравнениям динамики системы. Проверка выполнимости разнообразных свойств поведения траекторий ДДС сведена к решению задачи выполнимости булевых ограничений с использованием современных SAT и TQBF решателей. Практическая значимость метода обусловлена широким спектром приложений двоичных динамических моделей во многих прикладных 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 двухуровневый планировщик групповых стратегий для автономных подводных роботов, выполняющих комплексную динамическую миссию большой длительности. Задача планировщика на верхнем уровне заключается в составлении такого расписания циклов зарядки аппаратов в группе, которое обеспечивало бы своевременное пополнение батарей при недопущении одновременной зарядки большого количества роботов. На основе построенного расписания осуществляется декомпозиция, позволяющая регулярно отслеживать статус группы и осуществлять оперативное перепланирование при изменении ее состава. За маршрутизацию группы на каждом рабочем периоде отвечает низкоуровневый планировщик, работающий на графе целей и учитывающий технические возможности аппаратов в группе, а также все действующие ограничения и требования к выполнению конкретных задач миссии.

Разработан и программно реализован эволюционный подход к децентрализованной реализации обоих уровней планировщика с применением специализированных эвристик, современных процедур улучшения решений, оригинальных схем кодирования и оценки решений. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., к.т.н. Максимкин Н.Н., Кензин М.Ю.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. GridWay [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gridway.org> (дата обращения: 07.12.2018).
2. Global Leader in HPC Workload Management – PBS Works [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pbsworks.com/> (дата обращения: 07.12.2018).
3. HTCondor [Электронный ресурс]. – URL: <http://research.cs.wisc.edu/htcondor> (дата обращения: 07.12.2018).
4. Система управления прохождением параллельных заданий СУППЗ [Электронный ресурс]. – URL: <http://suppz.jssc.ru> (дата обращения: 07.12.2018).
5. Система управления заданиями Cleo [Электронный ресурс]. – URL: <http://parcon.parallel.ru/cleo.html> (дата обращения: 07.12.2018).
6. Globus Toolkit [Электронный ресурс]. – URL: <http://toolkit.globus.org/toolkit/> (дата обращения: 07.12.2018).
7. Grid Computing Laboratory Home Page: AppLeS Group [Электронный ресурс]. – URL: <http://cseweb.ucsd.edu/groups/gcl> (дата обращения: 07.12.2018).
8. Nimrod: A Tool for Performing Parameterized Simulations Using Distributed Workstations / D. Abramson, R. Sasic, J. Giddy et al. // Proc. of the 4th IEEE Symp. on High Performance Distributed Computing. IEEE. – 1995. – P. 112-121.
9. Examining the Challenges of Scientific Workflows / Y. Gil, E. Deelman, M. Ellisman et al. // IEEE Computer. – 2008. – V. 40, № 12. – P. 24-32.
10. Talia D. Workflow Systems for Science: Concepts and Tools / D. Talia // ISRN Software Engineering. – 2013. – V. 2013. Article ID 404525. – 15 p.
11. Negotiation Mechanism for Self-Organized Scheduling System with Collective Intelligence / A. Madureira, I. Pereira, P. Pereira et al. // Neurocomputing. – 2014. – V. 132. – P. 97-110.
12. A Note on New Trends in Data-Aware Scheduling and Resource Provisioning in Modern HPC Systems / J. Tao, J. Kolodziej, R. Ranjan et al. // Future Generation Computer Systems. – 2015. – V. 51, № C. – P. 45-46.
13. Каляев А.И. Метод мультиагентного диспетчирования ресурсов в гетерогенной облачной среде при выполнении потока задач / А.И. Каляев, И.А. Каляев, Я.С. Коровин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 11. – С. 31-40.
14. Toporkov V.V. Economic Model of Scheduling and Fair Resource Sharing in Distributed Computations / V.V. Toporkov, D.M. Yemelyanov // Programming and Computer Software. – 2014. – V. 40, № 1. – P. 35-42.

15. Bychkov I.V. Scalable Application for Searching Global Minimum of Multiextremal Functions / I.V. Bychkov, G.A. Oparin, A.N. Tchernykh et al. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – V. 54, № 1. – P. 83-89.
16. Configurable cost-quality optimization of cloud-based VoIP / Tchernykh A., Cortés-Mendoza J.M., Bychkov I. et al. // Journal of Parallel and Distributed Computing [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <http://cseweb.ucsd.edu/groups/gcl> (дата обращения: 07.12.2018).
17. Operating cost and quality of service optimization for multi-vehicle-type timetabling for urban bus systems / D. Pena, A. Tchernykh, S. Nesmachnow et al. // Journal of Parallel and Distributed Computing. [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <http://cseweb.ucsd.edu/groups/gcl> (дата обращения: 07.12.2018).
18. Edelev A.V. Distributed Computing Environment for Vulnerability Analysis of Energy Critical Infrastructures / A.V. Edelev, I.A. Sidorov, A.G. Feoktistov // Advances in Intelligent Systems Research. – 2018. – V. 158. – P. 37-42.
19. Orlando Tools: Development, Training, and Use of Scalable Applications in Heterogeneous Distributed Computing Environments / A. Tchernykh, A. Feoktistov, S. Gorsky et al. // Communications in Computer and Information Science. – 2018. (Принята в печать).
20. Масштабируемое приложение для поиска глобальных минимумов многоэкстремальных функций / И.В. Бычков, Г.А. Опарин, А.Н. Черных и др. // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 98-105.
21. Распределенная вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике / А.В. Еделев, С.М. Сендеров, Н.М. Береснева и др. // Системы связи, управления и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 197-231.
22. Обучение агентов на основе параметрической настройки их алгоритмов управления распределенными вычислениями / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы (ИТНТ-2018). Самара: Новая техника, 2018. – С. 2237-2247.
23. Edelev A. Distributed Computing Environment for Vulnerability Analysis of Energy Critical Infrastructures / A. Edelev, I. Sidorov, A. Feoktistov // Proceedings and Programme of the International Workshop on Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (CI: CM/IACC/CS 2018). Irkutsk: ESI SB RAS Press, 2018. – P. 46.
24. Феоктистов А.Г. Алгоритм выбора лидера виртуального сообщества агентов / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Ляпуновские чтения: Материалы конференции. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2018. – С. 88-90.

25. Феоктистов А.Г. Программа мониторинга очередей заданий в гетерогенной распределенной вычислительной среде / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018616092 М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2018.
26. Феоктистов А.Г. Имитационная модель гетерогенной распределенной вычислительной среды / А.Г. Феоктистов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018619931 М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2018.
27. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management / I. Bychkov, G. Oparin, A. Tchernykh et al. // *Procedia Computer Science*. – 2017. – V. 103. – P. 162-167.
28. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders / W. Vickrey // *Journal of Finance*. – 1961. – V. 16, № 1. – P. 8-37.
29. Bumgardner V.K. OpenStack in Action / V.K. Bumgardner. – Manning Publications, 2016. – 358 p.
30. TORQUE Resource manager [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.adaptivecomputing.com/products/open-source/torque/> (дата обращения: 07.12.2018).
31. Tel G. Introduction to Distributed Algorithms: Solutions and Suggestions / G.Tel. – Cambridge University Press, 2000.
32. GridWay Metascheduler [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gridway.org> (дата обращения: 07.12.2018).
33. Condor – A Distributed Job Scheduler / T. Tannenbaum, D. Wright, K. Miller et al. // *Beowulf Cluster Computing with Linux* / Eds. T. L. Sterling, W. Gropp, E. Lusk. – The MIT Press, MA, USA, 2002. – P. 307-350.
34. Theory and Practice of SAT Solving / A. Biere et al. // *Dagstuhl Reports*, 2015. – V. 5, № 4. – P. 98-122.
35. Twelve Years of QBF Evaluations: QSAT Is PSPACE-Hard and It Shows / P. Marin et al. // *Fundam. Inform.* – 2016. – V. 149. – P. 133-58.
36. Бохман Д. Двоичные динамические системы / Д. Бохман, Х. Постхоф. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
37. Опарин Г.А. Метод булевых ограничений в качественном анализе двоичных динамических систем / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2018. – № 9. – С. 19-29.

38. Маслов С.Ю. Теория дедуктивных систем и ее применение. – М.: Радио и связь, 1986. – 133 с.
39. Jhala R. Software model checking / R. Jhala, R. Majumdar // ACM Computing Surveys. – 2009. – V. 41, № 4. – P. 21:1-21:54.
40. Васильев С.Н. Метод редукции и качественный анализ динамических систем. I // Известия РАН. – Теория и системы управления. – 2006, № 1. – С. 21-29.
41. DIMACS format [Электронный ресурс]. – URL: http://www.cs.utexas.edu/users/moore/acl2/manuals/current/manual/index-seo.php/SATLINK___DIMACS (дата обращения: 10.12.2018).
42. QDIMACS standard [Электронный ресурс]. – URL: <http://qbflib.org/qdimacs.html> (дата обращения: 10.12.2018).
43. Distributed solvers of applied problems based on microservices and agent networks / G.A. Oparin et al. // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 1415-1420.
44. Технология разработки и применения мультиагентных решателей прикладных задач с децентрализованным управлением распределенными вычислениями / И.В. Бычков и др. // Суперкомпьютерные технологии (СКТ 2018): материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – Т. 2. – С. 76-80.
45. 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.
46. Methods and tools of synthesis for linear regulator in binary dynamics systems: a logical approach / G.A. Oparin et al. // AIP Conference Proceedings. 2018. – V. 2046. – P. 020070-1-020070-9.
47. Богданова В.Г. Параллельная реализация логического метода решения задач качественного анализа двоичных динамических систем / В.Г. Богданова, С.А. Горский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. – № 4. (в печати).
48. Горский С.А. Разработка сервиса для проверки выполнимости динамических свойств типа достижимости в булевых сетях / С.А. Горский, В.Г. Богданова // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 3-7 декабря 2018 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2018. – С. 28.

49. Горский С.А. Параллельный решатель проверки истинности квантифицированных булевых формул Hrcqsat / С.А. Горский, В.Г. Богданова. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018660455. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2018.
50. Akutsu T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks / Т. Akutsu, М. Hayashida, Т. Tamura // International Conference on Algebraic Biology, 2008. – P. 1-15.
51. Elena Dubrova's Home Page. [Электронный ресурс]. – URL: <https://people.kth.se/~dubrova/> (дата обращения: 10.12.2018)
52. Sebastio, S., A. A computational field framework for collaborative task execution in volunteer clouds / S. Sebastio, М. Amoretti, A. Lluch-Lafuente // In: ICSE workshop SEAMS, New York. ACM. – 2014. – P. 105-114.
53. Горский С.А. Параллельный решатель задач булевой выполнимости HPCSAT / С.А. Горский, В.Г. Богданова. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2017619809. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2017.
54. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]. – URL: <http://hpc.icc.ru>.
55. Davydov A. Logic level of control for robot groups using the method of positively constructed formulas/ A. Davydov // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 0979-0983.
56. Davydov A. The formal logic approach for checking the observability of a specification language on DES functioning/ A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 09380943.
57. Davydov A. A first-order logic based approach to problems of decentralized supervisory control of DES / A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // AIP Conference Proceedings. 2018. – V. 2046. – P. 020021-1-020021-10.
58. Jain R.P., Aguiar A.P., de Sousa J. B. Cooperative Path Following of Robotic Vehicles Using an Event-Based Control and Communication Strategy // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – 3(3). – P.1941-1948.

59. Wang H., Liu K., Li S. Command filter based globally stable adaptive neural control for cooperative path following of multiple underactuated autonomous underwater vehicles with partial knowledge of the reference speed // *Neurocomputing*. – 2018. – V. 275. – P. 1478-1489.
60. Xiang X., Liu C., Lapierre L., Jouvencel B. Synchronized path following control of multiple homogenous underactuated AUVs // *Journal of Systems Science and Complexity*. – 2012. – V. 25. – P. 71-89.
61. Qi X. Adaptive coordinated tracking control of multiple autonomous underwater vehicles // *Ocean Engineering*. – 2014. – V. 91. – P. 84-90.
62. Cui R., Ge S.S., How B.V.E., Choo Y.S. Leader-follower formation control of underactuated autonomous underwater vehicles // *Ocean Engineering*. – 2018. – V. 37. – P. 1491-1502.
63. Ul'yanov S., Maksimkin N., Bedenko K. Robust formation control of autonomous underwater vehicles with actuator saturations under discrete-time periodic communications // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – V. 2046. – P. 020104(1)-020104(10). DOI: 10.1063/1.5081624.
64. Vasilyev S., Ulyanov S., Maksimkin N. A VLF-based technique in applications to digital control of nonlinear hybrid multirate systems // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – V. 1798. – P. 020170(1)-020170(10).
65. Leith D.J., Leithead W.E. Survey of Gain-Scheduling Analysis & Design // *International Journal of Control*. – 2000. – V. 73. – P. 1001-1025
66. Бычков И.В., Давыдов А.В., Нагул Н.В., Ульянов С.А. Событийный подход к многорежимному управлению группировкой подводных роботов в обследовательской миссии // *Вычислительные технологии*. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 3-19.
67. Bychkov I., Davydov A., Nagul N., Ul'yanov S. Hybrid Control Approach to Multi-AUV System in a Surveillance Mission // *Information Technology in Industry*. – 2018. – Vol. 6, No. 1. – P. 20-26.
68. Zadeh S.M. Development of an Autonomous Reactive Mission Scheduling and Path Planning (ARMSP) Architecture Using Evolutionary Algorithms for AUV Operation in a Sever Ocean Environment / S.M. Zadeh, D.M.W. Powers, A.M. Yazdani // *Computing Research Repository*. 2016. abs/1605.01824.
69. A hybrid approach to solve the dynamic patrol routing problem for group of underwater robots / M.Yu. Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // *39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, Croatia. IEEE. – 2016. – P. 1114-1119.

70. Crainic T.G. et al. Multi-thread integrative cooperative optimization for rich combinatorial problems / T.G. Crainic, G.C. Crisan, M. Gendreau, N. Lahrichi and W. Rei // 2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing, Rome, Italy. IEEE. – 2009. – P. 1-8.
71. Special issue on rich vehicle routing problems / R.F. Hartl, G. Hasle, G.K. Janssens // Central European Journal of Operations Research. – 2006. – V. 14(2). – P. 103–104.
72. Laporte G. et al. Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem / G. Laporte, S. Ropke, T. Vidal // Vehicle Routing. – 2014. – P. 87-116.
73. Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms / O. Braysy, M. Gendreau // Transportation science. – 2005. – V. 39(1). – P. 104–118.
74. Vidal T. et al. A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows / T. Vidal, G. Crainic, M. Gendreau, and C. Prins // Computers & Operations Research. – 2013. – V. 40(1). – P. 475-489.
75. Koc C. et al. Thirty years of heterogeneous vehicle routing / C. Koc, T. Bektas, O. Jabali, and G. Laporte // European Journal of Operational Research. – 2016. – V. 249(1). – P. 1-21.
76. An approach to route underwater mobile robots under continuous squad rotation / M.Yu.Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 973-978.
77. Task allocation and path planning for network of autonomous underwater vehicles / M.Yu.Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // International Journal of Computer Networks & Communications. 2018. V. 10, № 2. P. 33-42.
78. Recent Research Trends in Genetic Algorithm Based Flexible Job Shop Scheduling Problems / M.K. Amjad, S.I. Butt, R. Kousar, et al. // Mathematical Problems in Engineering. – 2018. – P. 1–32.
79. Yong M. Solving vehicle routing problem with time windows with hybrid evolutionary algorithm // In proceeding of Intelligent Systems (GCIS), 2010 Second WRI Global Congress on. – 2010. – V. 1. – P. 335-339.
80. Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem / M. Affi, H. Derbel, B. Jarboui // International Journal of Industrial Engineering Computations. – 2018. – V. 9(2). – P. 195-204.
81. Skruch P. Stabilization of second-order systems by non-linear feedback // Int. J. Appl. Math. Comput. Sci. – 2004. – No. 4. P. 455-460.

82. Luenberger D.G. An Introduction to Observers // IEEE Transactions on Automatic Control. – V. AC-16. No 6. – December 1971. – P. 596-602.
83. Pham T.T., Lamarque C.-H., Savadkoobi A. Ture. Passive control of a 2-DOF system under two different harmonic excitations // IV European Conference on Computational Mechanics. Palais des Congres. Paris. France. May 16-21, 2010. – URL: http://www.eccm2010.org/complet/fullpaper_1369.pdf (дата обращения: 13.12.2018).
84. Kosov A.A., Semenov E.I. On exact multidimensional solutions of a nonlinear system of reaction-diffusion equations // Differential Equations. – 2018. – V.54, No.1. – P. 108-122. (Web of Science)
85. Kosov A.A., Semenov E.I. First integrals and periodic solutions of a system with power nonlinearities // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – V. 12, No. 1. – P. 70-83. (Scopus).
86. Kosov A.A., Semenov E.I. On Analytic Periodic Solutions to Nonlinear Differential Equations with Delay (Advance) // Russian Mathematics. – 2018. – V.62, No. 10. – P. 1-7. (Scopus).
87. Kosov A.A., Kozlov M.V. On the Existence and Construction of Common Lyapunov Functions for the Switched Discrete Systems // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – No. 4. – P. 668-677. (Scopus).
88. Nagul N., Davydov A. On checking properties of decentralized controlled discrete-event systems // AIP Conference Proceedings, 2018. – 2046. – P. 020022(1)-020022(10). DOI: 10.1063/1.5081542.
89. Косов А.А., Семенов Э.И. О точных многомерных решениях одной нелинейной системы уравнений реакции-диффузии // Дифференциальные уравнения. – 2018. – Т. 54. № 1. – С. 108-122.
90. Косов А.А., Семенов Э.И. Первые интегралы и периодические решения системы со степенными нелинейностями // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2018. – Т. XXI, № 1(73). – С.47-60.
91. Косов А.А., Семенов Э.И. Об аналитических периодических решениях нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием (опережением) // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2018. – № 10. С.34-42.
92. Косов А.А., Козлов М.В. О существовании и построении общих функций Ляпунова для переключаемых дискретных систем // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75-85.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикации по проекту

1. Bychkov I.V. Scalable Application for Searching Global Minimum of Multiextremal Functions / I.V. Bychkov, G.A. Oparin, A.N. Tchernykh et al. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2018. – V. 54, № 1. – P. 83-89.
2. Configurable cost-quality optimization of cloud-based VoIP / Tchernykh A., Cortés-Mendoza J.M., Bychkov I. et al. // Journal of Parallel and Distributed Computing [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <http://cseweb.ucsd.edu/groups/gcl> (дата обращения: 07.12.2018).
3. Operating cost and quality of service optimization for multi-vehicle-type timetabling for urban bus systems / D. Pena, A. Tchernykh, S. Nesmachnow et al. // Journal of Parallel and Distributed Computing. [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <http://cseweb.ucsd.edu/groups/gcl> (дата обращения: 07.12.2018).
4. Edelev A.V. Distributed Computing Environment for Vulnerability Analysis of Energy Critical Infrastructures / A.V. Edelev, I.A. Sidorov, A.G. Feoktistov // Advances in Intelligent Systems Research. – 2018. – V. 158. – P. 37-42.
5. Orlando Tools: Development, Training, and Use of Scalable Applications in Heterogeneous Distributed Computing Environments / A. Tchernykh, A. Feoktistov, S. Gorsky et al. // Communications in Computer and Information Science. – 2018. (Принята в печать).
6. Масштабируемое приложение для поиска глобальных минимумов многоэкстремальных функций / И.В. Бычков, Г.А. Опарин, А.Н. Черных и др. // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 98-105.
7. Распределенная вычислительная среда для анализа уязвимости критических инфраструктур в энергетике / А.В. Еделев, С.М. Сендеров, Н.М. Береснева и др. // Системы связи, управления и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 197-231.
8. Обучение агентов на основе параметрической настройки их алгоритмов управления распределенными вычислениями / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы (ИТНТ-2018). Самара: Новая техника, 2018. – С. 2237-2247.
9. Edelev A. Distributed Computing Environment for Vulnerability Analysis of Energy Critical Infrastructures / A. Edelev, I. Sidorov, A. Feoktistov // Proceedings and Programme of the International Workshop on Critical Infrastructures: Contingency Management,

Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security (CI: CM/IACC/CS 2018). Irkutsk: ESI SB RAS Press, 2018. – P. 46.

10. Феоктистов А.Г. Алгоритм выбора лидера виртуального сообщества агентов / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Ляпуновские чтения: Материалы конференции. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2018. – С. 88-90.

11. Опарин Г.А. Метод булевых ограничений в качественном анализе двоичных динамических систем / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2018. – № 9. – С. 19-29.

12. Distributed solvers of applied problems based on microservices and agent networks / G.A. Oparin et al. // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 1415-1420.

13. Технология разработки и применения мультиагентных решателей прикладных задач с децентрализованным управлением распределенными вычислениями / И.В. Бычков и др. // Суперкомпьютерные технологии (СКТ 2018): материалы 5-ой Всероссийской научно-технической конференции: в 2 т. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. – Т. 2. – С. 76-80.

14. 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.

15. Methods and tools of synthesis for linear regulator in binary dynamics systems: a logical approach / G.A. Oparin et al. // AIP Conference Proceedings. 2018. – V. 2046. – P. 020070-1-020070-9.

16. Богданова В.Г. Параллельная реализация логического метода решения задач качественного анализа двоичных динамических систем / В.Г. Богданова, С.А. Горский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. – № 4. (в печати).

17. Davydov A. Logic level of control for robot groups using the method of positively constructed formulas/ A. Davydov // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 0979-0983.

18. Davydov A. The formal logic approach for checking the observability of a specification language on DES functioning/ A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 09380943.
19. Davydov A. A first-order logic based approach to problems of decentralized supervisory control of DES / A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // AIP Conference Proceedings. 2018. – V. 2046. – P. 020021-1-020021-10.
20. Ul'yanov S., Maksimkin N. Bedenko K. Robust formation control of autonomous underwater vehicles with actuator saturations under discrete-time periodic communications // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 2046. – P. 020104(1)-020104(10). DOI: 10.1063/1.5081624.
21. Бычков И.В., Давыдов А.В., Нагул Н.В., Ульянов С.А. Событийный подход к многорежимному управлению группировкой подводных роботов в обследовательской миссии // Вычислительные технологии. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 3-19.
22. Bychkov I., Davydov A., Nagul N., Ul'yanov S. Hybrid Control Approach to Multi-AUV System in a Surveillance Mission // Information Technology in Industry. – 2018. – Vol. 6, No. 1. – P. 20-26.
23. An approach to route underwater mobile robots under continuous squad rotation / M.Yu.Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), Opatija, Croatia. IEEE. – 2018. – P. 973-978.
24. Task allocation and path planning for network of autonomous underwater vehicles / M.Yu.Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // International Journal of Computer Networks & Communications. 2018. V. 10, № 2. P. 33-42.
25. Kosov A.A., Semenov E.I. On exact multidimensional solutions of a nonlinear system of reaction-diffusion equations // Differential Equations. – 2018. – V.54, No.1. – P. 108-122. (Web of Science)
26. Kosov A.A., Semenov E.I. First integrals and periodic solutions of a system with power nonlinearities // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – V. 12, No. 1. – P. 70-83. (Scopus).

27. Kosov A.A., Semenov E.I. On Analytic Periodic Solutions to Nonlinear Differential Equations with Delay (Advance) // Russian Mathematics. – 2018. – V.62, No. 10. – P. 1-7. (Scopus).
28. Kosov A.A., Kozlov M.V. On the Existence and Construction of Common Lyapunov Functions for the Switched Discrete Systems // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2018. – No. 4. – P. 668-677. (Scopus).
29. Nagul N., Davydov A. On checking properties of decentralized controlled discrete-event systems // AIP Conference Proceedings, 2018. – 2046. – P. 020022(1)-020022(10). DOI: 10.1063/1.5081542.
30. Косов А.А., Семенов Э.И. О точных многомерных решениях одной нелинейной системы уравнений реакции-диффузии // Дифференциальные уравнения. – 2018. – Т. 54. № 1. – С. 108-122.
31. Косов А.А., Семенов Э.И. Первые интегралы и периодические решения системы со степенными нелинейностями // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2018. – Т. XXI, № 1(73). – С.47-60.
32. Косов А.А., Семенов Э.И. Об аналитических периодических решениях нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием (опережением) // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2018. – № 10. С.34-42.
33. Косов А.А., Козлов М.В. О существовании и построении общих функций Ляпунова для переключаемых дискретных систем // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 75-85.