

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 121032400051-9

Шифр научной темы FWEW-2021-0005

Рег. № ИКРБС

Инв. № 2021 - 3



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДСТУ СО РАН

академик

И.В. Бычков
г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И АНАЛИЗА ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СРЕДАХ
(промежуточный, этап 1)

Руководитель НИР,
академик

подпись, дата

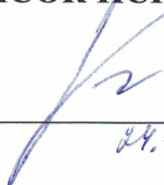
И.В. Бычков

24.12.2021

Иркутск 2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ


Руководитель темы
академик


24.12.2021

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

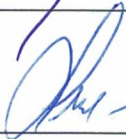
Исполнители темы:

зам. директора по н.р.
д-р техн. наук


24.12.2021

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

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


24.12.2021


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

зав. лаб.
канд. техн. наук.


24.12.2021

А.Г. Феокистов (раздел 1, Приложение А)

зав. лаб.
канд. техн. наук


24.12.2021

С.А. Ульянов (раздел 2, Приложение А)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук


24.12.2021

А.А. Косов (раздел 2)

ст. науч. сотр.
канд. техн. наук.


24.12.2021

В.Г. Богданова (раздел 1)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук


24.12.2021

Н.В. Нагул (раздел 2)

науч. сотр.
канд. техн. наук.


24.12.21


О.Ю. Башарина (раздел 1)

науч. сотр.
канд. техн. наук.


24.12.2021


С.А. Горский (раздел 1)

науч. сотр.
канд. техн. наук.


24.12.2021


И.А. Сидоров (раздел 1)

науч. сотр.

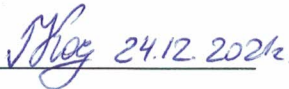

24.12.2021

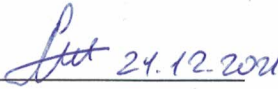
А.В. Давыдов (раздел 2)

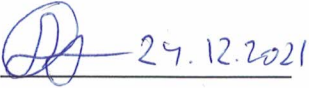
мл. науч. сотр.

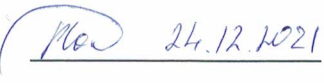

24.12.2021

М.Ю. Кензин (раздел 2)

мл. науч. сотр.  24.12.2021 Р.О. Костромин (раздел 1)

мл. науч. сотр.  24.12.2021 А.А. Пашинин (раздел 1)

программист  27.12.2021 А.А. Ларионов (раздел 2)

программист  24.12.2021 А.А. Толстихин (раздел 2)

Нормоконтролёр
канд. техн. наук.  24.12.2021 Е.С. Фереферов

РЕФЕРАТ

Отчет 97 с., 21 рис., 6 табл., 114 источн., 2 прил.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ, ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ,
МНОГОАГЕНТНЫЕ, РОБОТИЗИРОВАННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ,
КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ.

Объектом настоящей НИР являются предметно-ориентированные интеллектуальные системы группового управления в недетерминированных распределенных средах.

Целью настоящей НИР является проведение исследований по следующим трем направлениям: развитию существующих и разработка новых моделей, алгоритмов, методов и инструментальных средств создания предметно-ориентированных систем группового управления в недетерминированной распределенной среде на основе многоагентных технологий, интеллектуального анализа ретроспективных и текущих данных, а также машинного обучения агентов; разработке и программной реализации многоагентной технологии решения задач качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода в микросервисной гибридной облачной среде; разработке методов построения и анализа многоуровневых систем интеллектуального управления группами роботов в недетерминированных средах.

В ходе реализации этапа НИР 2021 г. выполнены следующие работы: разработана гибридная имитационная модель анализа функционирования компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур, представленных программными агентами; разработаны булевы модели качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода; разработаны способы построения нормальных форм для позитивно-образованных формул с темпоральными операторами; решена задача супервизорного управления частично наблюдаемыми дискретно-событийными системами с применением метода автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул; разработана алгоритмическая схема эффективного группового поведения при осуществлении оперативного оповещения внутри динамических распределенных робототехнических группировок; разработан основанный на событиях метод планирования пути в неизвестной среде для группы мобильных роботов; разработана и исследована математической модели распространения распределенной двухкомпонентной

группировки подводных роботов (например, исследователи и заправщики), описываемой системой нелинейных уравнений типа реакции-диффузии.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Разработка методов и средств организации многоагентного управления в распределенных предметно-ориентированных информационно-вычислительных средах...	9
2 Разработка методов построения и анализа многоуровневых систем интеллектуального управления группами роботов в недетерминированных средах	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	73
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	76
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций	86
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Список конференций.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы и обоснование необходимости проведения НИР. Актуальность и новизна исследований в рамках НИР.

Современные технологии автоматизации процессов проведения крупномасштабных научных экспериментов в распределенных средах предполагают решение таких нетривиальных задач, как извлечение информации из слабоструктурированных источников и ее конвертирование в целевые структуры данных, разработка, модификация и комплексирование прикладного и системного программного обеспечения приложений, его непрерывную интеграцию, доставку и развертывание в узлах среды, автоматизацию построения и выполнения схем решения задач, интеллектуальное управление процессами функционирования объектов недетерминированной динамической среды. Анализ исследований в области организации такого интеллектуального управления показывает, что одним из эффективных подходов к решению перечисленных задач является применение многоагентных технологий.

В настоящее время происходит интенсивное развитие и усложнение управляемых динамических систем. Качественный анализ таких объектов часто связан со значительными трудностями вычислительного характера. Несмотря на большое количество существующих методов, задача анализа и синтеза различных классов таких систем остается актуальной, так как имеется ряд открытых вопросов, связанных с использованием высокопроизводительных ресурсов для организации распределенного управления решением трудоемких задач рассматриваемой области. Объединение вычислительных агентов в сеть, узлы которой взаимодействуют в стиле peer-to-peer (P2P), обеспечивает возможность создания открытых многоагентных систем, в которых множество функционирующих агентов может меняться с течением времени.

Наблюдаемое в последние десятилетия бурное развитие безлюдных технологий привело к значительному росту робототехнических приложений в коммерческих и военных областях. В ситуациях, когда требуется обеспечить проведение широкомасштабных работ поискового и исследовательского характера при нехватке времени или ресурсов на развертывание сети статического наблюдения использование группы автономных роботов позволяет добиться оперативного выполнения задач в представляющих интерес областях. Организация совместной работы гетерогенных группировок роботов в заранее неизвестных динамических средах является

нетривиальной проблемой, которая далека от своего окончательного решения, и требует наличия у роботов развитой системы управления.

Обоснование необходимости проведения НИР. Таким образом, разработка новых средств построения и применения адаптивных многоагентных моделей и алгоритмов исследования процессов управления сложными объектами с применением методов машинного обучения агентов, инструментальных средств децентрализованного управления распределенными предметно-ориентированными вычислениями на основе интеграции открытой, надежной и масштабируемой P2P-системы с многоагентной технологией, а также методов построения и анализа многоуровневых систем интеллектуального управления группой роботов, обеспечивающих эффективное и оперативное выполнение широкомасштабных миссий с учетом как возможностей бортовых вычислительных и коммуникационных устройств, так и действующих пространственно-временных, коммуникационных и других ограничений, является актуальной задачей и обеспечивает получение новых качественных свойств рассматриваемых предметно-ориентированных интеллектуальных систем в процессе их проектирования, исследования и применения.

Исследования по проекту организованы в виде двух блоков: Блок 1 «Разработка методов и средств организации многоагентного управления в распределенных предметно-ориентированных информационно-вычислительных средах»; Блок 2 «Разработка методов построения и анализа многоуровневых систем интеллектуального управления группами роботов в недетерминированных средах».

1 Разработка методов и средств организации многоагентного управления в распределенных предметно-ориентированных информационно-вычислительных средах

Целью блока проекта является проведение исследований по следующим двум направлениям:

1. Развитие существующих и разработка новых моделей, алгоритмов, методов и инструментальных средств создания предметно-ориентированных систем группового управления в недетерминированной распределенной среде на основе многоагентных технологий, интеллектуального анализа ретроспективных и текущих данных, а также машинного обучения агентов. Суть и новизна этого подхода заключается в организации рационального локального взаимодействия агентов между собой с целью достижения согласованного кооперативного решения общей задачи управления объектами среды при ее декомпозиции на совокупность взаимосвязанных подзадач. При этом декомпозиция осуществляется на конкурентной основе с учетом следующих факторов: существование различного рода неопределенностей в характеристиках объектов; наличие конфликтующих критериев эффективности процессов функционирования объектов; возникновение отказов инфраструктурных, программно-аппаратных и телекоммуникационных компонентов среды.

2. Разработка и программная реализация многоагентной технологии решения задач качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода в микросервисной гибридной облачной среде. Основные преимущества этой технологии заключаются в декларативном подходе к анализу динамических свойств на основе исследования их булевых моделей, описывающих как динамику системы, так и спецификацию требуемого свойства, что позволяет существенно увеличить размерность вектора состояния системы и интервал времени ее функционирования путем применения параллелизма по данным. Формирование вычислительных схем, поддержка их исполнения и обеспечение управления данными в гибридной облачной информационно-вычислительной среде обеспечиваются инструментальными средствами, разрабатываемыми в рамках предлагаемой технологии.

Задачи этапа НИР по блоку в 2021 году:

- 1) разработка гибридной имитационной модели анализа функционирования компонентов ИВС и их программно-аппаратных инфраструктур, представленных программными агентами;

- 2) разработка булевых моделей качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода.

Выбор направления исследований обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

Характеристика задач и результаты исследований:

1) Разработка гибридной имитационной модели анализа функционирования компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур, представленных программными агентами.

Выбор направления исследований. Методы решения задач. В настоящее время исследование поведения сложно организованных ИВС, которые в целом относятся к классу систем массового обслуживания (СМО), во времени на разных этапах их проектирования и функционирования является одной из важных проблем имитационного моделирования. Инфраструктуры компонентов ИВС могут включать ресурсы центров коллективного пользования (ЦКП), облачных и туманных платформ, системы хранения данных и инженерное оборудование, необходимое для поддержки функционирования системы в целом, главной задачей которой является обслуживание информационных и вычислительных запросов пользователей в процессе решения их задач. Сложность динамической структуры подобных СМО обусловлена: большим числом важных характеристик функционирования СМО и связей между ними, представленных функциональными, статистическими, неоднозначными или иными отображениями; существованием широкого спектра случайных событий и законов их распределения; наличием ограничений различных видов.

Применение имитационного моделирования позволяет существенно упростить разработку оптимальных режимов их работы, а также нахождение и выбор управляющих параметров. В рамках такого моделирования разрабатывается имитационная программа, воспроизводящая процессы работы исследуемой системы, определяются ее входные и выходные (наблюдаемые) параметры, задаются внешние воздействия. Подготовка многовариантных расчетов в распределенной вычислительной среде осуществляется путем перебора значений входных переменных в заданных диапазонах. Для каждого варианта входных переменных рассчитываются соответствующие выходные переменные. Полученные результаты расчетов оптимизируются. Таким образом, оптимальные параметры процессов работы системы ищутся путем перебора. Качество полученных результатов моделирования во многом обусловлено степенью полноты знаний о предметной области исследуемой системы, а также алгоритмах, используемых при решении задач.

Имитационное моделирование на основе многовариантных расчетов характеризуется высокой комбинаторной сложностью. Это в свою очередь приводит к большим затратам оперативной памяти и дискового пространства, а также значительной нагрузке на интерконнект. Поэтому для получения качественных результатов моделирования СМО зачастую требуется применение средств высокопроизводительных вычислений. Как правило, такие средства предоставляются ЦКП. В противном случае, необходимо огрубление модели СМО, обуславливающее снижение качества результатов решения задачи. Использование параллельных или распределенных вычислений обеспечивает поддержку проведения крупномасштабных имитационных экспериментов, обработку исходных данных большего объема и расширение класса решаемых задач.

Необходимость учета специфики работы СМО и анализа информационных потоков данных актуализирует переход от традиционной математической модели системы к ее качественно новому виду – цифровому двойнику, содержащему актуальные данные о всем ее жизненном цикле [1, 2]. В настоящее время такой переход возможен благодаря стремительному развитию информационных технологий, увеличению размеров систем хранения данных и существенному росту производительности вычислительных систем, необходимому для обработки больших данных и эффективного извлечения знаний [3, 4].

Анализ научных работ по имитационному моделированию [5, 6], связанных с темой исследования, позволяет сделать вывод, что пользователи могут выбирать из ряда доступных инструментов моделирования, которые отличаются точностью представления реального мира и эффективностью. Однако многие инструменты не используют доступные мощности вычислительной среды и не учитывают специфику предметных областей исследуемых систем [7], а также не обеспечивают сервис-ориентированный интерфейс, являющийся важным компонентом современных средств моделирования [8].

Зачастую известные в настоящее время средства имитационного моделирования СМО в высокопроизводительной вычислительной среде либо являются узкоспециализированными, не обладающими всеми необходимыми функциональными возможностями для решения обозначенных выше проблем, либо входят в состав дорогостоящего программного обеспечения (как правило, зарубежного) [9], и в силу этого недоступны широкому кругу конечных пользователей (сотрудников профильных организаций).

Таким образом, новый подход к исследованию СМО, базирующийся на комплексном применении методов концептуального программирования, инженерии знаний, искусственного интеллекта, многокритериальной оптимизации, параллельных и

распределенных вычислений, виртуализации ресурсов, а также мультиагентных и сервис-ориентированных технологий является актуальным.

В результате решения задачи разработаны новые модели, алгоритмы и инструментальные средства построения и применения гибридной имитационной модели анализа функционирования компонентов ИВС и их программно-аппаратных инфраструктур, представленных программными агентами.

Гибридная модель ИВС интегрирует средства и методы имитационного моделирования систем массового обслуживания и агентного моделирования. Она строится на основе модели системы общего назначения GPSS [10], в которой информация о программно-аппаратных ресурсах среды предоставляется агентами, которые также осуществляют моделирование процесса обслуживания заданий. Эта информация включает как технические характеристики физических ресурсов и установленных на них систем управления заданиями, так и оценки состояния (доступности, загрузки, балансировки и др.) моделируемых ресурсов и критериев (времени, стоимости, надежности и др.) выполнения программ на этих ресурсах. Действия агентов при моделировании обслуживания заданий разных классов, определяются их конфигурационными настройками, отражающими экспертные знания администраторов ресурсов.

Автоматизация построения GPSS-моделей поддерживается с помощью инструментального комплекса SIRIUS III [11], функциональные возможности которого расширены новыми средствами, обеспечивающими поддержку взаимодействия GPSS-моделей и агентов на основе специализированного API, разработанного в рамках НИР [12]. Схема разработки и применения агентов, а также их взаимодействия с GPSS-моделями в рамках гибридной модели ИВС приведена на рисунке 1. Имитационные модели объединяются в виде распределенного пакета прикладных программ средствами инструментального комплекса Orlando Tools [12].

Комбинаторная сложность моделирования ИВС обуславливает применение средств выполнения имитационных моделей GPSS в распределенной высокопроизводительной среде. При этом GPSS работает только под управлением операционной системы (ОС) Windows и не имеет встроенных средств обеспечения параллельного выполнения имитационных моделей. Среди альтернативных средств имитационного моделирования широкое применения нашло приложение AnyLogic [13]. Однако в силу проприетарности и закрытости данного средства, в нем не предусмотрена возможность выполнения параллельного моделирования в среде, отличной от облачных серверов AnyLogic.

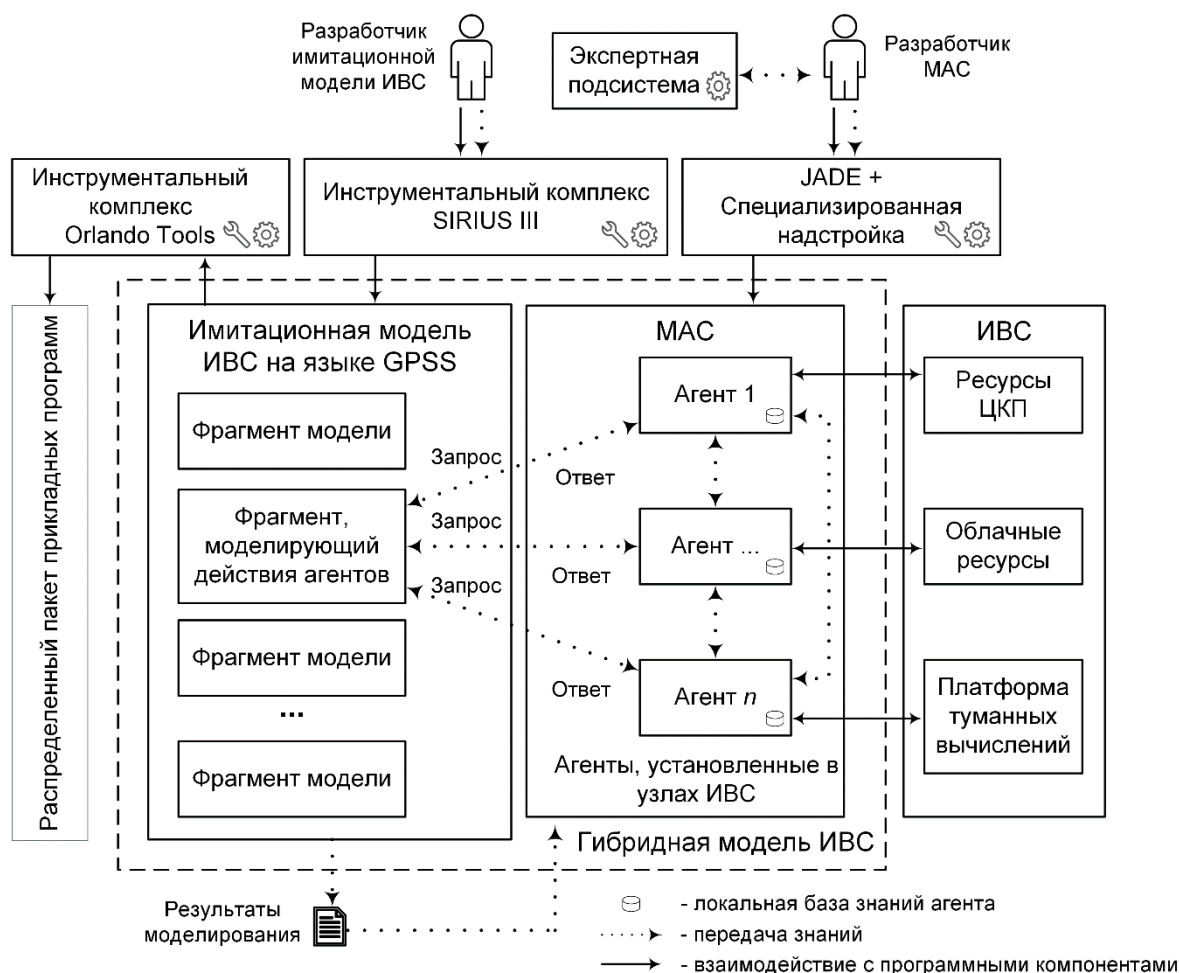


Рисунок 1 – Схема

В рамках предложенной гибридной модели имитационного моделирования GPSS запускается в пакетном режиме. Многовариантные расчеты организуются путем варьирования входных переменных имитационной модели. Запуск экземпляров GPSS с разными вариантами входных данных имитационных моделей на различных ядрах процессоров узлов вычислительной среды осуществляется с помощью скриптов, разработанных в рамках НИР для работы в режиме командной строки с используемыми ОС. Для запуска процесса моделирования на основе многовариантных расчетов формируются вычислительные задания системе управления прохождением заданий (СУПЗ) ЦКП по запуску виртуальных машин (ВМ) с экземплярами GPSS. Совокупность ВМ образует виртуализированную вычислительную инфраструктуру для имитационного моделирования, узлы которой необходимо настроить для работы (выполнить их конфигурирование и развернуть на них управляющее программное обеспечение (ПО), включая агентов, представляющих эти узлы). Построение гибридной модели ИВС на базе GPSS в комбинации с мультиагентной системой обеспечивает параллельное выполнение экземпляров GPSS в любой вычислительной инфраструктуре. Например, автоматический

запуск моделей GPSS возможен через оболочку Cygwin Windows, доступ к которой можно получить по протоколу SSH.

Ручное управление инфраструктурой для конфигурирования узлов замедляет процессы разработки и сопровождения ПО [14, 15]. Использование пользователями вычислительной инфраструктуры собственных скриптов для автоматизации конфигурирования узлов усложняет развитие и обслуживание ПО. В частности, это относится к средствам Parallel SSH для параллельного выполнения скриптов [16]. При этом остается необходимость подготовки и хранения разных версий образов ВМ для разных ОС, версий этих ОС и версий ПО. В этом случае, дисковое пространство быстро исчерпывается. Кроме того, это усложняет сопровождение инфраструктуры в целом.

Таким образом, в рамках НИР формулируются следующие технические и функциональные требования к средствам управления конфигурациями: необходимость поддержки управления широким спектром ОС, возможность контроля настройки узлов вычислительной инфраструктуры, обеспечение простоты и гибкости установки ПО с минимальной настройкой узлов, использование свободно распространяемого ПО, обеспечение инициализации и контроля изменений в узлах (в рамках цепочки непрерывной интеграции ПО), поддержка управления узлами посредством протокола SSH, а также управления периферийными устройствами, используемыми в рамках туманных вычислений.

В рамках НИР проведен всесторонний сравнительный анализ [17] систем управления конфигурациями (англ., System Configuration Management – SCM) с целью выбора базовых средств управления конфигурациями узлов в рамках гибридного имитационного моделирования, а также определения функциональных возможностей, не поддерживаемых этими системами и требующих их дополнительной реализации. В настоящее время известен широкий спектр таких систем [18]. Как правило, они предназначены для автоматизации процессов создания и развертывания вычислительной инфраструктуры с последующей доставкой приложений в ее узлы. Кроме того, такие системы позволяют улучшить как управляемость процессов настройки и сопровождения узлов инфраструктуры, так и их надежность. Однако подготовка и запуск ВМ не поддерживаются в рамках SCM. Данный процесс реализуется средствами гипервизоров или специальными надстройками [19]. SCM осуществляют настройку и подготовку узлов к работе. Таким образом, разработчик программного обеспечения должен сформировать требования к конфигурации узла. В процессе работы узлов доступно отслеживание и корректировка их конфигураций в соответствии с требованиями. Общая схема управления конфигурациями, предложенная в рамках НИР, представлена на рисунке 2.

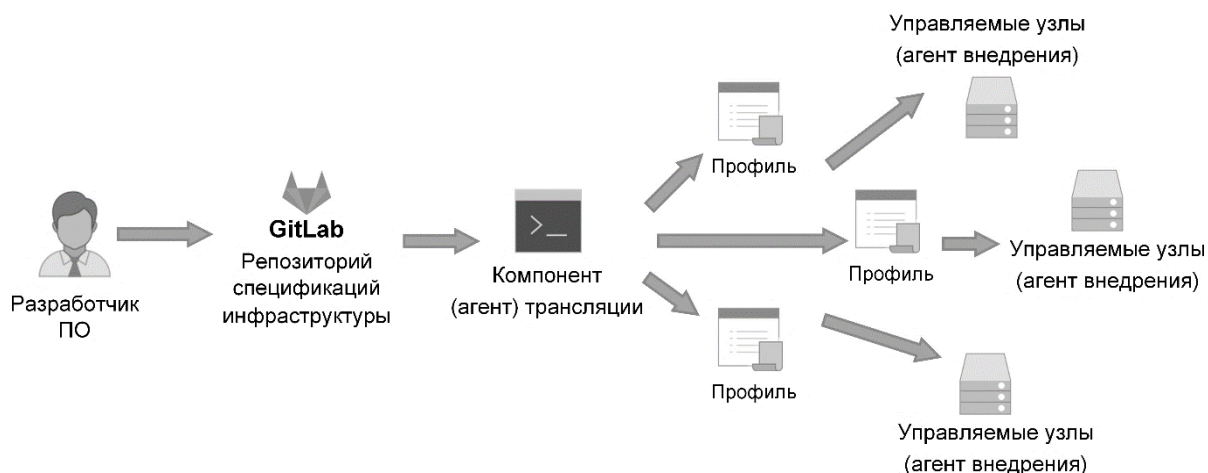


Рисунок 2 – Схема управления конфигурациями

С помощью выполнения специальных скриптов SCM позволяют автоматически привести вычислительную инфраструктуру в целевое состояние. Такие скрипты удобно разрабатывать, модифицировать и поддерживать с помощью систем контроля версий, таких как Git [20] и Mercurial [21]. Разработчик ПО создает и сохраняет в репозитории спецификацию инфраструктуры. Затем компонент (агент) трансляции самостоятельно или по сигналу администратора передает данную спецификацию (профиль) на управляемые узлы. В узлах данные профили представляются в виде набора команд, исполняемых с помощью компонентов (агентов) внедрения. Наиболее популярными SCM являются Puppet [22], Chef [23], Ansible [24] и SaltStack [25]. Их ключевые характеристики в сравнении с системой MAS-SCM, основные компоненты которой разработаны в рамках НИР в [12, 26-29], представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики систем управления конфигурациями

Система	Ansible	Chef	Puppet	SaltStack	MAS-SCM
Архитектура	Безагентная	Клиент-серверная	Клиент-серверная	Безагентная	Мульти-агентная
Мультиплатформенность	+	+	+	+	+
Способ доставки конфигураций	Push	Pull (Push only in the corporate version)	Push, Pull	Pull	Push, Pull (Agent request)
Протокол доставки конфигураций	SSH	RabbitMQ	Mcollective	ZeroMQ	SSH / Jade ACL
Пошаговая установка	+	+	-	-	+
База данных	-	PostgreSQL	PuppetDB	-	MariaDB
Язык разработки	Python	Ruby	C++ & Clojure	Python	Java

Ниже анализируются особенности работы рассматриваемых систем, важные с точки зрения организации гибридного имитационного моделирования.

Архитектура. В рамках клиент-серверной архитектуры агент – это программное обеспечение на стороне узла, которое управляет его конфигурацией в рамках SCM. Безагентная архитектура SCM позволяет управлять узлом без установки дополнительного программного обеспечения через протокол SSH. Наличие специального (проприетарного) агента в SCM ограничивает типы ОС, конфигурациями которых можно управлять. Среди рассматриваемых систем только Ansible является системой с полностью безагентной архитектурой. При этом SaltStack тоже позволяет использовать безагентный режим. Однако он работает значительно медленнее в таком режиме в сравнении с использованием проприетарного протокола. Все системы имеют средства подключения к внешним средствам мониторинга. SaltStack использует собственные средства подобного назначения.

Мультиплатформенность. В рамках выполнения имитационных моделей важным требованием является мультиплатформенность с точки зрения поддержки управления ОС семейств Windows и Linux. Ansible обеспечивает поддержку широкого диапазона ОС на управляющем узле. Теоретически, поддерживаются также любые ОС, имеющие поддержку Python 2.6. SaltStack работает как на Linux, так и на BSD. Управляющие узлы Puppet и Chef работают только на ОС с ядром Linux. Среди них ОС RHEL и SLES, а также последние версии ОС Ubuntu.

Способ и протокол доставки конфигураций. Каждая из рассматриваемых систем использует свой собственный способ доставки (транспортировки) конфигураций из репозитория в узел. В то же время, только Ansible использует SSH (Powershell в Windows) для доставки конфигураций. Теоретически это позволяет управлять любым устройством, поддерживающим SSH, с помощью Ansible.

Пошаговая установка. Только в Ansible и Chef используется пошаговый подход (step-by-step) к настройке узлов. В рамках SCM под пошаговым выполнением понимается последовательное выполнение всех действий, описанных в конфигурационном файле. Данный подход называется императивной конфигурацией. В Puppet и SaltStack используется декларативная конфигурация. Это значит, что конечное состояние узла описывается в конфигурационном файле. При этом система сама выбирает сценарий достижения этого состояния. Декларативная конфигурация является предпочтительной для однотипных серверов. В то же время, императивная конфигурация обеспечивает полный контроль за процессом изменения состояния узла.

Способ доставки изменений в конфигурации от управляющего узла на управляемые узлы. Рассматриваются следующие два способа доставки: Push и Pull. В случае Push, сервер сам отслеживает изменения и при необходимости инициализирует обновление у клиентов. В случае Pull, клиентские агенты периодически опрашивают сервер об обновлениях. Оперативный учет изменений в конфигурациях является важной характеристикой при построении экспериментальной и рабочей вычислительных инфраструктур. В рамках Push, оперативность достигается в доставке конфигураций на узлы. Только Puppet и Ansible поддерживают Push. Chef в данном случае не рассматривается, так как использование Push доступно только в платной версии. В связи с этим, только системы Puppet и Ansible рассматриваются далее в деталях. Обе эти системы имеют средства интеграции с Docker, Kubernetes, и Jenkins, которые активно применяются в рамках CI.

Базы данных. При развертывании систем Chef и Puppet используются системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL и PuppetDB соответственно. Эти СУБД обеспечивают централизованное хранение конфигураций. Производительность и масштабируемость каждой из систем напрямую зависит от используемой СУБД. Кроме того, сервер базы данных требует дополнительного сопровождения. Корпоративная версия Ansible Tower использует PostgreSQL. Дополнительно она допускает установку MongoDB для построения высоконадежных архитектур.

Сравнение Puppet и Ansible. Первым этапом при настройке Ansible является выбор управляющего узла. Таким узлом может быть любой узел, доступный в репозитории пакетов дистрибутива. В рамках этого этапа необходимо установить Ansible и указать перечень IP-адресов управляемых узлов. При этом нет необходимости в настройке клиентского программного обеспечения. Единственным необходимым условием является поддержка доступа по SSH с управляющего узла на управляемые узлы. Схема управления узлами в Ansible представлена на рисунке 3. Описание конфигурации узлов в Ansible представлено в виде PlayBook.

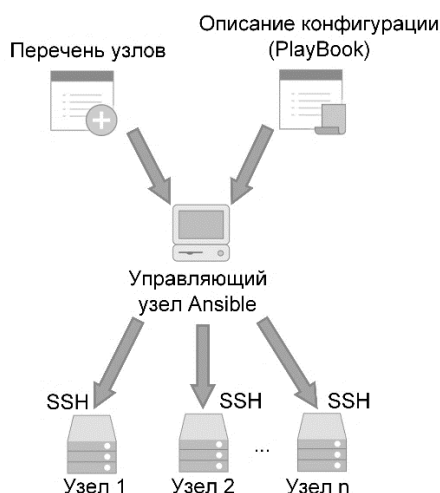


Рисунок 3 – Схема управления узлами в Ansible

Схема управления узлами в Puppet представлена на рисунке 4.

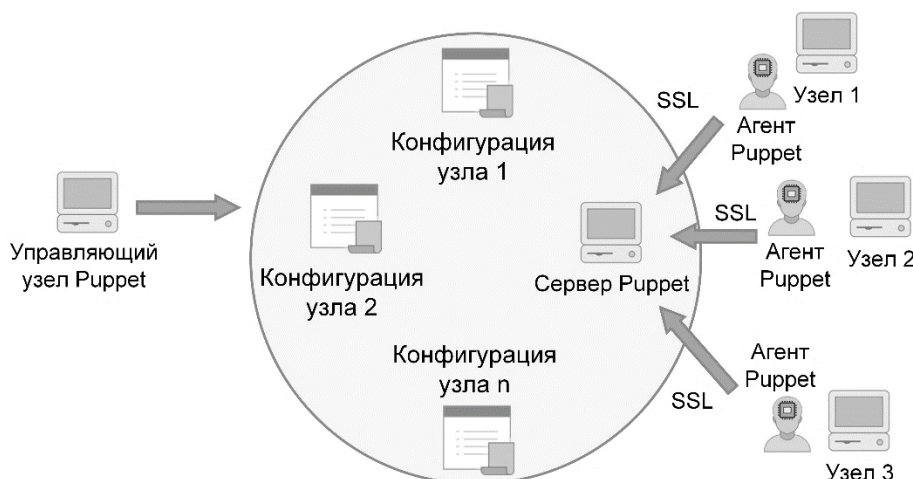


Рисунок 4 – Схема управления узлами в Puppet

Подготовка Puppet для работы происходит сложнее. Во-первых, необходимо синхронизировать время и часовой пояс на всех узлах. Далее, необходимо установить серверное и клиентское ПО. Кроме того, необходимо выполнить следующие операции: настроить конфигурационный файл для каждого управляемого узла на сервере Puppet; открыть порт 8140; перевести службу PuppetServer в рабочий режим; указать IP-адрес сервера и сгенерировать SSL-сертификат на управляемых узлах. Необходимость генерации SSL-сертификата обуславливается тем, что для связи используется протокол HTTPS.

Таблица 2 – Преимущества и недостатки систем Puppet и Ansible

	Puppet	Ansible
Преимущества	Хорошо известный, стабильно развивающийся продукт. Наличие удобного графического интерфейса пользователя. Поддерживает все основные ОС.	Высокая производительность. Безагентная установка и развертывание. Низкие накладные расходы. Использование Python для разработки этой системы. Простота в освоении.
Недостатки	Низкая производительность работы системы, написанной на Ruby (по сравнению с системами, написанными на Python). Необходимость в изучении языка Puppet для описания конфигураций.	Это относительно новая система. Поддержка Windows осуществляется только через PowerShell.

В таблице 2 представлены ключевые преимущества и недостатки систем Puppet и Ansible.

В целом, каждая из систем обладает своими преимуществами и недостатками. Исходя из требований, сформулированных выше, принято решение использовать систему Ansible в качестве базового средства конфигурирования узлов. Это обусловлено следующими ключевыми факторами: поддержкой управления большинством популярных ОС; использованием безагентного подхода, что упрощает подготовку системы к работе; применением императивной конфигурации узлов, обеспечивающей полный контроль за установкой ПО на каждом этапе; бесплатным распространением по лицензии GPLv3+; использованием Push для доставки конфигураций; управлением узлами посредством протокола SSH для любых устройств, поддерживающих данный протокол.

Таким образом, MAS-SCM использует Ansible в качестве базового средства конфигурирования узлов и наследует все ее достоинства. Кроме того, ее архитектура дополнена следующими компонентами, разработанными в рамках НИР: системой агентов, представляющих ресурсы вычислительной инфраструктуры [26-29], API для взаимодействия с этими агентами [12], базой данных для хранения информации о непрерывной интеграции прикладного и системного ПО [30], средствами оценки времени выполнения приложений на основе данных их тестирования в узлах инфраструктуры [31-33]. Данные средства нивелируют отдельные недостатки Ansible и обеспечивают дополнительные преимущества по сравнению с другими SCM.

Экспериментальный анализ. В рамках экспериментального анализа оценивается время, затрачиваемое на подготовку 10 узлов экспериментальной вычислительной инфраструктуры, обеспечивающей проведение имитационного моделирования. Экспериментальная инфраструктура организуется на базе ресурсов ЦКП Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. На пяти узлах установлена ОС Centos 7, на

остальных узлах используется ОС Ubuntu 18.04. В каждой ОС обеспечен беспарольный ключевой доступ по протоколу SSH.

10 VM запускаются на 10 узлах среды с помощью специальной гипервизорной надстройки, разработанной в дополнение к OpenStack [18]. VM запускаются с использованием их образов, подготовленных заранее. Все VM должны быть готовы для развертывания экземпляров исполнительной системы Orlando Tools. При этом веб-сервер Apache, PHP версии 7.2, СУБД Maria DB версии 10 и прочее системное ПО необходимы для работы исполнительной системы.

Для конфигурирования узлов необходимы следующие действия: 1) установка необходимого системного ПО на ресурсы и конфигурирование среды; 2) запуск мультиагентной платформы; 3) запуск агентов на ресурсах и их регистрация; 4) распределение вычислительных работ; 5) развертывание исполняемых файлов на ресурсах агентов; 6) запуск системной части исполнительной системы; 7) запуск модулей; 8) сравнение результатов выполнения модулей. Подготовка вычислительной инфраструктуры осуществляется с использованием MAS-SCM, функционирующей на базе Ansible, или без ее использования. В последнем случае, возможны следующие два сценария: подготовка полностью настроенных образов VM для всех возможных случаев; установка и настройка каждой VM вручную посредством автоматизации установки ПО с помощью параллельного выполнения скриптов с применением Parallel SSH.

Так как хранение настроенных образов VM для всех возможных случаев является нецелесообразным из-за изменчивости требований к версиям ПО и быстрого заполнения имеющегося дискового пространства, первый сценарий не рассматривается.

На рисунке 5 представлена гистограмма, отражающая время конфигурирования одного узла в ручном режиме и с помощью MAS-SCM. Из рисунка видно, что настройка одного узла вручную занимает больше времени на каждом из восьми этапов в сравнении с использованием MAS-SCM.

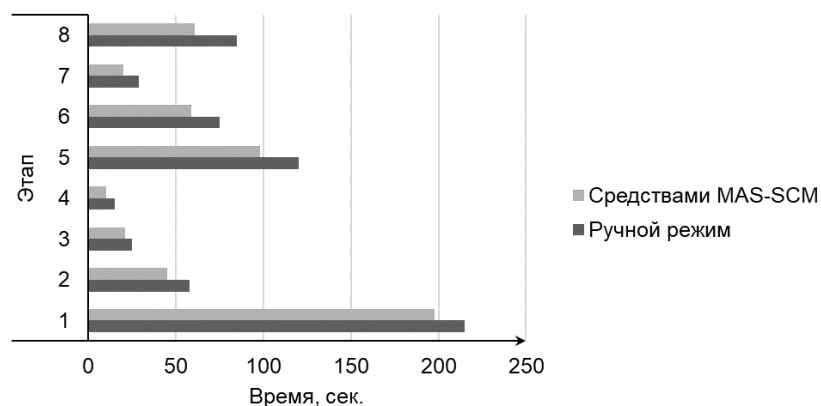


Рисунок 5 – Время конфигурирования одного узла

В целом, автоматизация ручной установки с помощью Parallel SSH позволяет сократить время настройки узлов. При этом необходимо разрабатывать несколько версий таких скриптов для каждой ОС и ее версий. Число таких скриптов растет очень быстро, т. к. для каждого отдельного случая необходимо подготовить соответствующий скрипт, который приведет узел в рабочее состояние. Очевидно, что использование Parallel SSH является неприемлемым при большом числе разнородных конфигураций узлов в экспериментальной среде. Кроме того, использование Parallel SSH может привести к дополнительным ошибкам в разработке, сопровождении и отладке большого числа скриптов.

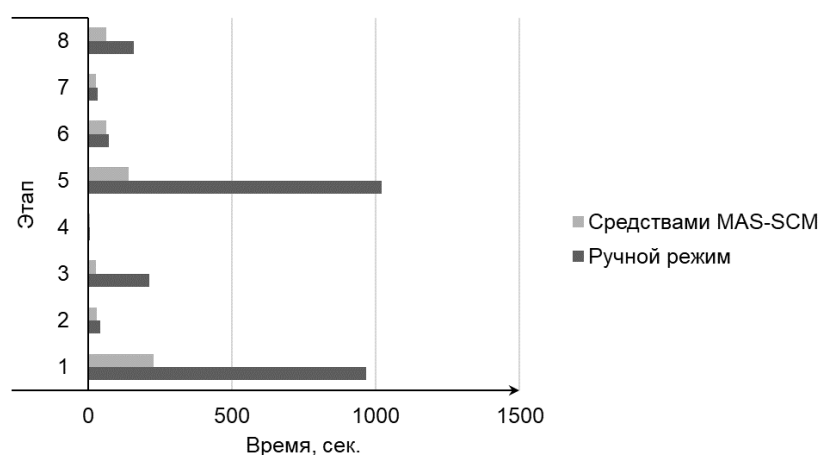


Рисунок 6 – Время конфигурирования десяти узлов

Рисунок 6 демонстрирует значительное уменьшение времени автоматической настройки узлов по сравнению с ручной настройкой с применением Parallel SSH. При этом, небольшое время настройки узлов с помощью скриптов нивелируется сложностью

сопровождения и разворачивания собственных скриптов. При использовании MAS-SCM подобные проблемы отсутствуют.

Использование средств MAS-SCM позволило существенно сократить время конфигурирования узлов для обеспечения работы гибридной имитационной модели. В случае MAS-SCM сокращение времени конфигурирования составляет приблизительно 582 секунды в сравнении с 2624 секундами в ручном режиме. Таким образом, использование MAS-SCM позволяет сократить время конфигурирования более чем в 4 раза по сравнению с ручным режимом настройки узлов.

Новые средства MAS-SCM, разработанные в рамках НИР, позволили существенно расширить функциональные возможности Orlando Tools для непрерывной интеграции прикладного и системного обеспечения распределенных пакетов прикладных программ. Кроме того, средства оценки времени выполнения приложений в MAS-SCM обеспечили смягчение неопределенности при планировании вычислений и распределении ресурсов [31-33].

Новизна и практическая значимость полученных результатов заключаются в создании новых средств разработки и применения агентов, представляющих компоненты ИВС, в процессе ее имитационного моделирования. В отличие от известных средств подобного назначения разработанные инструменты обеспечивают доставку, размещение и настройку агентов в узлах ИВС, конфигурирование требуемого прикладного и системного ПО, а также поддержку запросов GPSS-модели к агентам с помощью специализированного API.

Практическое применение прототипа разработанной гибридной модели ИВС продемонстрировало существенное сокращение сроков подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов по имитационному моделированию ИВС, а также повышение надежности распределенных вычислений [26, 29, 34].

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

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием методов и средств организации и имитационного моделирования распределенных вычислений [12, 32, 33], а также подтверждена результатами практического решения научных и прикладных задач в гетерогенной распределенной вычислительной среде [35, 36].

2) Разработка булевых моделей качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода

Выбор направления исследований. Методы решения задач. Двоичные динамические системы (ДДС) широко используются в биоинформатике [37, 38],

криптографии [39, 40], исследовании отказоустойчивости компьютерных сетей [41, 42] и во многих других предметных областях. В последнее время ДДС (синхронные булевы сети – Boolean network) привлекают значительное внимание в системной биологии, в частности, как модели генетических регуляторных сетей [43]. Методы качественного исследования линейных управляемых ДДС достаточно полно рассмотрены в многочисленных публикациях к настоящему времени. Методам качественного анализа нелинейных управляемых ДДС уделено значительно меньше внимания [44]. В работе [45] предложен метод полутензорного произведения матриц, ориентированный на задачи анализа булевых сетей, а также на задачи управления такими сетями. В работе [46] дан подробный обзор применения этого метода. В работе [47] отмечается полезность этого метода в теоретическом исследовании динамических свойств булевых сетей, а также указывается его главный недостаток, который заключается в экспоненциальной вычислительной сложности: исследование исходной булевой сети с n переменными состояния приводит к необходимости при использовании этого метода оперировать с матрицами размерности $2^n \times 2^n$. Публикации, посвященные вопросам распараллеливания метода полутензорного произведения, отсутствуют. В [48] приведена оценка допустимого значения размерности n ($n < 25$). В работе [43] предложен подход, основанный на идее представления ДДС в полиномиальной форме. Как отмечено в [43], используемое в этом методе вычисление базиса Грёбнера [49] приводит в общем случае к двойной экспоненциальной сложности. Таким образом, сохраняется актуальность разработки и применения других методов исследования ДДС, позволяющих выполнять расчеты в высокопроизводительной гетерогенной вычислительной среде. В работе [50] исполнителей проекта предложен новый логический метод качественного анализа динамических свойств ДДС (метод булевых ограничений) и рассмотрено его применение к автономным системам. Подход к качественному анализу ДДС на основе метода булевых ограничений является декларативным. В соответствии с этим подходом строится модель динамического свойства в виде совокупности ограничений и осуществляется проверка их выполнимости. При исследовании динамики ДДС на конечном интервале времени такие ограничения являются булевыми и записываются на языке булевых уравнений (сведение к SAT задаче) или булевых формул с кванторами (сведение к QSAT задаче). Уникальность построенной булевой модели заключается в том, что в ней содержатся ограничения, описывающие как динамику ДДС, так и спецификацию требуемого свойства. Метод булевых ограничений является достаточно общим методом качественного анализа ДДС на конечном интервале времени. Он применим не только к автономным системам, но и к

разнообразным другим классам двоичных динамических моделей. Целью настоящего этапа проекта является использование этого метода для качественного исследования свойств нелинейных управляемых ДДС.

Понятие управляемости и наблюдаемости относятся к числу фундаментальных понятий общей теории управления [51], в частности и к теории управления ДДС. Управляемость – одно из важнейших свойств системы управления и объекта управления, описывающее возможность перевести систему из одного состояния в другое с помощью подходящего выбора входных сигналов [43, 51]. Наблюдаемость в теории управления – это свойство, определяющее возможность однозначного восстановления информации о состояниях системы по известному на конечном промежутке времени выходу [51, 52]. Проверка выполнимости свойств управляемости, наблюдаемости, а также других динамических свойств ДДС относится к NP-трудным задачам. При решении этих задач проблема сокращения и ускорения перебора является фундаментальной для всех предлагаемых методов. В методе булевых ограничений в силу сведения задач качественного анализа ДДС к задачам булевой выполнимости или проверке истинности квантифицированной булевой формулы, проблема перебора эффективно решается средствами SAT [53] и QSAT [54] решателей. Детальное рассмотрение преимуществ метода булевых ограничений в сравнении с существующими методами качественного исследования ДДС приведено в работах [50, 52, 55].

Программная реализация метода булевых ограничений выполнена на основе микросервис-ориентированного подхода с использованием разработанного ранее пакета прикладных микросервисов (AMP) для решения задач качественного исследования автономных двоичных динамических систем [56]. В рамках проведения исследований по настоящему проекту состав AMP был расширен микросервисами для построения булевых моделей динамических свойств нелинейных управляемых ДДС. Выбранный для реализации подход имеет следующие преимущества. Применение архитектурного стиля микросервисов обеспечивает воспроизводимость, автономность, масштабируемость модулей разрабатываемого приложения, их взаимодействие с помощью облегченного механизма передачи сообщений и лучшую изоляцию сбоев [57]. Децентрализованное управление и управление данными позволяют микросервисам быть независимыми и избегать стандартизации приложения на основе одной технологии [58].

В результате решения задачи на основе логического подхода разработаны булевы модели качественного анализа нелинейных управляемых ДДС [52, 59]:

- модели локальных динамических свойств, свойства периодичности траекторий и следующих свойств типа управляемости: основного свойства управляемости, свойства управляемости относительно пары состояний, свойства полной управляемости;
- модель условия выполнимости свойства k -наблюдаемости.

Разработаны конструктивные методы применения параметризованных двоичных динамических моделей для построения используемых в контуре обратной связи классификаторов двоичных векторов признаков [60].

Разработаны булевы модели условия существования решения задач структурно-параметрического синтеза ДДС с заданным набором динамических свойств [61, 62].

Разработан подход к построению булевых моделей динамических свойств ДДС и исследованию их выполнимости в микросервис-ориентированной гибридной инфраструктуре на основе децентрализованного управления агентами развернутой в ней вычислительной P2P сети [62-64]. При управлении вычислениями используется возможность выделения подсети на основе классификации запроса пользователя по эталонным векторам двоичных признаков [65].

Методика решения задачи. Применение метода булевых ограничений для проверки динамических свойств ДДС включает следующие этапы:

1. Формализация определений динамических свойств на языке логики предикатов с использованием ограниченных кванторов существования и всеобщности. Использование ограниченных кванторов обеспечивает привычный для специалиста по динамике язык спецификации динамического свойства.
2. Преобразование логической формулы свойства к виду, учитывающему уравнения динамики ДДС.
3. Исключение ограниченных кванторов и получение формулы свойства в прикладной логике предикатов с неограниченными кванторами.

В результате последовательного выполнения этих трех этапов модель динамического свойства ДДС формируется в виде булевого ограничения (булева уравнения или квантифицированной булевой формулы). Проверка выполнимости свойства для ДДС сводится к задаче разрешимости булева ограничения с помощью современных SAT и QSAT решателей. В силу того, что в последние годы наблюдается существенный рост производительности специализированных алгоритмов решения SAT и QSAT задач (за счет применения эффективных эвристик и глубокого распараллеливания

вычислительного процесса), общее количество переменных в модели динамического свойства может измеряться тысячами.

Теоретические исследования. Построение булевых моделей нелинейных ДДС с помощью метода булевых ограничений. Рассматривается нелинейная ДДС вида

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

где $t \in T = \{1, 2, \dots, k\}$ – дискретное время (номер такта), $x \in B^n$ – n -мерный вектор состояния, $B = \{0, 1\}$; $u \in B^m$ – m -мерный вектор управления; $F(x, u)$ – векторная функция алгебры логики, называемая функцией переходов ($F : B^n \times B^m \rightarrow B^n$).

Для каждого состояния $x^0 \in B^n$, называемого начальным состоянием и любой конечной последовательности $u^* = (u^0, u^1, \dots, u^{k-1})$ состояний вектора управления ($u^t \in B^m$, $t = 0, 1, 2, \dots, k-1$) определим траекторию $x(t, x^0, u^*)$ 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. Дело в том, что при качественном анализе поведения траекторий системы (1) практический интерес представляет вопрос о том, что можно сказать о выполнимости какого-либо динамического свойства при фиксированном, не слишком большом k .

Для k -шаговых переходов система булевых уравнений (1) с начальным состоянием x^0 и управляющим воздействием u^* эквивалентна одному булеву уравнению вида

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

где x_i^t – i -тая компонента вектора x^t , \oplus – операция сложения по модулю 2, F_i – i -тая компонента вектора F . Общее количество переменных в уравнении (2) равно $(k+1)n + km$.

При $k = 1$ (рассматриваются только одношаговые переходы) уравнение (2) принимает вид

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

Решения этого уравнения определяют нагруженный направленный граф (диаграмму переходов), состоящий из 2^n вершин, отмеченных одним из 2^n состояний множества B^n . Вершины x^0 и x^1 графа соединены дугой, помеченной состояниями входа $u^0 \in B^m$ и направленной от состояния x^0 к состоянию x^1 . Представление поведения системы (1) в виде диаграммы переходов весьма наглядно (например, при

построении траекторий и исследовании их свойств), но практически реализуемо лишь для небольших размерностей n и m векторов состояния и управления. С учетом (3) уравнение (2) запишем в виде

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

который более эффективен с точки зрения вычислительного алгоритма перехода от системы булевых уравнений (1) к одному булеву уравнению (2).

Если управляющее воздействие u^* постоянно на всем интервале изменения времени t , то качественный анализ динамических свойств системы (1) аналогичен качественному анализу автономных ДДС [50]. Отсутствие такого ограничения на u^* приводит к расширению списка динамических свойств, интересных для специалиста по динамическому анализу управляемых ДДС.

Булевы модели локальных свойств. При исследовании локальных свойств учитываются только одношаговые переходы, определяемые булевым уравнением (3). К таким свойствам относятся: ветвление состояния (наличие непосредственных предшественников), выявление последователей состояния, выявление равновесных состояний (точек покоя системы (1)), управляемость системы (1) за один шаг. Все эти свойства определяются путем задания ограничений на начальное состояние x^0 и следующее за ним состояние x^1 в булевом уравнении (3).

Состояние x^1 в (3) будем называть последователем состояния x^0 , а x^0 – предшественником состояния x^1 . Как последователи, так и предшественники зависят от значения вектора управления $u^0 \in B^m$. В ДДС с управляющими входами каждое состояние может иметь от одного до 2^m последователей, а число предшественников может изменяться от нуля до величины $2^n - 1$.

Все непосредственные предшественники x^0 состояния $x^1 = c$ определяются решениями (относительно x^0 и u^0) булева уравнения

$$L(x^0, x^1, u^0) \Big|_{x^1=c} = 0, \quad (5)$$

Здесь и далее ограничения в виде равенства двух булевых векторов y, z размерности n заменяется на равносильное булево уравнение

$$E(y, z) = \bigvee_{i=1}^n (y_i \bar{z}_i \vee \bar{y}_i z_i) = 0.$$

С учетом такой замены уравнение (5) приводится к виду

$$L(x^0, x^1, u^0) \vee E(x^1, c) = 0.$$

В множестве решений (если они существуют) каждому состоянию вектора x^0 может соответствовать несколько состояний вектора управления u^0 , и наоборот каждому состоянию вектора управления u^0 может быть поставлено в соответствие несколько состояний вектора x^0 . Если уравнение (5) не имеет решений, то предшественники состояния $x^1 = c$ отсутствуют.

Последователи x^1 любого состояния $x^0 = c$ находятся путем решения булева уравнения

$$L(x^0, x^1, u^0) \Big|_{x^0=c} = 0. \quad (6)$$

Состояние x^0 называется равновесным состоянием, если выполняется условие $x^1 = x^0$. Все равновесные состояния (если они существуют), определяются решениями булева уравнения

$$L(x^0, x^1, u^0) \Big|_{x^1=x^0} = 0. \quad (7)$$

В отличие от автономных ДДС будем различать состояния независимого и условного равновесия. Состояние x^0 называется состоянием независимого равновесия, если оно является равновесным для любого $u^0 \in B^m$. В противном случае такое состояние будем называть состоянием условного (т.е. зависящего от u^0) равновесия. Исследование вопроса существования независимых равновесных состояний возможно путем проверки истинности квантифицированной булевой формулы (задача QSAT)

$$\exists x^0 \forall u^0 \bar{L}(x^0, x^1, u^0) \Big|_{x^1=x^0}. \quad (8)$$

Важное локальное свойство характеризуется вопросом: существует ли по крайней мере одно входное воздействие u^0 , которое за один шаг переводит состояние $x^0 = c^0$ в заданное состояние $x^1 = c^*$. Условие такого перевода эквивалентно разрешимости уравнения

$$L(x^0, x^1, u^0) \Big|_{\substack{x^0=c^0 \\ x^1=c^*}} = 0. \quad (9)$$

Булева модель свойства периодичности траекторий. Траектория x^0, x^1, \dots, x^k ($k \geq 2$) называется периодической траекторией длины k (или циклом длины k), если состояния x^0, x^1, \dots, x^{k-1} отличны друг от друга и $x^k = x^0$. Циклические последовательности длины k (если они существуют) являются решениями булева уравнения

$$\Phi^*(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) = \Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \Big|_{x^k=x^0} \vee \vee R(x^0, x^1, \dots, x^{k-1}) = 0 \quad (10)$$

где $R(x^0, x^1, \dots, x^{k-1}) = \vee_{\substack{1 \leq q \leq k-1 \\ k \bmod q = 0}} \wedge_{i=1}^n y_i^{0q} = 0, (y_i^{0q} = x_i^0 x_i^q \vee \overline{x_i^0 \overline{x_i^q}})$ – условие попарного различия множества состояний S цикла длины k . Множество S является инвариантным множеством фазового пространства B^n динамической системы (1). При $k = 1$ уравнение (10) приобретает вид (7) – условие существования равновесных состояний, которые являются циклами единичной длины.

Аналогично равновесным состояниям, введем понятие независимого и условного циклов. Траектория $x^0, x^1, \dots, x^k = x^0$ называется независимым циклом, если переход из любого текущего состояния цикла x^t в следующее состояние цикла x^{t+1} может быть выполнен при любом $u^t \in B^m$. В противном случае цикл называется условным. Условие существования независимого цикла эквивалентно истинности квантифицированной булевой формулы:

$$\exists x^0, x^1, \dots, x^k \forall u^0, u^1, \dots, u^{k-1} \overline{\Phi^*(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1})} \Big|_{x^k=x^0} \quad (11)$$

Если ни одно из состояний цикла не имеет предшественников, не принадлежащих множеству S , то такой цикл называется изолированным. Пусть состояния множества S определяются решениями булева уравнения $G^c(s) = 0$. Тогда несложно показать, что условием изолированности цикла является отсутствие нулей у следующего булева уравнения:

$$G^c(s) \vee L(x^0, x^1, u^0) \Big|_{x^1=s} \vee \overline{G^c(x^0)} = 0. \quad (12)$$

Решения уравнения (12) (если они существуют) определяют состояния цикла, имеющие предшественников, не принадлежащих множеству S . Неизолированные равновесные состояния (циклы единичной длины) и циклы длины $k \geq 2$ называются аттракторами.

Рассмотренные выше понятия независимых и условных циклов относятся к классу так называемых циклов простой топологической структуры (циклов типа «кольцо»), аналогичных циклам в автономных ДДС. Если в уравнении (10) убрать ограничение R попарного различия множества состояний цикла, то в системе (1) могут быть выявлены циклы более сложных, чем «кольцо» конфигураций («звезда», «змейка» и др.).

Булевы модели свойств типа управляемости. Как отмечается в [51], при рассмотрении структурно-качественной стороны управляемости интересуются принципиальной возможностью перехода управляемой системы из одного заданного множества состояний в другое заданное множество состояний, как правило, за конечное время. Свойство управляемости можно рассматривать как разновидность свойства достижимости, когда достижимость обеспечивается за счет выбора соответствующей управляющей последовательности.

Пусть $X^0, X^* \subset B^n$ - соответственно множества начальных и целевых состояний ($X^0 \cap X^* = \emptyset$), элементы которых определяются нулями булевых уравнений $G^0(x) = 0$ и $G^*(x) = 0$ или характеристическими функциями этих множеств $\overline{G}^0(x)$ и $\overline{G}^*(x)$. Рассмотрим некоторые свойства типа управляемости и соответствующие этим свойствам булевы ограничения.

Булева модель основного свойства управляемости. Основное свойство управляемости относительно множеств X^0 и X^* формулируется следующим образом: любая траектория, выпущенная из множества начальных состояний X^0 , достигает за счет выбора соответствующей управляющей последовательности u^* целевого множества X^* . С использованием ограниченных кванторов существования и всеобщности логическая формула этого свойства имеет вид:

$$(\forall x^0 \in X^0)(\exists u^*)(\exists t \in T)(x(t, x^0, u^*) \in X^*).$$

Избавимся от ограниченных кванторов и учтем уравнение динамики функционирования ДДС (2). Получим следующую булеву модель выполнимости основного свойства управляемости в формате квантифицированной булевой формулы:

$$(\forall x^0)(\exists x^1, x^2, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \\ (G^0(x^0) \vee \overline{\Phi}_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \wedge (\bigvee_{t=1}^k \overline{G}^*(x^t)))', \quad (13)$$

где $\overline{\Phi}_k$ - характеристическая функция множества состояний траектории $x(t, x^0, u^*)$ для $t = 0, 1, 2, \dots, k$. Если формула (13) истинна, то система (1) управляема относительно множеств X^0, X^* .

Булева модель свойства управляемости относительно пары состояний. Важное практическое значение имеет частный случай основного свойства управляемости, когда X^0 и X^* являются одноточечными множествами: $X^0 = \{c^0\}$, $X^* = \{c^*\}$, где c^0, c^* наперед заданные состояния из B^n . Необходимо синтезировать такое управление u^* , которое переводит систему (1) из начального состояния $x^0 = c^0$ в целевое состояние за k шагов, т.е. $x^k = c^*$. Необходимое управление $u^* = (u^0, u^1, \dots, u^{k-1})$ (если оно существует) является решением булева уравнения

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \Big|_{\substack{x^0=c^0 \\ x^k=c^*}} = 0. \quad (14)$$

Как отмечается в [66], эта задача в настоящее время относится к числу одних из важнейших задач исследования динамики поведения управляемых генных регуляторных сетей, представленных дискретной по времени и состоянию системой (1). С теоретической точки зрения модель (1) является существенно нелинейной и к ней неприменимы существующие методы линейной теории управления. С практической точки зрения найденное управление может быть полезно при создании лекарственных средств для лечения заболеваний.

Булева модель свойства полной управляемости. Если каждая пара состояний из множества B^n управляема, то такое свойство называется полной управляемостью. Логическая спецификация этого свойства записывается в виде:

$$(\forall x^0, c^* : x^0 \neq c^*) (\exists u^*) (x(t=k, x^0, u^*) = c^*).$$

С учетом ограничения (2) получим следующее высказывание в виде квантифицированной булевой формулы:

$$(\forall x^0, c^*) (\exists x^1, x^2, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) (E(x^0, c^*) \vee \overline{\Phi}_k(x^0, x^1, \dots, x^k, u^0, u^1, \dots, u^{k-1}) \wedge \overline{E}(x^k, c^*)) \quad (15)$$

В этом свойстве мы имеем дело с задачей QSAT, т.е. если высказывание (15) истинно, то выполнимость свойства полной управляемости установлена.

Несложно построить булевы модели и для других свойств типа управляемости, например, при наличии ограничений на управляющую последовательность u^* , ограничений на множество допустимых состояний $X^1 \subset B^n$ траектории $x(t, x^0, u^*)$, ограничений перевода системы из одного состояния в другое по заданной в дискретном времени программной траектории и других ограничений.

Булева модель условия выполнения свойства k-наблюдаемости. Рассматривается нелинейная ДДС вида

$$x^{t+1} = F(x^t, u^t), \quad y^t = H(x^t). \quad (16)$$

где $x \in B^n$ – вектор состояния, $B = \{0,1\}$; $u \in B^m$ – вектор входа (управления); $y \in B^l$ – вектор выхода; n, m, l – размерности векторов состояния, входа и выхода соответственно; $t \in T = \{0,1,2,\dots,k-1\}$ – дискретное время (номер такта); $F(x, u), H(x)$ – векторные функции алгебры логики, называемые функцией переходов и функцией выхода соответственно ($F: B^n \times B^m \rightarrow B^n, H: B^n \rightarrow B^l$).

Для каждого состояния $x^0 \in B^n$, называемого начальным состоянием и любой конечной последовательности $u^* = [u^0, u^1, \dots, u^{k-1}]$ состояний вектора управления определим для системы (16) траекторию $x(t, x^0, u^*)$ и выходную функцию $y(t, x^0, u^*)$ как конечные последовательности состояний $[x^0, x^1, \dots, x^k]$ и $y^* = [y^0, y^1, \dots, y^{k-1}]$ из множеств B^n и B^l соответственно. Последовательность $[x^1, \dots, x^k]$ в дальнейшем будем обозначать через x^* . Необходимо проверить для системы (16) выполнимость свойства k-наблюдаемости, а именно [66]: для любых двух различных состояний x_0, \tilde{x}_0 существует входная последовательность u^* длины k такая, что соответствующие выходные последовательности не совпадают ($y^* \neq \tilde{y}^*$).

При $k = 1$ (рассматриваются только одношаговые переходы) система (16) с начальным состоянием x^0 и входным воздействием $u^* = [u^0]$ эквивалентна одному булеву уравнению вида

$$L(x^0, x^1, u^0, y^0) = \bigvee_{i=1}^n (x_i^1 \oplus F_i(x^0, u^0)) \vee \bigvee_{i=1}^l (y_i^0 \oplus H_i(x^0)) = 0.$$

где x_i^t, y_i^t ($t=0,1$) - i -тые компоненты векторов x^t, y^t ; F_i, H_i - i -тые компоненты вектор-функций F, H, \oplus - операция сложения по модулю 2.

Для многошаговых переходов ($k > 1$) система (16) соответственно эквивалентна булеву уравнению

$$\Phi(x^0, x^*, u^*, y^*) = \bigvee_{t=0}^{k-1} L(x^t, x^{t+1}, u^t, y^t) = 0. \quad (17)$$

Для начального состояния \tilde{x}^0 уравнение (2) приобретает вид

$$\tilde{\Phi}(\tilde{x}^0, \tilde{x}^*, u^*, \tilde{y}^*) = \bigvee_{t=0}^{k-1} L(\tilde{x}^t, \tilde{x}^{t+1}, u^t, \tilde{y}^t) = 0. \quad (18)$$

Согласно метода булевых ограничений запишем формальное определение k -наблюдаемости ДДС на языке прикладной логики предикатов с ограниченными кванторами:

$$(\forall x^0, \tilde{x}^0 : x^0 \neq \tilde{x}^0)(\exists u^*)(\exists t \in T)y(t, x^0, u^*) \neq y(t, \tilde{x}^0, u^*).$$

Избавимся от ограниченных кванторов существования и всеобщности и учтем уравнения динамики функционирования ДДС (17, 18) для различных начальных условий. Получим следующую булеву модель выполнимости свойства k -наблюдаемости в виде квантифицированной булевой формулы:

$$(\forall x^0, \tilde{x}^0)(\exists x^*, \tilde{x}^*, u^*, y^*, \tilde{y}^*)(\overline{E}(x^0, \tilde{x}^0) \vee \overline{\Phi}(x^0, x^*, u^*, y^*) \wedge \overline{\Phi}(\tilde{x}^0, \tilde{x}^*, u^*, \tilde{y}^*) \wedge (\bigvee_{t=0}^{k-1} E(y^t, \tilde{y}^t))) \quad (19)$$

где функция E с соответствующими аргументами удовлетворяет следующему булевому ограничению:

$$E(z^1, z^2) = \bigvee_{i=1}^p (z_i^1 \wedge \overline{z}_i^2 \vee \overline{z}_i^1 \wedge z_i^2) = 0,$$

эквивалентному условию равенства двух булевых векторов z^1 и z^2 размерности p . Общее количество предметных переменных в формуле (19) равно $2k(n + t + l) + 2n$.

Булевы модели условия существования решения задач синтеза ДДС с заданными динамическими свойствами. Синтез ДДС с заданной периодической траекторией. Цикличность является основным режимом функционирования большого числа объектов. В связи с этим возникает необходимость синтеза дискретных управляющих устройств, обеспечивающих заданные параметры цикличности.

Решение задачи синтеза ДДС, фазовый портрет которой содержит только одну заданную периодическую траекторию, обладающую свойством притяжения [50], рассматривается в рамках трех классов динамических моделей вида

$$X(t+1) = A \otimes X(t) \circ U, X(0) = x^0, \quad (20)$$

где $t = 0, 1, 2, \dots$ - дискретное время, $X(t) = \text{col}(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ - вектор состояния, $X(t) \in B^n, B = \{0, 1\}, B^n$ - пространство состояний системы (1), $U = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_n)$ - постоянный двоичный вектор управления, A - двоичная матрица размерности $n \times n$, \otimes - символ операции умножения матрицы на вектор, который может принимать три значения: $*$, ∇ , Δ - булево, конъюнктивное и дизъюнктивное умножение соответственно, а символ \circ означает операцию покомпонентного сложения по модулю 2, дизъюнкции и конъюнкции двух булевых векторов в зависимости от значения операции \otimes .

Определим каждую из перечисленных операций следующим образом:

$$(A * X)_i \circ U_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \wedge x_j) \oplus u_i$$

$$(A \Delta X)_i \circ U_i = \bigvee_{j=1}^n (a_{ij} \wedge x_j) \vee u_i$$

$$(A \nabla X)_i \circ U_i = \bigwedge_{j=1}^n (a_{ij} \vee x_j) \wedge u_i$$

где символы \sum, \wedge, \vee означают булевы операции сложения по модулю два, конъюнкции и дизъюнкции. Операция $*$ определяет линейную ДДС, операция ∇ - ДДС с дизъюнктивной правой частью, а операция Δ - ДДС с конъюнктивной правой частью. Для кратности изложения вектор состояния $X(t)$ будем записывать как $x^t, t = 0, 1, 2, \dots$

Циклическую траекторию длины m зададим как последовательность состояний $C = (c^1, \dots, c^m)$ так, что из состояния c^i система (1) переходит в состояние c^{i+1} ($i = \overline{1, m-1}$), а из состояния c^m осуществляется переход в состояние c^1 .

Требуется для системы (1) найти матрицу A^* и вектор управления U^* такие, чтобы система

$$X(t+1) = A^* \otimes X(t) \circ U^*$$

имела единственную циклическую траекторию C и для любого состояния $x^0 \in B^n$ переходила в одно из состояний множества C за один шаг, то есть выполнялось условие

$$x^1 = A^* \otimes x^0 \circ U^* \in C.$$

В этом случае x^0 выполняет роль управляющего параметра, обеспечивающего запуск циклической траектории заданного состояния. Построение булевой модели, выполнимость которой определяет условие существования решения задачи синтеза ДДС с

заданной периодической траекторией, а также нахождение конструктивного решения этой задачи подробно рассмотрены в работе [62], выполненной в рамках исследований по проекту в текущем году. Синтезированные в данной работе ДДС можно отнести к так называемым распределителям сигналов, т.к. образуемая на выходах ДДС последовательность состояний (сигналов) применима в биологических приложениях, в системах управления промышленными роботами, в системах коррекции походки человека и др.

Синтез характеристической матрицы ДДС, обладающей заданным множеством одноточечных аттракторов и одношаговой динамикой достижения этого множества из любого состояния. Выбор параметров динамической модели булевой сети, обладающей заданным набором свойств, представляет одну из ключевых задач моделирования процессов регуляции генов с помощью сетевых моделей. В качестве одного из таких свойств во многих случаях выступает требуемый набор одноточечных аттракторов булевой сети, величина бассейна аттракторов и максимальное время достижения аттрактора из начального состояния сети. Логический метод решения этой задачи основан на записи условия его существования в виде формулы на языке логики предикатов с ограниченными кванторами существования и всеобщности. Параметры динамической модели выбираются исходя из этого формального требования путем решения задачи проверки истинности квантифицированной булевой формулы с одновременным построением конструктивного решения задачи параметрического синтеза. Процессы построения булевой модели, выполнимость которой определяет условие существования решения этой задачи, и получения конструктивного решения при выполнении условия приведены в работе [61].

Применение параметризованных двоичных динамических моделей в задаче классификации булевых векторов. Суть методов, основанных на применении динамических моделей, состоит в том, что запоминаемые эталонные объекты являются равновесными состояниями динамической модели, а классы представляют области притяжения соответствующих равновесных состояний. Процесс настройки динамической модели заключается в подборе таких значений ее параметров, которые обеспечивают наличие в модели требуемого множества равновесных состояний (аттракторов) с заданными количественными характеристиками их областей притяжения (бассейнов), а также требуемой динамики функционирования модели. В [60] рассмотрено применение этого подхода в задаче классификации булевых векторов признаков на основе параметризованных двоичных динамических моделей. Использование таких моделей

определяет новизну нашего подхода. Булевы вектора признаков, которые нужно отнести к тому или иному классу, являются начальными условиями для ДДС. Результатом работы классификатора является равновесное состояние, к которому сходится траектория с заданными начальными условиями. Если это равновесное состояние принадлежит множеству эталонных булевых векторов, то задача классификации имеет положительное решение. В противном случае входной двоичный вектор признаков не принадлежит ни одному из предопределенных классов. Преимущества предложенного метода состоят в простоте настройки двоичной динамической системы на заданное множество эталонных векторов и высокой скорости классификации входного двоичного вектора. Подобный классификатор разработан в рамках проведения исследований по проекту в работе [65]. В этой работе рассматривается практическая задача применения такого классификатора для управления вычислениями при выборе подсети вычислительной P2P сети агентов в соответствии с запросом пользователя. В работе приводятся классы задач, решаемых на вычислительной P2P сети, представленные эталонными векторами, сформированными на основе двоичных признаков. Детально система двоичных признаков, классы решаемых задач и процесс выбора вычислительной подсети с использованием классификатора приведены в [65].

Программная реализация построения булевых моделей. Программная реализация предложенного подхода к качественному анализу рассматриваемого динамического свойства на основе метода булевых ограничений выполнена с использованием пакета прикладных микросервисов [56], реализованного на основе фреймворка HPCSOMAS [68].

Пакет прикладных микросервисов предоставляет следующие средства автоматизации решения задач качественного анализа и структурно-параметрического синтеза ДДС:

- построение булевых моделей динамического свойства автономных и управляемых ДДС;
- решение отдельной задачи качественного анализа ДДС (проверки выполнимости динамического свойства);
- решение комплексных задач качественного анализа ДДС, включающих выполнение ряда отдельных задач с чередованием построения булевых моделей и проверки их выполнимости;
- графическую и табличную визуализацию полученных результатов.

Средства построения моделей нелинейных управляемых ДДС, реализованные в виде микросервисов с помощью инструментария [64], разработаны и включены в АМР. Перечисленные выше средства АМР структурированы в виде отдельных комплексов (процессоров) пакета. Доступ к комплексам выполняется через агента пользователя User Dew agent [63], экспериментальный прототип которого также реализован в процессе выполнения исследований текущего этапа проекта.

Для проверки локальных свойств, свойств периодичности траекторий, свойств типа управляемости и свойства наблюдаемости используются комплексы построения булевых моделей и качественного анализа управляемых ДДС. Для приведения булевых выражений в моделях динамических свойств к КНФ применяются преобразование Цейтина [69], преобразование Плейстеда-Гринбаума [70] и преобразование булева уравнения АНФ=0 к виду КНФ=1 [71].

Для решения задач булевой выполнимости и проверки истинности квантифицированной булевой формулы в АМР используются вычислительные микросервисы, реализованные на основе SAT решателя Minisat, AllSAT решателя nbc_minisat_all-1.0.2 [72] и QSAT решателя DepQBF [73]. Разработка соответствующих специализированных параллельных решателей, ориентированных на высокую размерность вектора состояния ДДС, представляет собой задачу следующего этапа исследований по текущему проекту.

Экспериментальные исследования. Иллюстративные примеры. Приведены эксперименты, позволяющие достаточно просто проверить предложенную методику анализа динамических свойств нелинейных управляемых ДДС на иллюстративных примерах. Рассмотрим булеву сеть [67] с управляющими входами, уравнение динамики которой имеет вид ($n=3, m=2$):

$$x_1^t = \overline{u_1^{t-1}}, \quad x_2^t = x_1^{t-1} \cdot u_2^{t-1}, \quad x_3^t = x_1^{t-1} \vee x_2^{t-1}. \quad (21)$$

где точка и символ « \vee » означают операции конъюнкции и дизъюнкции соответственно. Выпишем булево уравнение для одношаговых переходов ($k=1$):

$$L(x^0, x^1, u^0) = \overline{x_1^1} \cdot \overline{u_1^0} \vee x_1^1 \cdot u_1^0 \vee \overline{x_2^1} \cdot x_1^0 \cdot u_2^0 \vee x_2^1 \cdot x_1^0 \vee x_2^1 \cdot \overline{x_1^0} \vee x_2^1 \cdot u_2^0 \vee \overline{x_3^1} \cdot x_1^0 \vee \overline{x_3^1} \cdot x_2^0 \vee x_3^1 \cdot \overline{x_1^0} \cdot \overline{x_2^0} = 0 \quad (22)$$

Решения этого уравнения определяют диаграмму переходов системы (21), представленную на рис. 7.

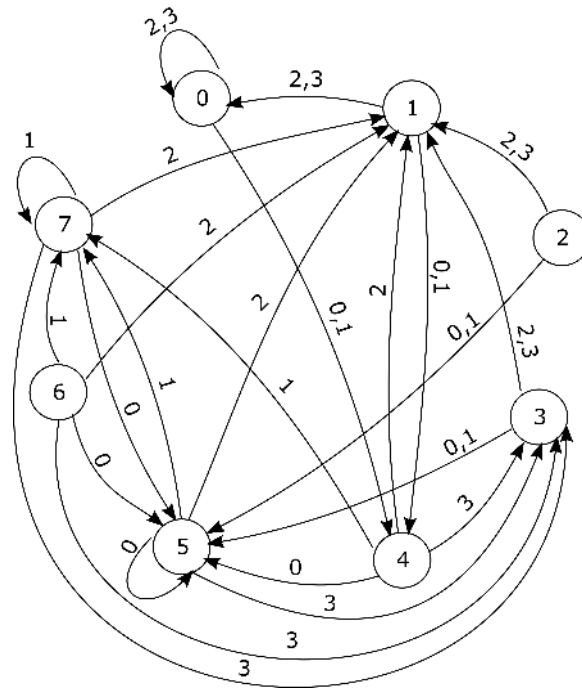


Рисунок 7 – Диаграмма переходов системы (21)

Двоичные вектора $x = (x_1, x_2, x_3)$, $u = (u_1, u_2)$ на рисунке 7 закодированы целыми числами $x = x_3 + 2x_2 + 4x_1$, $u = u_2 + 2u_1$.

Проверка локальных свойств. Пусть $x^1 = (001)$ – состояние с номером 1. Решим уравнение (22) относительно неизвестных x^0, u^0 . Получим следующих предшественников первого состояния: $2(2, 3)$, $3(2, 3)$, $4(2)$, $5(2)$, $6(2)$, $7(2)$. Здесь и далее в скобках указываются управляющие воздействия, при которых происходит соответствующий переход. Множество последователей состояния с номером 1 включает два состояния: $0(2, 3)$, $4(0,1)$.

В системе (21) путем решения уравнения (7) выявлено три состояния условного равновесия: $0(2, 3)$, $5(0)$, $7(1)$. Путем решения задачи (8), показано, что состояния независимого равновесия в системе (21) отсутствуют.

Для $x^0 = (001)$ и $x^1 = (101)$ уравнение (9) неразрешимо, что говорит об отсутствии управляющего воздействия u^0 , которое за один шаг переводит состояние x^0 в состояние x^1 .

Проверка свойства периодичности траекторий. Для $k=2$ согласно (4) имеем

$$\Phi_2(x^0, x^1, x^2, u^0, u^1) = L(x^0, x^1, u^0) \vee L(x^1, x^2, u^1) = 0.$$

Путем решения уравнений (10, 12) найдено пять условных неизолированных циклов длины 2: $1(0) \rightarrow 4(2) \rightarrow 1(0)$, $1(1) \rightarrow 4(2) \rightarrow 1(1)$, $3(0) \rightarrow 5(3) \rightarrow 3(0)$, $3(1) \rightarrow 5(3) \rightarrow 3(1)$, $5(1)$

→7(0) →5(1). Независимые циклы в системе (1) отсутствуют (высказывание (11) является ложным).

Проверка свойства управляемости. Пусть $X^0 = \{(000), (001)\}$, $X^* = \{(100), (011)\}$, $k=2$. Высказывание (13) является истинным, что говорит об управляемости относительно множеств X^0, X^* .

Пусть $c^0 = (001)$, $c^* = (011)$. Для $k=2$ пара состояний c^0, c^* система (21) управляема с $u^* = (00)$, (11) и $u = (01)$, (11), которые являются решением уравнения (14).

Высказывание (15) ложно, т.е. система (21) не обладает свойством полной управляемости.

Проверка свойства k-наблюдаемости. Рассмотрим следующую управляемую ДДС ($n=3, m=1, l=1$):

$$\begin{aligned}
 x_1^{t+1} &= x_2^t \wedge \bar{x}_3^t \vee \bar{x}_2^t \wedge x_3^t \\
 x_2^{t+1} &= x_1^t \wedge \bar{u}^t \vee \bar{x}_1^t \wedge u^t \\
 x_3^{t+1} &= x_2^t \\
 y^t &= x_1^t \wedge \bar{x}_2^t \wedge \bar{x}_3^t \vee \bar{x}_1^t \wedge x_2^t \wedge \bar{x}_3^t \vee \bar{x}_1^t \wedge \bar{x}_2^t \wedge x_3^t \vee x_1^t \wedge x_2^t \wedge x_3^t
 \end{aligned} \tag{23}$$

Система (23) эквивалентна следующему уравнению одношагового перехода:

$$\begin{aligned}
 L(x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_1^1, x_2^1, x_3^1, u^0, y^0) &= x_1^1 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \vee \bar{x}_1^1 \wedge x_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \vee x_1^1 \wedge x_2^0 \wedge x_3^0 \vee \\
 &\vee \bar{x}_1^1 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge x_3^0 \vee x_2^1 \wedge \bar{x}_1^0 \wedge \bar{u}^0 \vee \bar{x}_2^1 \wedge x_1^0 \wedge \bar{u}^0 \vee \bar{x}_2^1 \wedge \bar{x}_1^0 \wedge u^0 \vee x_2^1 \wedge x_1^0 \wedge u^0 \vee \\
 &\vee \bar{x}_3^1 \wedge x_2^0 \vee x_3^1 \wedge \bar{x}_2^0 \vee \bar{x}_1^0 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge x_3^0 \wedge \bar{y}^0 \vee x_1^0 \wedge x_2^0 \wedge x_3^0 \wedge \bar{y}^0 \vee \bar{x}_1^0 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \wedge \\
 &\wedge y^0 \vee x_1^0 \wedge x_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \wedge y^0 \vee x_1^0 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge x_3^0 \wedge y^0 \vee \bar{x}_1^0 \wedge x_2^0 \wedge x_3^0 \wedge y^0 \vee \bar{x}_1^0 \wedge \\
 &\wedge x_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \wedge \bar{y}^0 \vee x_1^0 \wedge \bar{x}_2^0 \wedge \bar{x}_3^0 \wedge \bar{y}^0 = 0
 \end{aligned}$$

Для проверки свойства 3-наблюдаемости выпишем булево уравнение двухшагового перехода для начального состояния x_1^0, x_2^0, x_3^0 :

$$\begin{aligned}
 \Phi(x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_1^2, x_2^2, x_3^2, u^0, u^1, y^0, y^1) &= L(x_1^0, x_2^0, x_3^0, x_1^1, x_2^1, x_3^1, u^0, y^0) \vee \\
 &\vee L(x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_1^2, x_2^2, x_3^2, u^1, y^1) = 0
 \end{aligned}$$

Аналогично записывается булево уравнение $\tilde{\Phi} = 0$ для двухшагового перехода с начальным состоянием $\tilde{x}_1^0, \tilde{x}_2^0, \tilde{x}_3^0$. Суммарно выражение (19) содержит 26 предметных переменных и 80 дизъюнктов. Булево кодирование предметных переменных приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Булево кодирование переменных

Переменная	x_1^0	x_2^0	x_3^0	u^0	y^0	x_1^1	x_2^1	x_3^1	u^1	y^1	x_1^2	x_2^2	x_3^2
Код	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Переменная	\tilde{x}_1^0	\tilde{x}_2^0	\tilde{x}_3^0	\tilde{u}^0	\tilde{y}^0	\tilde{x}_1^1	\tilde{x}_2^1	\tilde{x}_3^1	\tilde{u}^1	\tilde{y}^1	\tilde{x}_1^2	\tilde{x}_2^2	\tilde{x}_3^2
Код	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Выражение (19) в формате QDIMACS представлено на рисунке 8.

```

p cnf 27 80
a 1 2 3 14 15 16 0
e 4 5 6 7 8 9 10
11 12 13 17 18
19 20 21 22 23
24 25 26 27 0
1 -14 27 0
-1 14 27 0
2 -15 27 0
-2 15 27 0
3 -16 27 0
-3 16 27 0
-6 2 3 -27 0
6 -2 3 -27 0
-6 -2 -3 -27 0
6 2 -3 -27 0
-7 1 4 -27 0
7 -1 4 -27 0
7 1 -4 -27 0
-7 -1 -4 -27 0
8 -2 -27 0
-8 2 -27 0
1 2 -3 -27 5 0
-1 -2 -3 -27 5 0
1 2 3 -5 -27 0
-1 -2 3 -5 -27 0
-1 2 -3 -5 -27 0
1 -2 -3 -5 -27 0
1 -2 3 5 -27 0
-11 7 8 -27 0
11 -7 8 -27 0
-11 -7 -8 -27 0
11 7 -8 -27 0
-12 6 9 -27 0
12 -6 9 -27 0
12 6 -9 -27 0
-12 -6 -9 -27 0
13 -7 -27 0
-13 7 -27 0
6 7 -8 10 -27 0
-6 -7 -8 10 -27 0
6 7 8 -10 -27 0
-6 -7 8 -10 -27 0
6 -7 -8 -10 -27 0
-6 7 8 10 -27 0
-6 7 8 10 -27 0
-19 15 16 -27 0
19 -15 16 -27 0
-19 -15 -16 -27 0
19 15 -16 -27 0
-20 14 17 -27 0
20 -14 17 -27 0
20 14 -17 -27 0
-20 -14 -17 -27 0
21 -15 -27 0
-21 15 -27 0
14 15 -16 18 -27 0
-14 -15 -16 18 -27 0
14 15 16 -18 -27 0
-14 -15 16 -18 -27 0
-14 15 -16 -18 -27 0
14 -15 -16 -18 -27 0
-14 15 16 18 -27 0
-24 20 21 -27 0
24 -20 21 -27 0
-24 -20 -21 -27 0
24 20 -21 -27 0
-25 19 22 -27 0
25 -19 22 -27 0
-25 19 -22 -27 0
25 19 -22 -27 0
-26 20 -27 0
26 -20 -27 0
19 20 -21 23 -27 0
-19 -20 -21 23 -27 0
19 20 21 -23 -27 0
-19 -20 21 -23 -27 0
19 20 -21 -23 -27 0
-19 20 -21 -23 -27 0
19 -20 21 23 -27 0
-19 20 21 23 -27 0
-10 23 28 -27 0
10 -23 28 -27 0
-4 17 -28 -27 0
4 -17 -28 -27 0

```

Рисунок 8 – Модель условия 3-наблюдаемости для системы (23) в формате QDIMACS

В представленном формате переменные, закодированные как 27 и 28, используются при выполнении преобразования Плейстеда-Гринбаума.

Сервис QBFTV, разработанный на основе QSAT решателя DepQBF, для квантифицированной булевой формулы (19) выдает сообщение, что эта формула истинна, что означает выполнение свойства 3-наблюдаемости для системы (23). Интерфейс сервиса приведен на рисунке 9. В качестве входного файла задается QBF в формате QDIMACS. Результат выполнения можно посмотреть на вкладке “Results”.

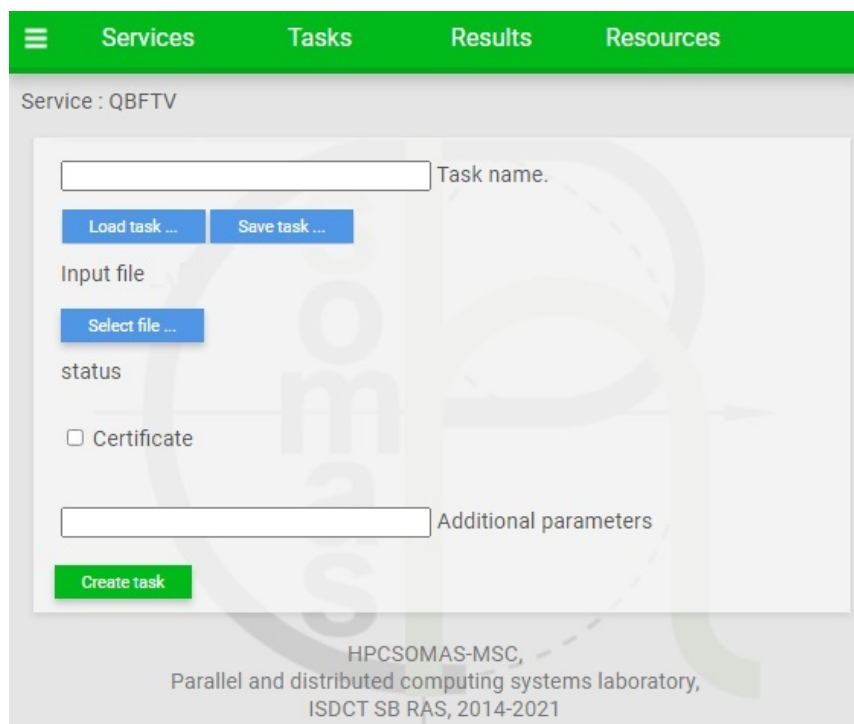


Рисунок 9 – Интерфейс сервиса QBFTV

Описание применения метода булевых ограничений для проверки k -наблюдаемости ДДС большой размерности на практическом примере биологической булевой сети ([43], $n=37$, $m=3$, $l=4$) приведено в работе [52].

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Логический подход к качественному анализу управляемых нелинейных ДДС является декларативным и позволяет за счет естественного параллелизма по данным (путем расщепления булевой модели) существенно увеличить размерность вектора состояния ДДС и промежутков времени ее функционирования при решении задач качественного анализа ДДС в высокопроизводительной вычислительной среде.

Принципиальным моментом метода булевых ограничений является использование формальных определений динамических свойств, представленных на языке прикладной логики предикатов с ограниченными кванторами существования и всеобщности, понятном специалисту по динамическому анализу систем. Формальная спецификация свойства (в отличие от его вербального описания, используемого при алгоритмическом подходе) не допускает неоднозначности толкования смысла свойства и позволяет путем ряда последовательных формальных преобразований сформировать модель динамического свойства в виде булева ограничения. Уникальность полученной булевой модели заключается в том, что в ней содержатся ограничения, описывающие как динамику ДДС, так и спецификацию требуемого свойства.

Практическая значимость полученных результатов обусловлена широким применением ДДС как моделей нелинейных управляемых объектов при проведении исследований в различных прикладных областях.

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

Достоверность полученных результатов. Полученные результаты базируются на корректном использовании методов математической логики, теории динамических систем, теории автоматов, методов решения переборных задач, методов организации параллельных и распределенных вычислений, методов искусственного интеллекта и концептуального программирования. Достоверность результатов также подтверждена экспериментально при решении научных и прикладных задач качественного анализа нелинейных управляемых ДДС с применением метода булевых ограничений [52, 59-63].

2 Разработка методов построения и анализа многоуровневых систем интеллектуального управления группами роботов в недетерминированных средах

Целью блока проекта является проведение исследований по следующим направлениям:

1. Разработка и исследование исчисления позитивно-образованных формул с темпоральными операторами как средства представления и обработки знаний на верхнем уровне системы управления мобильных роботов.

2. Исследование возможностей использования в системе управления группами роботов дискретно-событийных систем (ДСС), в том числе разработка подхода к решению задачи супервизорного управления частично-наблюдаемыми ДСС на основе оригинальных логических методов, таких как метод автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ).

3. Разработка методов децентрализованного управления распределенными группировками роботов в условиях ограниченной коммуникации.

4. Разработка методов и алгоритмов стратегического планирования движения группы роботов на основе формирования распределенной многоуровневой модели внешней среды.

5. Разработка способов исследования устойчивости и стабилизации сложных многокомпонентных систем с переключениями с приложениями к задачам динамики и управления группами роботов.

Задачи этапа НИР по блоку в 2021 году:

1) разработка способа построения нормальных форм для позитивно-образованных формул с темпоральными операторами;

2) решение задачи супервизорного управления частично наблюдаемыми дискретно-событийными системами с применением метода автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул;

3) разработка алгоритмической схемы эффективного группового поведения при осуществлении оперативного оповещения внутри динамических распределенных робототехнических группировок;

4) разработка основанного на событиях метода планирования пути в неизвестной среде для группы мобильных роботов;

5) разработка и исследование математической модели распространения распределенной двухкомпонентной группировки подводных роботов (например, исследователи и заправщики), описываемой системой нелинейных уравнений типа реакции-диффузии.

Выбор направления исследований обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

Характеристика задач и результаты исследований:

1) Разработка способа построения нормальных форм для позитивно-образованных формул с темпоральными операторами.

Выбор направления исследований. Методы решения задач. В рамках данного проекта проводятся исследования по применению управляемых дискретно-событийных систем (ДСС) на верхнем уровне систем управления робототехническими комплексами. Для формализации и решения различных задач управления ДСС может успешно применяться оригинальное первопорядковое логическое исчисление позитивно-образованных формул (ПОФ). Исчисление ПОФ было разработано в [74,75], а его дальнейшее развитие можно найти в [76]. Данное исчисление естественным образом подходит для применения в задачах управления динамическими системами благодаря его особенностям, таким как модифицируемость семантики и возможности построения конструктивных выводов формул достаточно широкого класса, который существенно шире класса хорновских формул, используемых в языке Пролог.

В целях повышения эффективности построения и анализа ДСС, используемых в системах управления мобильными роботами, одним из возможных направлений их логической формализации были выбраны темпоральные логики, которые, как известно, предназначены для описания последовательностей переходов между состояниями реагирующих систем, т.е. в том числе и дискретно-событийных. В темпоральных логиках, рассматриваемых в данном исследовании, время явно не упоминается, вместо этого формулы позволяют записывать утверждения о том, что некоторое выделенное состояние будет когда-нибудь пройдено или никогда не будет достигнуто. Свойства, в которых упоминаются события, происходящие когда-нибудь или никогда, специфицируются при помощи специальных темпоральных операторов.

Характеристика задач и результаты исследований. На данном этапе проекта велись исследования темпоральных логик с точки зрения возможности автоматизации поиска логического вывода. Согласно выбранному направлению, оказывается целесообразным изучение логики CTL^* (в дальнейшем именуемой просто темпоральной

логики), так как она является наиболее общим случаем темпоральных логик и на ее основе можно строить преобразования формул в логики как линейного, так и ветвящегося времени. Иные темпоральные формализмы в контексте данного исследования интереса не представляют.

Семантика всякой формулы темпоральной логики, как правило, определяется на основе специального размеченного графа переходов, называемого моделью Крипке. Проведено исследование возможности представления моделей Крипке при помощи ПОФ, так как они сами по себе являются некоторыми нормальными формами в первопорядковой логике и позволяют автоматизировать поиск логических выводов. На текущем этапе, данное представление основано на специально разработанной формализации, при которой для конкретной модели Крипке, т.е. для некоторой темпоральной формулы, строится ПОФ, которая позволяет имитировать формализованные с её помощью процессы. Таким образом, полученная ПОФ – это некоторая метаформула, вывод которой позволит устанавливать свойства исходной формулы.

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

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Новизна выражена в потребности получения новых формализмов и программных средств, в том числе для 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 вывода со стороны программиста. Также для таких формализмов необходимы эффективные методы автоматического конструктивного доказательства теорем.

2) Решение задачи супервизорного управления частично-наблюдаемыми дискретно-событийными системами.

Выбор направления исследований. Методы решения задач. В настоящее время многие сложные технические и технологические системы рассматриваются в рамках особого класса дискретных систем, известных как дискретно-событийные системы (ДСС) [77]. В таких системах смена состояния происходит вследствие возникновения некоторых событий через возможно нерегулярные промежутки времени. Когда время возникновения событий не рассматривается, говорят о логических ДСС. Особую роль играют ДСС, где часть событий не наблюдается, т.е. частично-наблюдаемые ДСС. Для управления ДСС применяется теория супервизорного управления (ТСУ) [78]. Анализ работ последних лет по ТСУ показывает, что в настоящее время продолжают поиски эффективных способов построения и реализации супервизоров для ДСС, в том числе с использованием подходов

из других областей математики, как, например, в [79], где для синтеза супервизора адаптирован один из алгоритмов теории проверки моделей. В этой связи было решено адаптировать и применить метод автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ), разработанный для решения задач управления сложными динамическими системами и позволяющий, среди прочего, строить управление на основе обработки внешних данных [80].

Характеристика задач и результаты исследований. Известно, что построение супервизоров – сложная с вычислительной точки зрения проблема. Прежде всего, необходима автоматизация проверки условий существования супервизоров и модификации спецификаций в случае нарушения этих условий, что является нетривиальной задачей. Частично-наблюдаемые ДСС требуют еще больше вычислительных ресурсов как для проверки критериев существования управления, так и для его реализации, что связано с необходимостью построения так называемых автоматов-наблюдателей. Разработка нового метода решения перечисленных задач, основанного на логическом подходе, позволит эффективно использовать ТСУ на верхнем уровне управления группами роботов. Для решения задачи супервизорного управления частично-наблюдаемыми ДСС предложен подход, основанный на применении метода автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). На рисунке 10 представлена структура ПОФ, имеющая вид дерева и состоящая из корня, базы, вопросов к ней, а также возможных консеквентов.

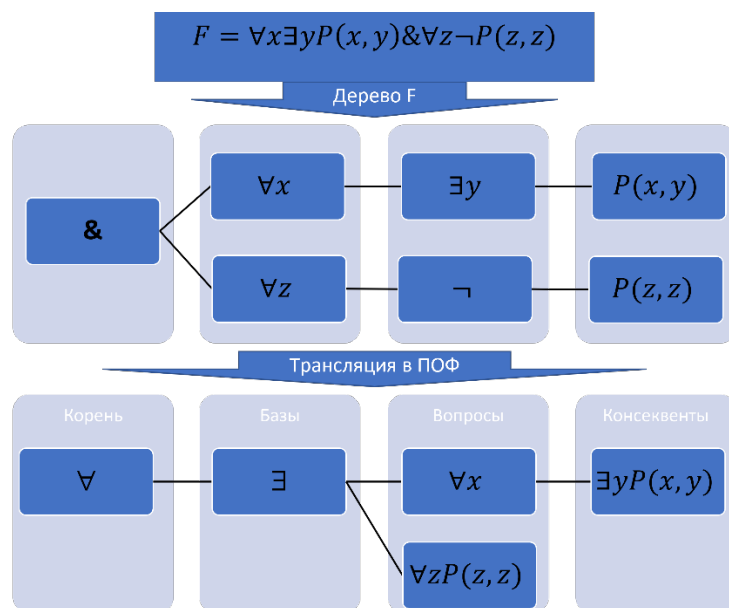


Рисунок 10 – Структура ПОФ

Разработана формализация ДСС, позволяющая посредством ПОФ моделировать работу конечного автомата как генератора формального языка, представляющего описание эволюции системы. Рисунок 11 показывает общий вид ПОФ F_G для частично-наблюдаемой ДСС G .

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}_G = \exists B \left\{ \begin{array}{l}
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L^G(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q') \text{ ————— } \exists L^G(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L^G(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q') \text{ ————— } \exists L_m^G(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma') \text{ ————— } \exists L(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma') \text{ ————— } \exists L(\sigma, q', l + 1) \\
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma') \text{ ————— } \exists L_m(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\
 \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma') \text{ ————— } \exists L_m(\sigma, q', l + 1)
 \end{array} \right. \\
 B = \{ \{ \Sigma_{uo}, \Sigma_o \}, \{ \delta(\cdot, \cdot, \cdot) \}^{|G|}, L(\varepsilon, q_0, 0) \}
 \end{aligned}$$

Рисунок 11 – Общий вид ПОФ F_G , моделирующей частично-наблюдаемую ДСС G

ПОФ F_G состоит из базы B и шести вопросов, где используются следующие предикаты. Предикат $L(s, S, l)$ обозначает « s – это текущая наблюдаемая последовательность событий длины l , приведшая систему в состояние S », а предикат $L_m(s, S, l)$ обозначает « s – это текущая наблюдаемая последовательность событий длины l , приведшая систему в состояние S , и s – маркированная строка». Первые аргументы этих атомов накапливают строки наблюдаемые подязыки языков $L(G)$ и $L_m(G)$, сгенерированного и маркированного автоматом G , соответственно. Предикаты с индексом G , $L^G(s, S, l)$ и $L_m^G(s, S, l)$, используются для накопления наблюдаемых слов языков $L(G)$ и $L_m(G)$. Предикат вида $\delta(S_1, \sigma, S_2)$ интерпретируется как переход из состояния S_1 в состояние S_2 в результате наступления события σ . Если целевое состояние перехода маркировано, то используются атомы с индексом m , т.е. $\delta_m(S_1, \sigma, S_2)$. Наблюдаемые и ненаблюдаемые события представлены в базе отдельными атомами с помощью предикатов $\Sigma_o(\cdot)$ и $\Sigma_{uo}(\cdot)$, соответственно. Функциональный символ \cdot обозначает объединение строк, а символ ε соответствует пустой строке. Применяя правила вывода к этой ПОФ, слова наблюдаемых подязыков языков, сгенерированного и помеченного автоматом, строятся как первые аргументы атомов $L(s, S, l)$, $L_m(s, S, l)$ в базе.

Разработан алгоритм проверки критического для управляемости ДСС свойства наблюдаемости языка спецификации, задающего ограничения на функционирование ДСС. Формальный язык называется наблюдаемым, если при наличии в системе ненаблюдаемых

событий можно однозначно сделать вывод о допустимости генерируемого системой слова. Формально это утверждение записывается следующим образом:

$$\forall s, t \in \Sigma^* (P(s) = P(t) \rightarrow (\forall \sigma \in \Sigma)(s\sigma \in \bar{K} \& t\sigma \in L(\mathcal{G}) \& t \in \bar{K} \rightarrow t\sigma \in \bar{K})).$$

Здесь P обозначает проекцию из множества всех событий во множество наблюдаемых событий, а \bar{K} обозначает множество всех префиксов слов из K . Разработан алгоритм проверки свойства наблюдаемости для ПОФ-представления языка спецификации. При проверке свойства существенно используется процедура параметризованного подвывода и вычисляемые термы. Если K – это язык, задающий спецификацию на поведение ДСС G , то для проверки наблюдаемости K запускается вывод F_G^* (рисунок 12). При успешном применении правила вывода к одному из вопросов 1–4, запускается подвывод формулы F_K^* (рисунок 13) с актуализированными параметрами Φ и l' .

$$\mathcal{F}_G^* = \exists B \begin{cases} \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma') & \text{---} \begin{matrix} \exists L(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1), \\ P(\#(\Phi = L(\sigma \cdot \sigma', z, l + 1), l' = l + 1)) \end{matrix} \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma') & \text{---} \begin{matrix} \exists L(\sigma, q', l + 1), \\ P(\#(\Phi = L(\sigma, z, l + 1), l' = l + 1)) \end{matrix} \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma') & \text{---} \begin{matrix} \exists L_m(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1), \\ P(\#(\Phi = L(\sigma \cdot \sigma', z, l + 1), l' = l + 1)) \end{matrix} \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma') & \text{---} \begin{matrix} \exists L_m(\sigma, q', l + 1), \\ P(\#(\Phi = L(\sigma, z, l + 1), l' = l + 1)) \end{matrix} \\ \forall P(stop) \end{cases}$$

$$B = \{\{\Sigma_{uo}, \Sigma_o\}, \{\delta(\cdot, \cdot, \cdot)\}^{|G|}, L(\varepsilon, q_0, 0)\}$$

Рисунок 12 – Пример параметризованной ПОФ

$$\mathcal{F}_H^*[\Phi, l'] = \exists B \begin{cases} \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma'), l \leq l' & \text{---} \exists L(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma'), l \leq l' & \text{---} \exists L(\sigma, q', l + 1) \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_o(\sigma'), l \leq l' & \text{---} \exists L_m(\sigma \cdot \sigma', q', l + 1) \\ \forall \sigma, q, \sigma', q', l, L(\sigma, q, l), \delta_m(q, \sigma', q'), \Sigma_{uo}(\sigma'), l \leq l' & \text{---} \exists L_m(\sigma, q', l + 1) \\ \forall \Phi \end{cases}$$

$$B = \{\{\Sigma_{uo}, \Sigma_o\}, \{\delta(\cdot, \cdot, \cdot)\}^{|H|}, L(\varepsilon, q_0, 0)\}$$

Рисунок 13 – Параметризованный вариант ПОФ для генератора H языка K

Функция $\#$ является вычислимой, а именно, выводимой, и ее значение определяется подвыводом F_K . $\#$ возвращает два значения в качестве возможных вариантов завершения

подвывода: константу *ok*, если подвывод закончился ответом на целевой вопрос $\forall z \Phi$, или константу *stop*, если подвывод закончился исчерпанием возможных вариантов подстановок. Последнее доказывает выполнимость формулы, что означает, что язык *K* не обладает свойством наблюдаемости. Дополнительные атомы $l' \leq l$ служат ограничением при поиске вывода: они ограничивают машину вывода от поиска дальше, чем длина текущей цепочки событий. Кроме того, дополнительный стоп-вопрос $\forall P(stop)$ добавляется к базе формулы F_G в качестве сигнала остановки для машины вывода.

Разработан алгоритм реализации управления для ДСС на основе наблюдаемой спецификации, опирающийся на построение параллельной композиции конечных автоматов с помощью ПОФ. Параллельная композиция строится через произведение автоматов, что в ПОФ-представлении ДСС существенным образом уменьшает вычислительную сложность поиска вывода и повышает его эффективность [81]. На рисунке 14 представлена ПОФ, строящая параллельную композицию n конечных автоматов на основе их произведения. Термы вида $\delta(S, \sigma, S)$ в базе этой ПОФ соответствуют вспомогательным петлям, добавляемым в конечные автоматы, участвующие в параллельной композиции, для отсутствующих в их алфавитах событий остальных автоматов, моделирующих систему или ограничения на нее.

$$\begin{array}{l} \exists c(S_0^1, \dots, S_0^n), \\ \delta_1(S_1^{i_1}, \sigma_{i_1}, S_2^{i_1}), \\ \delta_1(S^{j_1}, \sigma_{k_1}, S^{j_1}), \\ \dots, \\ \delta_n(S_1^{i_n}, \sigma_{i_n}, S_2^{i_n}), \\ \delta_n(S^{j_n}, \sigma_{k_n}, S^{j_n}) \end{array} \quad \text{---} \quad \forall \sigma, q_1^1, \dots, q_1^n, q_2^1, \dots, q_2^n \\ \delta^1(q_1^1, \sigma, q_2^1), \dots, \delta^n(q_1^n, \sigma, q_2^n), \quad \text{---} \quad \exists \delta^{n+1}(q_1^1 \cdot \dots \cdot q_1^n, \sigma, q_2^1 \cdot \dots \cdot q_2^n), \\ c(q_1^1, \dots, q_1^n) \quad \quad \quad c(q_2^1, \dots, q_2^n)$$

Рисунок 14 – ПОФ, строящая параллельную композицию n конечных автоматов

Обобщение и оценка полученных результатов. Известно, что в случае частичного наблюдения событий необходимо строить автомат-наблюдатель языка спецификации для получения и реализации управляющих действия супервизора, что требует дополнительных ресурсов для хранения и применения наблюдателя. Разработанный на основе ПОФ подход направлен на то, чтобы избежать использования наблюдателей. Кроме того, если язык спецификации неуправляемый или ненаблюдаемый, может быть интересно найти управляемый и наблюдаемый подязык спецификации. В то время как существует алгоритм построения наибольшего управляемого подязыка спецификации, в том числе, и на основе ПОФ [82], наибольший наблюдаемый подязык не всегда существует. Однако, могут быть построены максимальные наблюдаемые подязыки,

которые не являются уникальными. ПОФ-представление спецификаций может быть использовано для построения максимальных наблюдаемых подязыков ненаблюдаемых спецификаций. Предложенный подход к построению управления может быть распространен на случай использования децентрализованных и модульных супервизоров. Логические средства исчисления ПОФ, возможность хранения и накопления знаний в базе фактов, возможность применения абдукции и модифицируемость семантики полезны в задачах с неопределенностями, какими являются задачи обеспечения функционирования групп роботов. Отметим подход к проверке диагностируемости ДСС на основе логического представления, предложенный в [83]. В отличие от логического формализма исчисления ПОФ, здесь используются менее выразительные средства для представления автоматов, лежащих в основе ДСС: конъюнктивную нормальную форму. Переходы ДСС описываются множеством предложений, которое рассматривается как новая модель для ДСС. На основе хорошо известного метода резолюций представлен алгоритм, позволяющий проверить, могут ли быть обнаружены события отказа для конечного числа наблюдаемых событий. В рамках будущих исследований задачи диагностики ДСС будет проведено сравнение данного подхода с разрабатываемым подходом на основе ПОФ-представления ДСС.

3) Разработка алгоритмической схемы эффективного группового поведения при осуществлении оперативного оповещения внутри динамических распределенных робототехнических группировок.

Выбор направления исследований. Стремительное развитие беспилотных технологий в последние десятилетия привело к значительному росту эффективности и надежности мобильных робототехнических систем. На данный момент, использование скоординированных групп автономных роботов представляется наиболее перспективным методом для решения целого ряда поисково-обследовательских задач в различных динамических средах. Эффективность использования таких групп во многом определяется их способностью реагировать на любые непредвиденные изменения. В ситуации, когда возникает непрогнозируемое событие, влекущее за собой некоторые ключевые изменения условий функционирования группы, должна быть оперативно инициирована процедура корректировки текущей групповой стратегии. Для этого требуется эффективное решение двух последовательных подзадач: децентрализованного оповещения всех членов группы о произошедших изменениях и, непосредственно, группового принятия решения [84]. Проблема динамического планирования и корректировки групповой стратегии ранее

неоднократно освещалась сотрудниками лаборатории. Результаты по данному проекту, в свою очередь, посвящены подзадаче оперативного оповещения.

В общем случае, поисково-обследовательские миссии группы роботов заключаются в посещении некоторого множества подобластей в рамках обозначенного региона с целью выполнения там набора заданий. Поскольку размеры региона обычно значительно превышают сенсорные возможности каждого робота, общепринятым является подход по распределению заданий миссии внутри действующей группы. По мере того, как роботы расходятся по областям для выполнения своих заданий, текущая групповая стратегия может терять свою эффективность вследствие динамических условий миссии. Так, например, один из членов группы может обнаружить потенциально опасный регион, ставящий под угрозу успех миссии в целом [85]. В случае критической важности полученной информации робот должен прекратить свою текущую деятельность и оповестить остальных роботов, которые, по мере информирования также должны прекращать свою работу, чтобы присоединиться к задаче оповещения оставшейся группы.

Обобщая вышесказанное, задача экстренного или оперативного оповещения заключается в поиске маршрута для первого робота (инициатора) и последующих информированных им роботов для осуществления наискорейшего распространения некоторой информации внутри всей группы. Поскольку роботы не являются стационарными и в течение миссии перемещаются между подобластями (хоть их маршрут и предполагается заранее известным), это накладывает дополнительный уровень сложности на задачу групповой маршрутизации. Ограниченность межаппаратной коммуникации также заметно осложняет решение задачи.

В результате решения задачи разработан эвристический подход к построению маршрутов для оповещения распределенной робототехнической группировки, призванных обеспечить оперативное распространение некоторой ключевой информации от агента-инициатора до всех остальных нестационарных членов группы в условиях ограниченной коммуникации.

В рамках решения задачи предложена оригинальная математическая постановка задачи оповещения, лежащая на стыке задач класса групповой маршрутизации транспортных средств и дискретных мультиагентных моделей, описывающих процессы взаимодействия множества агентов при заданном наборе правил (распространение информации в коммуникационных сетях, распространение инфекций и др.).

Для решения поставленной задачи разработана алгоритмическая схема по эффективному построению маршрутов оповещения в виде централизованного группового

расписания. За генерацию первичных маршрутов-расписаний здесь отвечает набор разработанных проблемно-ориентированных конструктивных эвристик, а за их дальнейшее улучшение – специализированная процедура окрестностного поиска. Различные конструктивные эвристики в этом случае отвечают за специализированные шаблоны поведения оповещенных агентов при выборе новых целей для дальнейшей передачи ключевой информации.

На базе разрабатываемого моделирующего комплекса «Situational awareness system for distributed robotic groups» [86] произведена программная реализация подхода в двух модификациях: на дискретном и на непрерывном времени. Для вариации с непрерывным временем также исследовались постановки с однородными и разнородными по скоростям группами роботов. Численные эксперименты проводились на сгенерированном наборе из 100 тестовых задач, различающихся между собой по ряду параметров. Проведен подробный анализ полученных статистических и визуальных данных.

Результаты исследования опубликованы в работах [86-89].

Построение математической модели задачи оповещения. Пусть регион выполнения миссии будет представлен в виде связного графа $G = (V, E)$ из m вершин. Каждая вершина графа v_i , $i = 0, \dots, m$ кодирует некоторую область пространства, на которой роботам требуется выполнить одну или несколько близкорасположенных задач. Единственным исключением здесь является вершина v_0 , которая отвечает за область сбора, откуда все роботы начинают свое движение и куда возвращаются по завершению миссии. Каждая дуга графа e_{ij} соответствует сегменту пути между двумя соседними областями v_i и v_j , а вес дуги – его дальности. Граф G является связанным, взвешенным и ненаправленным. Вес вершины w_i отвечает за временную длительность всех задач, которые требуется выполнить в пределах соответствующей области v_i .

Пусть в миссии принимает участие группа из n роботов a_1, a_2, \dots, a_n . На протяжении миссии каждый робот a_i перемещается между вершинами графа со своей крейсерской скоростью g_i согласно заранее предписанному маршруту R_i , попутно выполняя все задачи в посещаемых им областях. Маршрут $R_i = (v_0, r_{i1}, \dots, r_{iq_i}, v_0)$ представляет собой путь на графе с циклами, так как роботы со временем могут возвращаться на посещенные ранее области, например, при проведении периодического мониторинга. Обозначим через D_i временную длительность первичного маршрута каждого робота. Таким образом, длительность всей миссии будет составлять $T = \max_{i=1, \dots, n} D_i$.

Стоит отметить, что в начале миссии все роботы обмениваются своими запланированными маршрутами R_i прежде чем начать движение. В дальнейшем эта информация сможет быть использована ими при построении маршрута оповещения.

Под состоянием i -го робота в любой момент времени t_j понимается совокупность его текущего местоположения и статуса $a_i(t_j) = \langle L_{ij}, S_{ij} \rangle$. Если робот находится в рамках одной из областей, то его местоположение соответствует индексу этой области $L_{ij} = v_z$, в противном случае (робот перемещается между областями) $L_{ij} = -1$. Статус робота $S_{ij} = \{0,1\}$, в свою очередь, отражает, является ли он уже оповещенным (о произошедших изменениях) на момент времени t_j или еще нет.

В некоторый момент времени t_y случайный робот a_x (инициатор) получает информацию о произошедших изменениях высокой важности. С этого момента любой оповещенный робот:

1. Прекращает свое движение по маршруту R_i , становясь объектом управления.
2. Может оповещать других роботов в пределах одной области, передавая им информацию об изменении $S_{kj} = \max_{i=1, \dots, n} \{S_{ij} | L_{ij} = L_{kj}, L_{kj} > 0\}$.

Зная первичные маршруты R_1, R_2, \dots, R_n всей группы, робот-инициатор a_x должен определить способ распространения полученной им ключевой информации наискорейшим образом. Для этого он должен построить решение задачи оповещения в виде матрицы $X = \{a_i(t_j)\}$, $i = 1, \dots, n$, $j \in [0, T]$ такой, что:

- в начале миссии все роботы в группе не оповещены $a_i(0) = \langle v_0, 0 \rangle$, $i = 1, \dots, n$;
- неоповещенные роботы перемещаются по графу G со своей крейсерской скоростью g_i согласно своим первичным маршрутам R_i , $i = 1, \dots, n$;
- каждый неоповещенный робот тратит w_i времени на выполнение задач, требуемых в рамках каждой области v_i из своего первичного маршрута R_i ;
- случайный робот a_x становится оповещенным в момент t_y , $S_{xt_y} = 1$;
- уже оповещенные роботы оповещают других роботов в общей области;
- все роботы в группе должны быть оповещены не позднее времени O , $S_{if} = 1, i = 1, \dots, n, f \leq O$;
- предпочтительными являются решения с наименьшим значением f , $\min_f X$.

Таким образом, робот-инициатор должен найти наилучшее возможное решение за максимально короткое время и приступить к оповещению, если это решение окажется приемлемым. Так как робот-инициатор ищет единое решение для всей группы сразу, это

решение всегда должно передаваться каждому оповещаемому роботу наряду с основным сообщением о зафиксированных изменениях.

Методы решения задач. Предложенная математическая постановка задачи оповещения в оригинальной манере сочетает в себе такие особенности задач класса маршрутизации транспортных средств, как прямое управление агентами, поиск группового маршрута и взаимодействие вида "агент-клиент", с рядом признаков, свойственных многоагентным моделям сетевого распространения. Такие сетевые модели с несколькими статичными или мобильными агентами, воздействующими друг на друга в соответствии с определенным набором правил, обычно используются для моделирования процессов распространения информации в социальных и коммуникационных сетях [90-93] или даже распространения инфекционных болезней [94,95].

В предложенной постановке требуется искать решение для динамической группы, состоящий как из управляемых (уже осведомленных), так и неуправляемых (еще не осведомленных) агентов, действующих и взаимодействующих в нестатических, но детерминированных условиях. Предлагается классифицировать поставленную задачу как время-зависимую вариацию задачи нескольких коммивояжеров, где каждый робот последовательно выступает сначала в роли клиента, а затем, уже будучи информированным, – в качестве управляемого агента. Поскольку путем ослабления ряда ограничений, предложенная задача может быть сведена к классической задаче коммивояжера, можно сделать вывод, что она также является NP-трудной.

Для решения задач из смежных классов, как правило применяются эвристические или построенные на их базе метаэвристические подходы [96]. Построение эффективных проблемно-ориентированных эвристик является первым и одним из важнейших шагов для получения алгоритмических схем с высокими вычислительными возможностями. К ним относятся как конструктивные (constructive) эвристики, позволяющие быстро получать некоторые первичные рациональные решения приемлемого качества, так и эвристики улучшения (improvement), задача которых – оптимизировать уже имеющийся набор решений. В литературе представлено большое количество эффективных эвристик для решения классических комбинаторных задач, однако подавляющее большинство таких постановок является статическими, в то время как построение эвристик для динамических моделей остается нетривиальной задачей.

Алгоритм генерации решений. Очевидно, что поиск решения напрямую в матричной форме X является нерациональным, поскольку при большой размерности она содержит значительное количество избыточной неключевой информации. Предлагается

переобозначить решение X в матричной форме $\Pi = [\langle i, v_{ik}, t_{ik}, a_{ik} \rangle], i = 1, \dots, n, k = 0, \dots, u_i$, кодирующей исключительно моменты передачи ключевых данных от одного робота другому. Так, каждая строка i в Π соответствует тем моментам времени, когда робот i вовлечен в процесс передачи данных. Эти моменты включают первичный момент $\langle i, v_{i0}, t_{i0}, a_{i0} \rangle$, когда робот i становится оповещенным роботом a_{i0} в вершине v_{i0} в момент времени t_{i0} , а также u_i хронологически упорядоченных моментов времени $\langle i, v_{ik}, t_{ik}, a_{ik} \rangle$, когда робот i оповещает других роботов a_{ik} .

Тем не менее, поскольку поиск решения напрямую в форме Π все еще видится затруднительным, предлагается использование еще более короткой векторной формы кодирования решений в виде расписания последовательности оповещения роботов в группе: $P = \{x, p_1, p_2, \dots, p_{2n-1}\}$, $p_i \in \{0, 1, \dots, n\}, n \neq x$. Решение в виде P представляет собой список команд для роботов, выдаваемых в хронологическом порядке. Каждый робот получают свою первую команду из списка в тот момент, когда становится оповещенным. Ненулевая команда $p_i > 0$ указывает на индекс еще не оповещенного робота, который должен стать текущей целью для текущего же робота, в то время как нулевая команда $p_i = 0$ отправляет робота в область сбора. Когда робот выполняет свою текущую ненулевую команду, он получает следующую команду из списка.

Например, решение вида $P = \{3, 4, 1, 0, 5, 2, 0, 0, 0, 0\}$ для группы из 5 роботов расшифровывается как:

1. Робот #3 является инициатором, и его первая команда заключается в поиске Робота #4 и передаче ему ключевой информации.
2. Когда Робот #3 выполнит свою первую команду, ему будет назначен Робот #1, в то время как Робот #4 должен будет проследовать к области сбора.
3. Следующая команда для Робота #3 будет заключаться в оповещении Робота #5, а только что оповещенный Роботом #3 Робот #1 проследует к Роботу #2.
4. Затем, все четыре оповещенных робота отправятся к области сбора.

Матричная форма Π затем может быть легко восстановлена из векторной формы P путем построения кратчайших (по времени) путей для оповещенных роботов к их целям.

Используя предложенную форму представления решений P , были разработаны и исследованы несколько различных модификаций классической жадной эвристики построения решений. При этом были использованы три различных метрики M_1, M_2 и M_3 , служащих в качестве функции оценки пространственно-временного расстояния между двумя нестационарными роботами.

Первая метрика $M_1 = \theta(i, v, t, j)$ оценивает минимальное время для робота i , находящегося в вершине v в момент времени t , чтобы достигнуть робота j , который движется согласно своему первичному маршруту R_j . Метрика M_2 также учитывает скорость текущего робота $M_2 = \theta(i, v, t, j)/g_i$, а метрика M_3 оценивает перспективность пространственно-временной окрестности робота j : $M_3 = (\theta(i, v, t, j) + \varphi(j, v_i, t_i))/g_i$, где функция $\varphi(j, v_{ij}, t_{ij})$ оценивает расстояние до ближайшего еще не оповещенного робота от вершины v_{ij} (места встречи роботов i и j) на момент их встречи t_{ij} .

Классическая жадная эвристика – очевидный базовый алгоритм, но зачастую способный показывать приемлемые результаты при малых вычислительных затратах. При этом подходе список команд P строится таким образом, чтобы роботы всегда стремились оповестить ближайшего (согласно текущей метрике) неоповещенного робота. Две другие эвристики являются авторскими модификациями жадной эвристики и предложены в качестве решения для тех частных случаев, когда жадный алгоритм показывает низкую эффективность.

Случайная жадная эвристика – вероятностная модификация жадного подхода: каждый раз, когда роботу должна быть назначена новая команда, вероятность выбора каждого еще не оповещенного робота обратно пропорциональна расстоянию до него согласно текущей метрике (при наименьшей вероятности назначить нулевую команду).

Строгая жадная эвристика – также вариация жадной эвристики с дополнительным ограничением: эвристика выбирает для оповещения не всех еще не оповещенных роботов, а только тех, до кого текущий робот можно добраться быстрее (согласно текущей метрике) всех остальных уже оповещенных роботов. При отсутствии таких кандидатов, текущий робот получает нулевую команду.

В качестве эвристики улучшения была использована *процедура локального поиска* в окрестности $swar(a, b)$, где $a \cdot b = 0$, $a + b > 0$. Задача процедуры локального поиска – переназначить роботов, оповещенных в последних рядах, тем роботам, которые были остановлены (получили нулевую команду) раньше.

Программная реализация. Предложенная модель задачи и набор эвристик для ее решения были программно-реализованы в рамках разрабатываемого сотрудниками лаборатории моделирующего комплекса «Multiobjective Mission Planner» на языке C++ (рисунок 15). Разработанный модуль для решения задачи оповещения позволяет экспортировать условия задачи из других модулей группового управления, загружать в виде конфигурационного файла, а также создавать новые задачи и изменять условия с

использованием графического интерфейса программы. Программа также предоставляет широкий спектр вариантов для вывода результатов расчета, включая статистические данные с разового и множественных запусков, построение графиков динамики различных параметров, а также визуальное моделирование движения группы.

Для создания разнообразных начальных условий задачи были разработаны 4 метода генерации графа миссии G (усеченная триангуляция Делоне, две вариации случайного геометрического графа и алгоритм Барабаши-Альберта) и 3 способа генерации набора стартовых маршрутов R_j для роботов группы (исследование карты, разработка подобластей, смешанный режим движения).

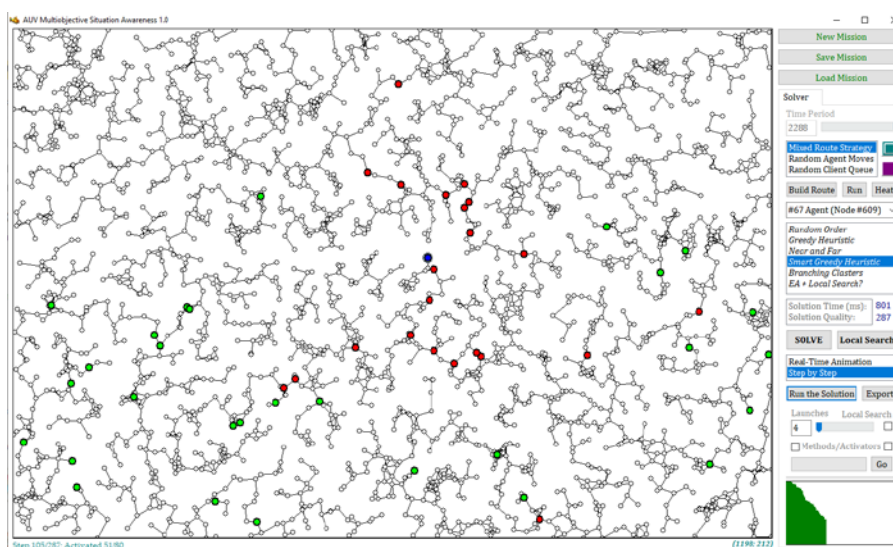
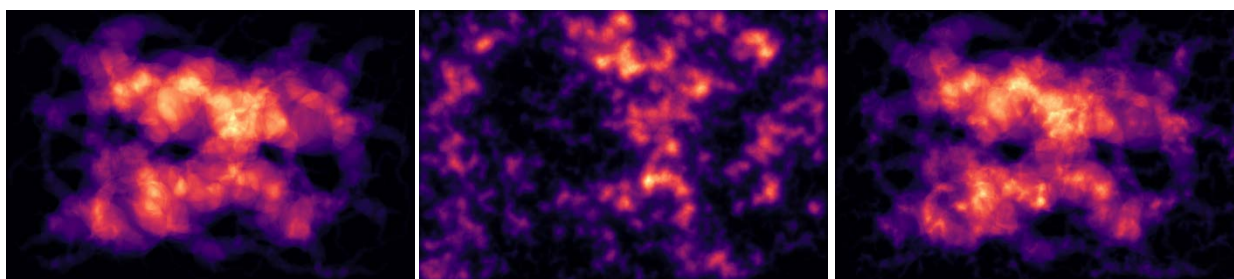


Рисунок 15 – Моделирующий комплекс «Multiobjective Mission Planner», окно визуализации

С использованием данных методов был сформирован набор тестовых задач вида $XU \pm m(n)$ для проведения серии вычислительных экспериментов. Сформированный набор задач разделен на двенадцать категорий: каждому методу $X=\{T,G,g,B\}$ генерации графа соответствует одна из трех схем построения групповых маршрутов $Y=\{R,C,M\}$ (рисунок 16). Размерность тестовых задач находится в пределах $n=\{25,50,100\}$ агентов на графе из $m=\{500,2000,5000,10000\}$ вершин. Знак «+» в записи задачи соответствует постановкам с гетерогенной по скорости группой роботов, а знак «-» – группе идентичных роботов.



А

Б

В

Рисунок 16 – Тепловая карта, создаваемая движением группы из 100 роботов в режиме: А - исследования карты (С); Б - разработки подобластей (R); В - в смешанном режиме (М).

Экспериментальные исследования. На основе сгенерированного набора из статистических задач было проведено несколько серий вычислительных экспериментов. Статистические результаты проведенных расчетов для некоторых задач из списка представлены в таблице 4. Результаты показывают, что строгая эвристика в большинстве случаев заметно опережает случайную эвристику, которая, в свою очередь, работает значительно эффективнее простой жадной эвристики. Более комплексные метрики, учитывающее большее количество параметров, также показали свою высокую эффективность. В то же время, попытки дальнейшего усложнения метрик не привели к каким-либо заметным улучшениям в качестве работы алгоритма, при этом отрицательно сказавшись на его быстродействии.

Предложенный оператор улучшения решений также показал себя в качестве надежной алгоритмической схемы по улучшению существующих решений: для слабых решений он демонстрирует значительный прирост эффективности (в среднем на 10-20%) ценой больших вычислительных затрат, в то время как для качественных решений он предлагает быстрые, но незначительные улучшения (0-5%).

Таблица 4 – Сравнение результатов работы конструктивных эвристик на различных метриках

# Код задачи	<i>Жадная эвристика</i>			<i>Случайная эвристика</i>			<i>Строгая эвристика</i>		
	M_1	M_2	M_3	M_1	M_2	M_3	M_1	M_2	M_3
1 BC+5000(50)	1590	1428	1381	1492	1444	1365	1301	1271	1238
2 TM+5000(100)	1018	933	912	904	825	812	899	828	799
3 GR+10000(50)	1736	1720	1685	1717	1441	1485	1480	1364	1309
4 gC+10000(100)	7290	6980	6980	6659	6526	6443	6672	6539	6443

Новизна и практическая значимость полученных результатов. В результате работы над проектом предложена новая модель задачи оперативного оповещения для распределенной группы мобильных роботов в условиях ограниченной коммуникации. Исследуемая задача заключается в поиске кратчайшего по времени маршрута для изначально осведомленного робота с целью распространения некоторой экстренной информации внутри динамической группы роботов. Ключевой особенностью задачи, выделяющей ее на фоне классических постановок групповой маршрутизации, является тот факт, что до своего оповещения каждый робот выступает в роли нестационарного мобильного клиента, а, после оповещения, прекращает движение по предписанному маршруту, чтобы присоединиться к задаче наискорейшего оповещения в качестве управляемого агента.

Для решения поставленной задачи предложен ряд конструктивных эвристик, а также процедура локального поиска для их дальнейшего улучшения. Предложенные конструктивные эвристики опираются на набор специализированных метрик пространственно-временной близости двух динамических агентов. Процедура улучшения также является проблемно-ориентированной в том смысле, что утилизирует имеющиеся знания о природе задачи.

Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что добавление даже простых проблемно-ориентированных эвристик в классический жадный алгоритм позволяет добиться генерации около-оптимальных решений при небольших вычислительных затратах. Это позволяет говорить о высоких прикладных перспективах данного подхода. Тем не менее, открытым остается вопрос эффективности применения к задаче более продвинутых оптимизационных методов, в том числе гибридных метаэвристик, которые могут быть построены на основе разработанных конструктивных эвристик и эвристики улучшения.

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

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами серии вычислительных экспериментов, проведенных при решении сгенерированного набора тестовых задач по оперативному оповещению группы мобильных роботов [86-89].

4) Разработка основанного на событиях метода планирования пути в неизвестной среде для группы мобильных роботов

Выбор направления исследований. Методы решения задач. Планирование пути и обход препятствий являются наиболее критичными технологиями для обеспечения

автономности и живучести мобильных роботов, действующих в агрессивных и априори неизвестных средах. Планирование пути выглядит одной из наиболее интересных и сложных задач в области робототехники, свидетельством чего отчасти является непрерывный поток публикаций и, как следствие, постоянное обновление обзоров по данной проблематике [97-100].

Методы планирования пути принято разделять на два класса: методы глобального планирования и методы локального (оперативного) планирования. Методы первого класса предполагают наличие глобальной карты, содержащей полную информацию об исследуемой области, включая расположение и форму препятствий, на основе которой строится безопасный путь до целевой точки. Они также находят применение в частично известной среде для построения предварительной траектории движения робота. Методы оперативного планирования призваны корректировать движение робота с целью предотвращения коллизий с препятствиями и другими объектами, используя лишь информацию, получаемую с датчиков.

В последнее время значительное внимание уделяется задаче оперативного планирования пути для группы роботов, движущихся в формации. Она состоит в организации движения группы к целевой точке либо по заданной траектории с сохранением, где это возможно, желаемого взаимного положения роботов и исключением коллизий с препятствиями. Основная сложность задачи определяется, помимо всего прочего, необходимостью удовлетворения дополнительных ограничений, накладываемых на совместное движение роботов, что делает разработку алгоритмов планирования движения для группы заметно более сложной задачей, чем для одного робота. Обзор последних результатов в данной области можно найти в [101].

Наиболее распространенными методами планирования группового движения роботов являются: метод искусственных потенциальных полей, оптимизационные методы, методы интеллектуального поиска и нейронные сети. Каждый из упомянутых методов имеет свои преимущества и недостатки и на данный момент не может рассматриваться как универсальное средство решения задачи планирования с учетом широкого набора требований, предъявляемых к поведению группы в недетерминированных средах. Так для эффективного использования в условиях реальной среды алгоритмы планирования должны удовлетворять следующим критериям: гарантированностью получения результата за приемлемое время, физической реализуемостью получаемых решений (учет кинематических и динамических ограничений роботов) и, по возможности, их оптимальностью. Известным методам планирования полностью удовлетворить всем перечисленным критериям не удастся,

поэтому и по сей день продолжается поиск новых подходов к организации движения группы роботов, действующих в неструктурированных, заранее неизвестных средах.

В рамках реализации проекта в 2021 году предложен событийный подход к планированию движения формации роботов. Задача роботов состоит в следовании по заранее построенному глобальным планировщиком пути с сохранением заданной желаемой геометрической конфигурации, безопасном обходе препятствий, встречающихся по ходу движения, и последующим возвратом в исходную конфигурацию после завершения обходных маневров.

Двухуровневая система планирования совместного движения роботов.

Предложена двухуровневая система управления движением робота, которая включает верхний уровень для определения подходящего режима движения и выполнения высокоуровневых действий, связанных с коррекцией пути, а также нижний уровень, реализующий различные режимы движения (шаблоны поведения) робота. Структура системы управления представлена на рисунке 17.

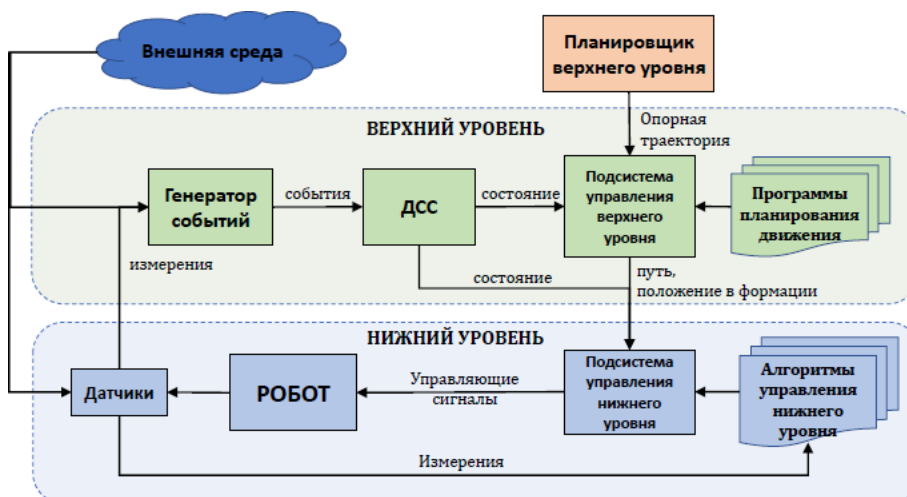


Рисунок 17 – Структура системы управления робота в формации

Алгоритмы управления нижнего уровня. Управление роботами в формации основано на совместном использовании метода опорной точки и схемы «лидер-ведомый» [101]. Опорная точка перемещается вдоль предписанной группе траектории и определяет курс и скорость ее движения, а роботы как ведомые пытаются удерживать заданный курс и сохранять желаемое положение относительно своих лидеров. Предполагается, что в группе имеется один робот, называемый лидером формации, задача которого состоит в следовании за опорной точкой, а также в принятии решения по направлению обхода препятствий и определении момента времени, подходящего для возврата на опорную траекторию.

В зависимости от роли в формации (лидер или ведомый) и текущего режима движения для каждого робота решается одна из трех возможных задач: следование вдоль заданного пути, точнее отслеживание движения точки, перемещающейся вдоль этого пути с переменной скоростью, следование за лидером с выдерживанием общего курса группы и следование вдоль заданного пути с удержанием некоторого расстояния до лидера. Первая задача актуальна для лидера формации, а вторая и третья имеют смысл только для ведомых. Решение перечисленных задач основано на использовании модификаций цифровых законов управления подводными роботами, предложенными в [102], и технологии синтеза цифровых регуляторов на базе векторных функций Ляпунова [103,104].

Дискретно-событийная системы для лидера и ведомых. Разработаны дискретно-событийные системы (ДСС), реализующие логику переключения режимов движения как лидера, так и ведомых. Множество состояний ДСС определяют допустимые режимы движения роботов при движении в группе. Возникновение событий в построенных ДСС по большей части определяется значениями некоторых параметров, характеризующих положение робота относительно препятствий.

Предполагается, что роботы оснащены многолучевым локатором переднего обзора (ЛПО), установленным на борту в плоскости ХОУ для обнаружения препятствий в направлении движения робота. Данные, снимаемые с ЛПО, можно представить в виде набора пар (α_i, ρ_i) , где α_i – угол, отсчитываемый от направления движения робота к направлению луча, ρ_i – расстояние до препятствия в направлении луча, $i = \overline{1, N_b}$, N_b – количество лучей. Для дальнейших целей определим следующие подмножества лучей: $I_L = \{i : \alpha_i \leq 0\}$, $I_R = \{i : \alpha_i > 0\}$. На основе данных ЛПО можно сформировать ситуационную модель среды в виде последовательности точек препятствия $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_b})$.

Для каждой точки препятствия $Q_i \in Q$, $i = \overline{1, N_b}$ определим максимальный радиус поворота R_{\max}^i , который позволяет роботу обойти точку Q_i на безопасном расстоянии D_s . Этот радиус может быть найден по следующей формуле [105]:

$$R_{\max}^i = \rho \frac{\cos \alpha_i}{\sin 2\beta_i} - D_s, \quad \beta_i = \arctan \left(\frac{D_s}{\rho_i} \sec \alpha_i + \tan \alpha_i \right).$$

Очевидно, что в процессе движения не следует допускать ситуации, когда R_{\max}^i меньше, чем минимальный радиус поворота робота R_{\min} , определяемый его габаритами и

физическими возможностями. Также введем величины, определяющие близость препятствий слева и справа по ходу движения:

$$R_{\max}^L = \min_{i \in I_L} R_{\max}^i, \quad R_{\max}^R = \min_{i \in I_R} R_{\max}^i, \quad D_{\min}^L = \min_{i \in I_L} \rho_i, \quad D_{\min}^R = \min_{i \in I_R} \rho_i.$$

На рисунках 18 и 19 представлены упрощенные ДСС, построенные соответственно для лидера группы и ведомых роботов.

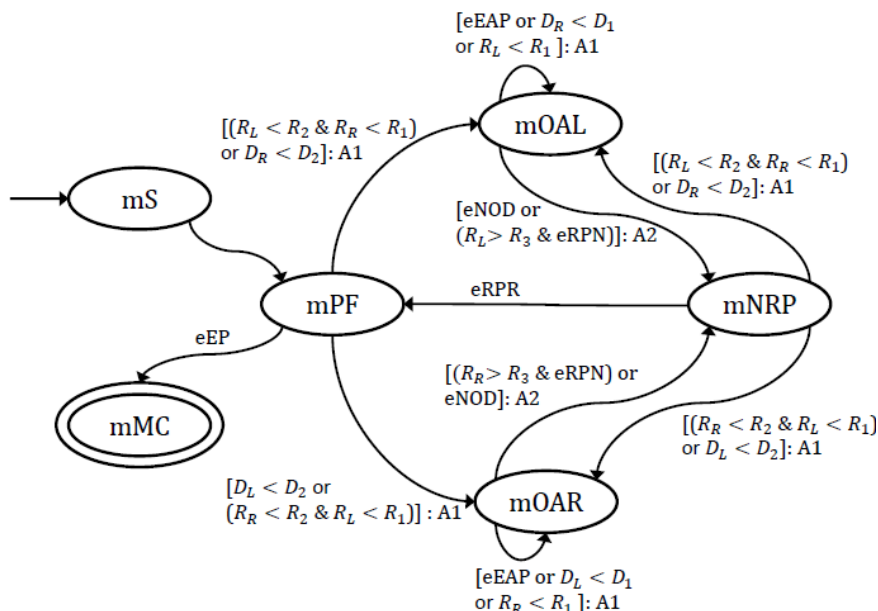


Рисунок 18– ДСС для лидера группы

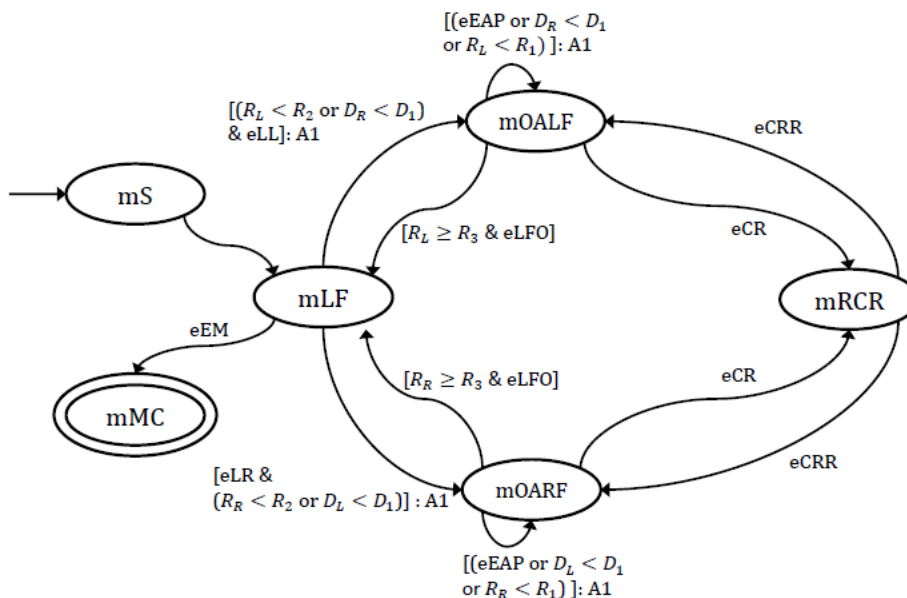


Рисунок 19 – ДСС для ведомых роботов

Вершины приведенных на рисунках графов, представляющих ДСС, соответствуют режимам движения робота, а помеченные дуги – возможным переходам между режимами. Каждая метка дуги имеет вид [C:A], где C – логическое выражение, составленное из

логических связей и элементарных событий. При срабатывании составного события, т.е. когда логическое выражение принимает значение истина, происходит переход в новый режим и выполняется дополнительное действие А. Описание возможных режимов функционирования лидера и ведомых представлены в таблицах 5 и 6 соответственно.

Таблица 5 – Возможные состояния ДСС для лидера

Состояние	Описание
mS	Начало миссии
mPF	Следование по опорной траектории
mOAL	Обход препятствия слева
mOAR	Обход препятствия справа
mNRF	Возврат на опорную траектории
mMC	Миссия завершена

Таблица 6 – Возможные состояния ДСС для ведомых

Состояние	Описание
mS	Начало миссии
mLF	Следование за лидером с сохранением желаемого относительного положения
mOALF	Обход препятствия слева с выдерживание заданного расстояния до лидера
mOARA	Обход препятствия справа с выдерживание заданного расстояния до лидера
mRCR	Разрешение возможного конфликта (столкновений с другими роботами)
mMC	Миссия завершена

Положительные постоянные $R_3 > R_2 > R_1 > R_{\min}$ и $D_2 > D_1 > D_s$ в условиях срабатывания событий определяют степень близости робота к препятствиям и влияют на его поведение в их окрестности. В представленных ДСС используются следующие элементарные события: eEP – достигнут конец текущего пути; eEAP – достигнут конец текущего пути обхода препятствия; eNOD – ЛПО не обнаружил препятствий; eRPN – опорная траектории находится близко по ходу движения; eRPR – опорная траектория достигнута; eLL (eLR) – в желаемой конфигурации лидер находится слева (справа); eLFO – текущее желаемое положение робота в формации находится далеко от препятствий; eCR – робот сблизился с другим роботом, возможно столкновение; eCRR – опасность столкновения с другим роботом миновала. Отметим, что режим mRCR является аварийным и практически не активируется при использовании формаций типа «клин» или «шеренга со сдвигом» [106]. Разрешение потенциального конфликта обеспечивается

регулированием скоростей движения роботов по построенным для них траекториям. В случае, если этот способ не помогает, то применяется алгоритм «Velocity Obstacle» [107].

При возникновении составного события возможно выполнение одного из двух действий: A1 – построить путь обхода препятствия (слева или справа) и A2 – построить путь, соединяющий текущее положение робота с ближайшей допустимой точкой опорной траектории. Для построения пути обхода препятствия или группы препятствий предложен алгоритм, базирующийся на методе направляющих точек [105,108] и позволяющий на основе простой модели среды, формируемой по данным, снимаемым с ЛПО, эффективно генерировать последовательность путевых точек, которые затем соединяются гладкой кривой с учетом кинематических ограничений, определяемых минимальным радиусом поворота робота. Построение пути, соединяющего текущее положение робота с опорной траекторией, реализуется с применением алгоритма, основанного на кривых Дубинса, который был предложен в [105].

Стратегия поведения группы, определяемая построенными ДСС, может быть выражена следующим образом:

- стараться не попадать в ситуации, из которых невозможно выбраться с использованием базовых алгоритмов обхода препятствий.
- не менять однажды выбранное направление обхода препятствий, пока робот не вернется на опорную траекторию (правило левой или правой руки);
- перестраивать путь только в том случае, если это жизненно необходимо.

Предложенный двухуровневый подход к планированию группового движения роботов тестировался в различных сценариях и продемонстрировал свою работоспособность и эффективность.

Новизна и практическая значимость полученных результатов. Полученные результаты обеспечивают решение задачи планирования движения и управления группой роботов, действующих в заранее неизвестной среде. В отличие от большинства известных исследований (см., например, [108,109]), где перед группой стоит задача прийти в заданную целевую точку, в проекте исследуется более сложная постановка, в которой роботы должны перемещаться по предписанной ей траектории с сохранением, где это возможно, желаемой геометрической конфигурации.

Основным преимуществом предложенного метода планирования движения роботов является незначительные требования к вычислительным ресурсам, простая реализация и хорошая разъяснительная база, позволяющая за счет использования логики на верхнем уровне объяснять поведение группы в различных ситуациях, что в конечном счете

упрощает процесс проектирования и отладки систем управления роботов, выполняющих совместные работы в неизвестной среде. Помимо перечисленного, предложенная схема планирования имеет ряд преимуществ по сравнению с другими известными решениями. В частности, в отличие от методов, основанных на потенциальных функциях [108-110], он не имеет проблем с попаданием в локальные экстремумы, а следовательно и не требует наличия специальных механизмов для выхода из них, а также не предполагает непрерывной коррекции отслеживаемого пути – ее пересчет происходит только при возникновении определенного набора элементарных событий. Кроме того, в отличие от большинства известных алгоритмов планирования в предлагаемом подходе роботам для принятия решения и формирования управляющих воздействий не требуется обзирать все окружающее его пространство, достаточно информации, получаемой от ЛПО. Стоит также заметить, что траектория движения робота строится на основе достаточно точной модели среды, а не с применением грубых аппроксимаций, имеющих вид простейших геометрических фигур (как правило, кругов). Использование точной модели позволяет повысить качество выполняемых группой работ.

Методы, использованные для синтеза алгоритмов управления нижнего уровня, реализующих элементарные шаблоны поведения роботов, позволяют обеспечивать требуемое или оптимальное качество решения групповых задач, в частности управления формациями роботов, а также в комплексе учитывать погрешности датчиков, различного рода возмущения, ограничения на ресурсы управления и другие факторы неопределенности, присущие реальным условиям функционирования роботов в физических средах. Синтезированные алгоритмы не требуют непрерывного измерения параметров движения роботов и значительных вычислительных ресурсов для вычисления управляющих сигналов, что упрощает реализацию этих алгоритмов на борту. Отметим, что эти алгоритмы также эффективно использовались при разработке стратегии управления группой роботов в задачи мониторинга нестационарного физического поля [111].

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

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

5) Разработка и исследование математической модели распространения распределенной двухкомпонентной группировки подводных роботов, описываемой системой нелинейных уравнений типа реакции-диффузии.

Распределенная модель освоения пространства взаимодействующими роботами двух типов. Была изучена система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа, рассматриваемая в качестве распределенной математической модели процесса обследования трехмерного пространства взаимодействующими роботами двух типов. Построены параметрические семейства точных решений, которые могут использоваться для формирования управления процессом обследования за счет создания и изменения во времени по заданному закону требуемых плотностей на границе области, являющейся базой для роботов.

Рассматривается проблема моделирования процесса обследования трехмерного пространства взаимодействующими роботами двух различных типов. Предполагается, что количество роботов настолько велико, что целесообразно перейти к их распределенному описанию в терминах плотностей $u(t, x), v(t, x)$, соответствующих моменту времени $t \geq 0$ и точке пространства $x \in R^3$. Процесс обследования начинается с границы некоторой подобласти $G \subset R^3$ (например, шара) интерпретируемой как база для роботов, на которой плотности могут изменяться как заданная функция времени. Эту функцию можно считать управлением, которое мы можем выбирать. Задача состоит в том, чтобы выбрать такое управление, которое гарантирует обследование (т.е. положительные плотности) в некоторой существенно большей области пространства, содержащей $G \subset R^3$. Для решения задачи необходимо использовать математическую модель, для которой можно найти точные решения.

Предлагается следующая распределенная модель освоения пространства двумя типами взаимодействующих роботов, которая описывается параболической системой двух квазилинейных уравнений реакции-диффузии с объемными источниками (стоками)

$$\begin{aligned} u_t &= \nabla(u^\lambda \nabla u) + \alpha u^{1-\lambda} v^\mu - k_1 u \\ v_t &= \nabla(v^\mu \nabla v) + \beta v^{1-\mu} u^\lambda - k_2 v, \quad t \geq 0, x \in R^3 \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь $u = u(t, x)$ и $v = v(t, x)$ есть искомые функции времени и пространственных переменных, представляющие собой плотности роботов каждого типа в момент времени $t \geq 0$ в точке пространства с координатами $x \in R^3$; ∇ - оператор взятия трехмерного градиента; λ, μ - параметры, характеризующие нелинейность среды; α, β - коэффициенты, характеризующие взаимодействие роботов различных типов (положительность этих коэффициентов означает кооперацию, отрицательность - противодействие); k_1, k_2 - коэффициенты, показывающие уменьшение плотности роботов вследствие поломок, выхода из строя, потери связи и т.п. причин. Первые слагаемые в правых частях системы (24) описывают процесс диффузии, т.е. проникновения роботов в окружающее

пространство. Вторые слагаемые характеризуют взаимовлияние роботов различных типов друг на друга, приводящее к росту или снижению плотности. Последние слагаемые показывают снижение плотности по закону Мальтуса. Таким образом, процесс обследования или освоения пространства роботами происходит за счет «диффузии» с границ базы, ограничивается во времени и пространстве мальтузианской «смертностью», а кооперация роботов различных типов может отчасти такое мальтузианское снижение плотности компенсировать. Поэтому для обследования окружающей базу роботов достаточно объемной области пространства потребуется наращивать плотность на границе базы и задача заключается в отыскании закона этого нарастания, гарантирующего обследование заданной области пространства (т.е. положительные плотности в этой желаемой области).

Отметим, что подобные системы типа реакции-диффузии могут моделировать протекание инфекции в органах и тканях человеческого организма, здесь две плотности могут означать, например, концентрации вируса и лекарственного препарата. Поэтому результаты исследования свойств решений системы (24) могут представлять и более широкий интерес, чем непосредственно задачи, рассматриваемые в робототехнике.

Доказано [112], что система (24) имеет точное решение, представимое в виде

$$u(t, x) = \psi_1(t)[W(x) + \varphi_1(t)]^{\frac{1}{\lambda}},$$

$$v(t, x) = \psi_2(t)[W(x) + \varphi_2(t)]^{\frac{1}{\mu}},$$

где $W(x) = \frac{1}{2}(Ax, x) + (B, x) + C$ – квадратичная функция пространственных переменных, в которой 3×3 матрица A , вектор $B \in R^3$ и скаляр C являются параметрами и определяются из системы алгебраических уравнений, а функции времени $\psi_i(t), \varphi_j(t)$ находятся из системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая строится по коэффициентам исходной системы (24) и уже найденным A, B, C .

Построенные точные решения можно использовать для выбора управляющих законов наращивания плотностей роботов на границах базы, обеспечивающих обследование достаточно большой области к заданному моменту времени. Покажем это на примере.

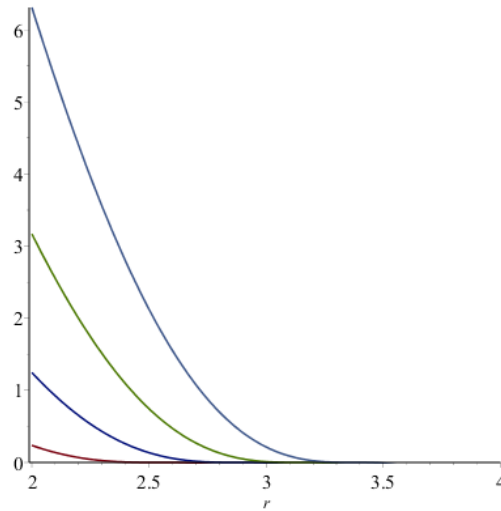


Рисунок 20 – Решение $u(t, x) = \bar{\psi}_1(t)(-0.25\|x\|^2 + \varphi_1(t))^3$

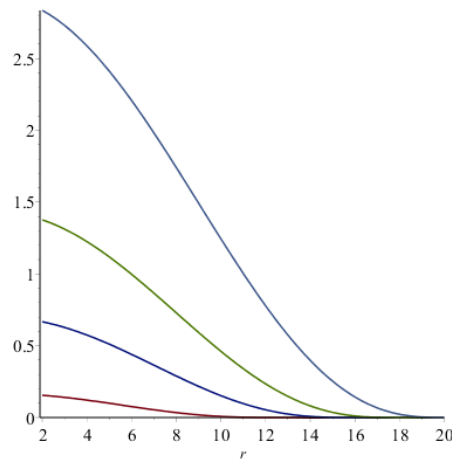


Рисунок 21 – Решение $v(t, x) = \bar{\psi}_2(t)(-0.25\|x\|^2 + \varphi_2(t))^3$

В этом примере шар радиуса $r_0 = 2$ представляет собой базу для роботов, с поверхности которой начинается процесс освоения пространства роботами двух типов, кооперирующих свои действия (α и β положительны). На рисунках 20 и 21 показаны несколько кривых, соответствующих нескольким моментам времени (более поздним моментам времени соответствуют более высокие кривые), по горизонтальной оси абсцисс отложена величина $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$, показывающая расстояние от начала координат.

По вертикальной оси ординат на графиках показаны растущие со временем плотности на границе базы. Форма кривых на рисунках показывает распространение волны в трехмерном пространстве. Точка касания кривой горизонтальной оси абсцисс показывает, до какой части пространства дошла волна заселения к соответствующему моменту времени.

Первые интегралы и устойчивость стационарных движений гиростата.

Рассмотрим векторную форму уравнений движения гиростата с неподвижной точкой под действием момента сил

$$I\dot{\omega} = (I\omega + \lambda) \times \omega + M \quad (25)$$

$$\dot{\gamma} = \gamma \times \omega. \quad (26)$$

Здесь $\omega = col(p, q, r)$ – вектор угловой скорости, $\gamma = col(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – единичный вектор оси симметрии силового поля, заданные проекциями на оси связанной системы координат, $I = I^T > 0$ – симметричная положительно определенная матрица тензора инерции относительно неподвижной точки, $\lambda = col(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ – вектор гиростатического момента, $M = M(t, \gamma, \omega)$ – вектор момента сил, действующих на гиростат. Будем рассматривать в качестве первых интегралов следующие функции и соотношения

$$J_1 = J_1(\gamma, \omega) = \omega^T I \omega + 2U(\gamma) = d_1 = const, \quad (27)$$

$$J_2 = J_2(\gamma, \omega) = \gamma^T (I\omega + \lambda) + \frac{1}{2} \gamma^T S \gamma = d_2 = const, \quad (28)$$

$$J_3 = J_3(\gamma) = \gamma^T \gamma = 1. \quad (29)$$

где $S = S^T$ – некоторая симметричная матрица.

Отметим, что геометрический интеграл (29) имеет место при любом выборе момента $M = M(t, \gamma, \omega)$. Но для того, чтобы у системы (25), (26) существовали интеграл энергии (27) и интеграл площадей (28), момент $M = M(t, \gamma, \omega)$ не может быть произвольным, а должен удовлетворять определенным условиям. Эти необходимые и достаточные условия даются следующим утверждением [113].

Утверждение 1. *Для того, чтобы функции (27) и (28) были первыми интегралами для системы (25), (26) необходимо и достаточно, чтобы момент M был представим в виде*

$$M = \gamma \times \frac{\partial U}{\partial \gamma} - \omega \times S \gamma + L(t, \gamma, \omega) \omega \times \gamma, \quad (30)$$

где $L(t, \gamma, \omega)$ – произвольная функция.

С использованием этих и дополнительных первых интегралов, найденных для ряда выделенных случаев (аналог случая полной динамической симметрии, аналог случая Гесса и т.д.), были выявлены стационарные движения и методом интегральных связей Н.Г.Четаева были получены условия их устойчивости. Результаты опубликованы в [2].

Аналоги случая Бобылева-Стеклова для гиростата. Будем рассматривать для гиростата аналоги классического случая интегрируемости уравнений вращательного движения твердого тела Бобылева-Стеклова. Уравнения движения возьмем в виде

$$A\dot{p} = (B - C)qr + \lambda_2 r - b\gamma_3,$$

$$B\dot{q} = (C - A)pr - \lambda_1 r - k_1 r \gamma_1 \quad (31)$$

$$C\dot{r} = (A - B)pq + \lambda_1 q - \lambda_2 p + b\gamma_1 + k_1 q \gamma_1$$

$$\dot{\gamma}_1 = r\gamma_2 - q\gamma_3, \quad \dot{\gamma}_2 = p\gamma_3 - r\gamma_1, \quad \dot{\gamma}_3 = q\gamma_1 - p\gamma_2. \quad (32)$$

Здесь (p, q, r) – вектор угловой скорости, $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ – единичный вектор вертикали, заданные проекциями на оси связанной системы координат, $diag(A, B, C)$ – матрица тензора инерции относительно неподвижной точки, $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ – вектор гиросtatического момента, параметры b и k_1 соответственно характеризуют моменты потенциальных и гироскопических сил, действующих на гиростат.

Если гиросtatический момент отсутствует ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0$), момент гироскопических сил не действует ($k_1 = 0$), и моменты инерции удовлетворяют условию $B = 2A$, то система (31), (32) соответствует классическому случаю Бобылева-Стеклова.

Утверждение 2. В случае $\lambda_2 = k_1 = 0, B = 2A$ система (31), (32) имеет семейство решений, для которых $p(t) = a_0 + a_1 \gamma_1(t), q(t) = q_0 = const, r(t) = 0$, а $\gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t)$ определяются из системы трех уравнений

$$\dot{\gamma}_1 = -q_0 \gamma_3, \quad \dot{\gamma}_2 = (a_0 + a_1 \gamma_1) \gamma_3, \quad \dot{\gamma}_3 = q_0 \gamma_1 - (a_0 + a_1 \gamma_1) \gamma_2. \quad (33)$$

Здесь $q_0 \neq 0$ произвольное вещественное число, $a_0 = \frac{\lambda_1}{A}, a_1 = \frac{b}{Aq_0}$.

Утверждение 3. В случае $\lambda_1 = 0, (A - B)b + k_1 \lambda_2 = 0, \lambda_2 \neq 0, B \neq A$ система (31), (32) имеет семейство решений, для которых $p(t) = a_0 + a_1 \gamma_1(t), q(t) = q_0 = const, r(t) = 0$, а $\gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t)$ определяются из системы (33), где $q_0 = \frac{\lambda_2}{A - B}$, a_0 – произвольное вещественное число, $a_1 = \frac{b(A - B)}{A\lambda_2}$.

Утверждение 4. В случае $D = b^2(2A - B)^2 + 4Abk_1\lambda_2 \geq 0, k_1 \neq 0, B \neq A$ система (31), (32) имеет семейство решений, для которых $p(t) = a_0 + a_1 \gamma_1(t), q(t) = q_0 = const, r(t) = 0$, а $\gamma_1(t), \gamma_2(t), \gamma_3(t)$ определяются из системы (33), где в качестве q_0 допускаются те из двух чисел $q_0^+ = \frac{b(B - 2A) + \sqrt{D}}{2Ak_1}$ и $q_0^- = \frac{b(B - 2A) - \sqrt{D}}{2Ak_1}$, которые отличны от нуля и от $\frac{\lambda_2}{A - B}$, а числа a_0 и a_1 даются формулами $a_0 = \frac{\lambda_1 q_0}{(B - A)q_0 + \lambda_2}, a_1 = \frac{b}{Aq_0}$.

Система (33) имеет первые интегралы $J_3 = \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1, J_4 = a_0 \gamma_1 + 0.5a_1 \gamma_1^2 + q_0 \gamma_2 = c_4$ и интегрируется в эллиптических функциях. Используя первые интегралы J_3 и J_4 выразим γ_3 через γ_1 ,

$$\gamma_3 = F(\gamma_1) = \sqrt{1 - \gamma_1^2 - \frac{1}{q_0^2}(c_4 - a_0 \gamma_1 - 0.5\gamma_1^2)^2}$$

Теперь $\gamma_1(t)$ находится из первого уравнения системы (33) обращением эллиптического интеграла

$$\int \frac{d\gamma_1}{F(\gamma_1)} = -q_0(t + c_5). \quad (34)$$

Тем самым установлено, что при условиях утверждений 1-3 упоминаемые в них решения системы (31), (32) выражаются эллиптическими функциями времени.

Как известно, эллиптический интеграл вида (34) берется в элементарных функциях только в случаях, когда у полинома четвертой степени в подкоренном выражении имеются кратные корни. Иногда это дает возможность получить точное решение системы уравнений гиростата (31), (32), представленное элементарными функциями в явном виде.

Пример. Будем рассматривать трехпараметрическое семейство систем вида (31), (32), где свободными параметрами являются A, C, λ_2 , удовлетворяющие неравенствам $0 < A < C < 3A$, $\lambda_2^2 \neq A^2$, а остальные коэффициенты B, λ_1, k_1, b выражаются через параметры по формулам

$$B = 2A, \lambda_1 = -\frac{\sqrt{3}(A+\lambda_2)}{9}, k_1 = \frac{8\sqrt{3}\lambda_2}{9}, b = \frac{8\sqrt{3}A}{9}.$$

Тогда каждая система из названного семейства имеет точное решение

$$\begin{aligned} p(t) &= \frac{4\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{t^2 - 6}{t^2 + 3} - \frac{\sqrt{3}}{9}, & q(t) &= 1, & r(t) &= 0, \\ \gamma_1(t) &= \frac{1}{2} \cdot \frac{t^2 - 6}{t^2 + 3}, & \gamma_3(t) &= -\frac{t}{t^2 + 3} + \frac{(t^2 - 6)t}{(t^2 + 3)^2} \\ \gamma_2(t) &= \frac{5\sqrt{3}}{9} + \frac{\sqrt{3}}{18} \cdot \frac{t^2 - 6}{t^2 + 3} - \frac{\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{(t^2 - 6)^2}{(t^2 + 3)^2} \end{aligned} \quad (35)$$

Очевидно, что для всех компонент решения существуют пределы

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} p(t) = p_* = \frac{\sqrt{3}}{3}, \lim_{t \rightarrow \pm\infty} q(t) = q_* = 1, \lim_{t \rightarrow \pm\infty} r(t) = r_* = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \gamma_1(t) = \gamma_{1*} = \frac{1}{2}, \lim_{t \rightarrow \pm\infty} \gamma_2(t) = \gamma_{2*} = \frac{\sqrt{3}}{2}, \lim_{t \rightarrow \pm\infty} \gamma_3(t) = \gamma_{3*} = 0.$$

Таким образом, данное решение описывает случай такого движения гиростата, когда далекое прошлое и далекое будущее абсолютно симметричны. Система медленно «выходит» из неустойчивого по Ляпунову стационарного состояния $(p_*, q_*, r_*, \gamma_{1*}, \gamma_{2*}, \gamma_{3*})$, в котором находилась в бесконечно далеком прошлом (при $t \rightarrow -\infty$), совершает интенсивное движение в настоящем (на сравнительно коротком интервале времени вблизи нуля), и медленно возвращается в то же самое неустойчивое стационарное состояние в бесконечно далеком будущем (при $t \rightarrow +\infty$). При этом постоянно действуют как момент потенциальных сил ($b \neq 0$), так и момент

гироскопических сил ($k_1 \neq 0$), присутствует также постоянный гиростатический момент ($\lambda \neq 0$).

Отметим, что при действии момента гироскопических сил (т.е. при $k_1 \neq 0$), в отличие от классического случая уже не удастся получить в утверждениях 3 и 4 семейство решений с произвольным $q_0 \neq 0$. Зато в них не требуется выполнения довольно жесткого условия на равенство моментов инерции $B = 2A$.

Результаты были представлены на конференции [114].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в рамках НИР выполнены в полном объеме и в соответствии с государственным заданием ИДСТУ СО РАН на 2021 г. по теме «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (№ гос. рег. 121032400051-9, шифр научной темы FWEW-2021-0005). Содержание НИР раскрыто в плане НИР ИДСТУ СО РАН на 2021 г.

В процессе выполнения работ НИР в 2021 г. получены следующие результаты:

- 1) разработана гибридная имитационная модель анализа функционирования компонентов ИВС и их программно-аппаратных инфраструктур, представленных программными агентами;
- 2) разработаны булевы модели качественного анализа нелинейных управляемых двоичных динамических систем на основе логического подхода;
- 3) разработаны способы построения нормальных форм для позитивно-образованных формул с темпоральными операторами;
- 4) решена задача супервизорного управления частично наблюдаемыми дискретно-событийными системами с применением метода автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул;
- 5) разработана алгоритмическая схема эффективного группового поведения при осуществлении оперативного оповещения внутри динамических распределенных робототехнических группировок;
- 6) разработан основанный на событиях метод планирования пути в неизвестной среде для группы мобильных роботов;
- 7) разработана и исследована математической модели распространения распределенной двухкомпонентной группировки подводных роботов (например,

исследователи и заправщики), описываемой системой нелинейных уравнений типа реакции-диффузии.

По результатам НИР опубликовано 25 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus; 7 работ в изданиях, включенных в базу данных РИНЦ. Общее количество публикаций по результатам выполнения НИР в 2021 г. – 39, из них в журналах – 23.

Перечень работ, опубликованных по результатам выполнения НИР в 2021 г., приведен в приложении А.

Наиболее значимые результаты выполнения НИР в отчетном 2021 г.:

1. Разработаны инструментальные средства организации взаимодействия между GPSS-моделью и агентами, представляющими компоненты ИВС и их программно-аппаратные инфраструктуры. Данные средства обеспечивают доставку, размещение и настройку агентов в узлах среды, конфигурирование требуемого прикладного и системного ПО, а также поддержку запросов GPSS-модели к агентам с помощью специализированного API. Их применение обеспечивает существенное сокращение сроков подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов по имитационному моделированию ИВС, а также повышение надежности распределенных вычислений. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., к.т.н. Феоктистов А.Г., к.т.н., Костромин Р.О., к.т.н. Горский С.А., к.т.н. Сидоров И.А., к.т.н. Башарина О.Ю.
2. Разработаны булевы модели динамических свойств нелинейных управляемых двоичных динамических систем (ДДС) на основе логического подхода, позволяющего за счет параллелизма по данным существенно увеличить размерность вектора состояния системы и промежуток времени ее функционирования при решении NP-сложных задач качественного анализа в высокопроизводительной вычислительной среде. Практическая значимость полученных результатов обусловлена широким применением ДДС как моделей нелинейных управляемых объектов при проведении исследований в биоинформатике, криптографии, исследовании отказоустойчивости компьютерных сетей и во многих других предметных областях. *Авторы результата:* д.т.н. Опарин Г.А., к.т.н. Богданова В.Г., Пашинин А.А.
3. Разработан подход к решению задачи супервизорного управления частично-наблюдаемыми дискретно-событийными системами (ДСС), основанный на применении метода автоматического доказательства теорем в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). Он позволяет автоматизировать проверку условий

существования супервизоров, таких как управляемость и наблюдаемость, модифицировать спецификации в случае нарушения этих условий, а также обеспечить построение и реализацию супервизорного управления для частично-наблюдаемых ДСС без использования автоматов-наблюдателей. Разработанный подход существенно расширит возможности применения теории супервизорного управления ДСС на верхнем уровне управления группами роботов. *Авторы результата:* Давыдов А.В., Ларионов А.А., к.ф.-м.н. Нагул Н.В.

4. Разработана оригинальная математическая модель и эвристический подход к решению задачи маршрутизации мобильных роботов при осуществлении оперативного оповещения распределенной робототехнической группировки. Разработанный подход позволяет за близкое к реальному время формировать маршрут для робота-инициатора, являющегося носителем некоторой ключевой информации, по распространению этой информации до всех остальных нестационарных членов группы в условиях ограниченной коммуникации. Произведена программная реализация подхода и серия вычислительных экспериментов, демонстрирующая его высокую эффективность и перспективность. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., к.т.н. Максимкин Н.Н., Кензин М.Ю.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Uhlemann T.H.-J. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0 / T.H.-J. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 61. – P. 335–340.
2. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger et al. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, № 11. – P. 1016–1022.
3. Iafrate F. A Journey from Big Data to Smart Data / F. Iafrate // *Proc. of the Second Int. Conf. on Digital Enterprise Design and Management*. Springer, Cham. – 2014. – P. 25–33.
4. Didenko N.I. Big data and the global economy / N.I. Didenko, D.F. Skripnuk, O.V. Miroljubova // *Proc. of the Tenth Int. Conf. Management of Large-Scale System Development (ML SD)*. Moscow, Russia. – 2017. – P. 1–5.
5. Девятков В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития / В.В. Девятков. М.: ИНФРА-М, 2013. – 448 с.
6. Imitational Studies with GPSS WORLD: New Capabilities / S.A. Vlasov // *Automation and Remote Control*. – 2014. – Vol. 75, № 2. – P. 389–398.
7. Sulistio A. A Taxonomy of Computer-Based Simulations and Its Mapping to Parallel and Distributed Systems Simulation Tools / A. Sulistio // *Software: Practice and Experience*. – 2004. – Vol. 34, № 7. – P. 653–673.
8. Improving Productivity in Design and Development of Information Technology (IT) Service Delivery Simulation Models / A. Beloglazov // *Journal of Service Research*. – 2015. – Vol. 18, № 1. – P. 75–89.
9. Discrete simulation software ranking – A top list of the worldwide most popular and used tools / L.M.S. Dias // *Proc. of the Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE. – 2016. – P. 1060–1071.
10. Schriber T.J. *Simulation Using GPSS* / T.J. Schriber. John Wiley & Sons: NY, USA. – 1974. – 533 p.
11. Toolkit for Simulation Modeling of Queue Systems in Grid // A. Feoktistov et al. // *Proc. of the 1st Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2019, Irkutsk, Russia, July 8-9, 2019: CEUR-WS Proceedings*. – 2019. – Vol. 2430. – P. 51–59.
12. Kostromin R. Microservice-Based Approach to Simulating Environmentally-Friendly Equipment of Infrastructure Objects Taking into Account Meteorological Data / R.

Kostromin, O. Basharina, A. Feoktistov, I. Sidorov // Atmosphere. – 2021. – Vol. 12, № 9: 1217. – P. 1–24.

13. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solution for Business [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.com> (дата обращения: 01.11.2021).

14. Quigley J.M. Configuration Management: Theory, Practice, and Application / J.M. Quigley, K.L. Robertson. – Auerbach Publications, 2015. – 438 p.

15. Sidorov I. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment / I. Sidorov, R. Kostromin, A. Feoktistov // Proc. of the 2nd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments, ICCS-DE 2020, Irkutsk, Russia, July 6-7, 2020. CEUR-WS Proceedings. – 2020. – Vol. 2638. – P. 252–264.

16. Parallel-SSH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://parallel-ssh.org/> (дата обращения: 01.11.2021).

17. Костромин Р.О. Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников / Р.О. Костромин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 1 (21). – С. 132–145.

18. Delaet T. A survey of system configuration tools / T. Delaet, W. Joosen, B. Vanbrabant // Proc. of the 24th Int. Conf. on Large installation system administration. USENIX Association, USA. – 2010. – P. 1–8.

19. Virtualization of Heterogeneous HPC-clusters Based on OpenStack Platform / A. Feoktistov et al. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6, № 2. – С. 37–48.

20. GitHub [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com> (дата обращения: 01.11.2021).

21. Mercurial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mercurial-scm.org> (дата обращения: 01.11.2021).

22. Puppet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://puppet.com/> (дата обращения: 01.11.2021).

23. Chef [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.chef.io/products/chef-infra> (дата обращения: 01.11.2021).

24. Ansible [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ansible.com> (дата обращения: 01.11.2021).

25. SaltStack [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.saltstack.com> (дата обращения: 01.11.2021).

26. Интеллектуализация разработки распределенных пакетов прикладных программ на основе непрерывной интеграции программного обеспечения и конфигурирования ресурсов / И.В. Бычков и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. по материалам VII Междунар. конф. и молодеж. шк. (ИТНТ-2021): в 3 т. Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та им. С. П. Королева, 2021. – Т. 3. – С. 033232.

27. Kostromin R. Service-Oriented Tools for Automating Digital Twin Development / R. Kostromin, A. Feoktistov, M. Voskoboinikov // Proc. of the 4th Scientific-practical Workshop on Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021), Irkutsk, Russia, September 14, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2984. – P. 95–100.

28. Бычков И.В. Автоматизация конфигурирования вычислительных узлов среды / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // XIV Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Материалы XVI мультиконференции: в 4 т. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2021. – Т. 2. – С. 97–99.

29. Agent-based Intellectualization of Continuous Software Integration and Resource Configuration for Distributed Computing / I. Bychkov et al. // Proc. of the 7th Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2021). IEEE. – 2021. Принята в печать.

30. Горский С.А. Средства организации расчетных баз данных, предназначенных для сбора, хранения и обработки многовариантных экспериментальных данных / С.А. Горский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662947. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – 2021.

31. Feoktistov A.G. Static-dynamic algorithm for managing asynchronous computations in distributed environments / A.G. Feoktistov. S.A. Gorsky // Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2858. – P.64–73.

32. Algorithms for Planning on Computational Model with Redundancy and Uncertainty / A. Feoktistov et al. // Programming and Computer Software. – 2021. – Vol. 47, № 8. – P. 601-614. Принята в печать.

33. Алгоритмы планирования вычислений с учетом избыточности и неопределенности / А.Г. Феоктистов // Труды ИСП РАН. Принята в печать.

34. Поддержка вычислений в распределенных средах на основе непрерывной интеграции / И.В. Бычков // Информационные технологии. – 2021. – № 12. – С. 619-625.

35. Information and algorithmic support of a multi-level integrated system for the investment strategies formation / D.A. Gercekovich // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2913. – P. 74–84.
36. Edelev A.V. Identification of the energy system critical elements using the PARMONC library / A.V. Edelev, M.A. Marchenko, O.Yu Basharina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1715. – P. 012064.
37. Taou N. S. Evolving Boolean networks for biological control: State space targeting in scale free Boolean networks / N.S. Taou, D.W. Corne, M.A. Lones // Proc. of IEEE Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB), Chiang Mai, Thailand, 2016. – P. 1–6.
38. Boolean Modeling of Biochemical Networks / T. Helikar et al. // The Open Bioinformatics Journal. – 2011. – Vol. 5. – P. 16–25.
39. Zanin M. Boolean Networks for Cryptography and Secure Communication / M. Zanin, A. N. Pisarchik // Nonlinear Sci. Lett. B. – 2011. – Vol. 1 – №.1. – P. 25–32.
40. Dubrova E and Teslenko M 2016 A SAT-Based algorithm for finding short cycles in shift register based stream ciphers / E. Dubrova, M. Teslenko // IACR Cryptology ePrint Archive. – 2016. – P. 1068.
41. Dubrova E. A computational model based on Random Boolean Networks / E. Dubrova, M. Teslenko // Proc. of the 2nd Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems. – 2007.
42. Dubrova E. Self-Organization for Fault-Tolerance / E. Dubrova // Hummel K.A., Sterbenz J.P.G. (eds.) Self-Organizing Systems. IWSOS. – 2008. Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 5343. – Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92157-8_13.
43. Li R. Controllability and observability of Boolean networks arising from biology / R. Li, M. Yang, T. Chu // Chaos. – 2015. – V. 25. – № 2. – P. 023104. DOI: 10.1063/1.4907708.
44. Controlling large Boolean networks with single-step perturbations / A. Baudin et al. // Bioinformatics. – 2019. – Vol. 35. – P. 558–567.
45. Cheng D.Z. Analysis and control of Boolean networks: semi-tensor product approach / D.Z. Cheng, H.S. Qi, Z.Q. Li // London: Springer-Verlag. – 2011. – P. 469.
46. Survey on semi-tensor product method with its applications in logical networks and other finite valued systems / J. Lu et al. // IET Control Theory & Applications. – 2017. – Vol. 11. – № 13.

47. Symbolic dynamics of Boolean control networks / G. Hochma et al. // *Automatica*. – 2013. – Vol. 49. – № 8. – P. 2525–2530.
48. Zhao Y. Input-state incidence matrix of Boolean control networks and its applications / Y. Zhao, H. Qi, D. Cheng // *Sys. Contr. Lett.* – 2010. – Vol. 59. – № 12. – P. 767–774.
49. Bardet M. On the complexity of the F5 Gröbner basis algorithm / M. Bardet, J.-C. Faugère, B. Salvy // *Journal of Symbolic Computation*. – 2015. – Vol. 70. – P. 49–70.
50. Oparin G. Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems / G. Oparin, V. Bogdanova, A. Pashinin // *MESA*. – 2019. – Vol. 10. – № 3. – P. 407–419.
51. Terrell W. J. Some Fundamental Control Theory I: Controllability, Observability, and Duality / W.J. Terrel // *The American Mathematical Monthly*. – 1999. – Vol. 106. – № 8. – P. 705–719.
52. Oparin G.A. Investigation of observability property of controlled binary dynamical systems: a logical approach / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings*. – 2021. – Vol. 2913. – P. 129–138.
53. Gong W. A survey of SAT solver / W. Gong, X. Zhou // *In AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1836. – P. 020059.
54. Twelve Years of QBF Evaluations: QSAT Is PSPACE-Hard and It Shows / P. Marin // *Fundam. Informaticae*. – 2016. – Vol. 149. – № 1-2. – P. 133–158.
55. Bogdanova V.G. HPC-based parallel software for solving applied Boolean satisfiability problems / V.G. Bogdanova, S.A. Gorsky, A.A. Pashinin // *Proc. of the 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 28 Sept. – 2 Oct. 2020, Opatija, Croatia. IEEE-2020*. – P. 1231–1236.
56. Microservice-oriented approach to automation of distributed scientific computations / G.A. Oparin et al. // *Proc. of the 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 28 Sept. – 2 Oct. 2020, Opatija, Croatia. IEEE-2020*. – P. 236–241.
57. Irudayaraj J. P. Adoption Advantages of micro-service architecture in software industries / J. P. Irudayaraj, P. Saravanan // *International Journal of Scientific & Technology Research*. – 2019. – 8. – P. 183–186.

58. Francesco P.D. Architecting with microservices: A systematic mapping study / P.D. Francesco, P. Lago, I. Malavolta // *The Journal of Systems and Software*. – 2019. – Vol. 150. – P. 77–97.

59. Oparin G.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *MESA*. – 2021, принята в печать.

60. Oparin G.A. Application of binary dynamical systems in the problem of classification of Boolean vectors / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings*. – 2021. – Vol. 2858. –

P. 127–134.

61. Oparin G.A. Service-oriented Application for Solving Parametric Synthesis Problem of a Boolean Network with Given Dynamic Properties / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 27 Sept. – 1 Oct. 2021, Opatija, Croatia. IEEE-2021*. – P. 242–247.

62. Oparin G.A. A logical method for the synthesis of periodic trajectory in a binary dynamical system / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings*. – 2021. – Vol. 2913. –

P. 119–128.

63. Pashinin A.A. Application of user dew agent in hybrid-computing environments / A.A. Pashinin, V.G. Bogdanova // *Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings*. – 2021. – Vol. 2858. – P. 135–145.

64. Пашинин А.А. Средства автоматизации построения композитных сервисов для научных вычислений / А.А. Пашинин, В.Г. Богданова // *Материалы Межд. научной конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2021), г. Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021. Короткие статьи и описания плакатов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 283.*

65. Oparin G.A. Classification in binary feature space using logical dynamic models / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 44th International Convention on*

Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 27 Sept. – 1 Oct. 2021, Opatija, Croatia. IEEE-2021. – P. 1020–1025.

66. A note on observability of Boolean control networks / D. Cheng et al. // *Sys. Contr. Lett.* – 2016. – Vol. 87. – P. 76–82.

67. Akutsu T. Algorithms for inference, analysis and control of Boolean networks / T. Akutsu, M. Hayashida, T. Tamura // *International Conference on Algebraic Biology.* – 2008. – P. 1–15.

68. Oparin G. A. Microservice approach to the qualitative study of attractors of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // *Proc. of the 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 28 Sept. – 2 Oct. 2020, Opatija, Croatia. IEEE-2020. – P. 1904–1909.

69. Tseytin G.S. On the complexity of derivation in propositional calculus / G.S. Tseytin // In: Slisenko, A.O. (ed.) *Studies in Constructive Mathematics and Mathematical Logic, Part II, Seminars in Mathematics.* – 1970. – P. 115–125.

70. Plaisted D.A. A Structure Preserving Clause Form Translation / D.A. Plaisted, S. Greenbaum // *J. Symbolic Computation.* – 1986. – Vol. – № 3. – P. 293–304.

71. An ANF to CNF Converter using a Dense/Sparse Strategy. [Электронный ресурс]. – P. 19. Режим доступа: <https://doc.sagemath.org/pdf/en/reference/sat/sat.pdf> (дата обращения: 01.11.2021).

72. Toda T. Implementing Efficient All Solutions SAT Solvers / T. Toda, T. Soh // *ACM Journal of Experimental Algorithmics.* – 2016. – Vol. 21. – № 1. – P. 1–44.

73. Lonsing F. DepQBF: A Dependency-Aware QBF Solver / F. Lonsing, A. Biere // *Journal of Satisfiability, Boolean Modeling and Computation.* – 2010. – Vol. 9. – P. 71–76).

74. Vassilyev S.N. Machine Synthesis of Mathematical Theorems / S.N. Vassilyev // *The Journal of Logic programming.* – 1990. – Vol.9, № 2-3. – P. 235-266.

75. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев и др. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 352 с.

76. Davydov A.V. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving / A.V. Davydov, A.A. Larionov, E.A. Cherkashin // *Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS).* – 2011. – Vol.45, № 7. – P. 402-407.

77. Lafortune S. Discrete Event Systems: Modeling, Observation, and Control / S. Lafortune // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems.* – 2019. – Vol. 2. – P. 141-159.

78. Wonham W.M. Supervisory Control of Discrete-Event Systems / W.M. Wonham, K. Cai // Communication and control engineering: Springer International Publishing, 2019. – 487 p.
79. Supervisory Control Algorithm Based on Property-Directed Reachability / K. Claessen et al. // Lecture Notes in Computer Science book series (LNCS) Haifa Verification Conference HVC 2017: Hardware and Software: Verification and Testing. – 2017. – Vol. 10629. – P. 115-130.
80. Hierarchical event-based control of multi-robot systems in unstructured environments / I. Bychkov et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1864. – P. 012001.
81. Davydov A.V. Modular discrete event systems control based on logic inference / A.V. Davydov, A.A. Larionov, N.V. Nagul // CEUR Workshop Proceedings, ICCS-DE 2021. – 2021. – Vol. 2913. – P. 32-46.
82. Davydov A.V. The construction of controllable sublanguage of specification for DES via PCFs based inference / A.V. Davydov, A.A. Larionov, N.V. Nagul // CEUR Workshop Proceedings, ICCS-DE 2020. – 2020. – Vol. 2638. – P. 68-78.
83. Geng X. Verifying Diagnosability of Discrete Event System with Logical Formula / X. Geng, D. Ouyang, C. Han // Chinese J. Electron. - 2020. – Vol. 29. – P. 304-311.
84. Gan S.K. Distributed situational awareness and control / S.K Gan, Z, Xu, S. Sukkarieh // Encyclopedia of Aerospace Engineering. – 2016. – P. 1–11.
85. Papp Z. Situational awareness in intelligent vehicles / Z. Papp // Handbook of Intelligent Vehicles. – 2012. – P 61–80.
86. Кензин М.Ю. Моделирующий комплекс «Situational awareness system for distributed robotic groups» / М.Ю. Кензин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669692. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – 2021. (опубликована 02.12.2021)
87. Kenzin M. Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. На рецензии.
88. Kenzin M. Emergency broadcasting strategies for distributed robotic groups under limited communication / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // Journal of Physics: Conference Series: Multiconference on Control Problems (MCCP 2020, 6-8 October 2020). – 2021. – Vol. 1864(1). P. 012043.

89. Кензин М.Ю. Стратегии эффективного распространения информации внутри динамической сети мобильных роботов / М.Ю. Кензин // XXII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов (Новосибирск, 25-29 октября 2021 г.). – 2021. – С. 52-53.
90. Elsasser R. Agent-based information handling in large networks / R. Elsasser, U. Lorenz, T. Sauerwald // In *Mathematical Foundations of Computer Science 2004*. Springer Berlin Heidelberg. – 2004. – P. 586–598.
91. Harutyunyan H.A. Broadcasting algorithm via shortest paths / H.A. Harutyunyan, W. Wang // In *Proc of 2010 IEEE 16th International Conference on Parallel and Distributed Systems*. – 2010. – P. 299–305.
92. Heuristics for spreading alarm throughout a network / M. Simon M et al. // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9(16).
93. New heuristics for burning graphs / Z.R. Farokh et al. // *arXiv:2003.09314v1 [cs.DM]*. – 2020.
94. Pastor-Satorras R. Epidemic dynamics and endemic states in complex networks / R. Pastor-Satorras, A. Vespignani // *Physical Review* – 2001. – Vol. 63(6). – E 63, 066117.
95. Riley S. Large-scale spatial-transmission models of infectious disease / S. Riley // *Science*. – 2007. – Vol. 316(5829). – P. 1298-1301.
96. A taxonomy for task allocation problems with temporal and ordering constraints / E. Nunes et al. // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2017. – Vol. 90. – P. 55-70.
97. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // *Математика и математическое моделирование*. – 2018. – № 1. – С. 15-58.
98. A Comprehensive Review of Path Planning Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles / M. Panda et al. // *International Journal of Automation and Computing*. – 2020. – Vol. 17, № 3. – P. 321-352.
99. Research Progress of Path Planning Methods for Autonomous Underwater Vehicle / H. Chen et al. // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2021.
100. Path planning and obstacle avoidance for AUV: A review / C. Cheng et al. // *Ocean Engineering*. – 2021. – Vol. 235.
101. Hadi B. A Review of the path planning and formation control for multiple autonomous underwater vehicles / B. Hadi, A. Khosravi, P. Sarhadi // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. – 2021. – Vol. 101(4).
102. Ul'yanov S. Formation path-following control of multi-AUV systems with adaptation of reference speed / S. Ul'yanov, N. Maksimkin // *Mathematics in Engineering, Science and Aerospace (MESA)*. – 2019. – Vol. 10, № 3. – P. 487-500.

103. Vassilyev S. A VLF-based Technique in Applications to Digital Control of Nonlinear Hybrid Multirate Systems / S. Vassilyev, S. Ulyanov, N. Maksimkin // 12th Int. Conf. on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Science (ICNPAA 2018 World Congress), Yerevan, Armenia, 3-6 July, 2018: AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1798. – P. 020170(1)-020170(10).
104. Kozlov R.I. Investigation of stability of nonlinear continuous-discrete models of economic dynamics using vector Lyapunov function I / R.I. Kozlov O. R. Kozlova // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2009. – Vol. 48(2). – P.262–271.
105. Ulyanov S. Event-based path-planning and path-following in unknown environments for underactuated autonomous underwater vehicles / S. Ulyanov, I. Bychkov, N. Maksimkin // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 21. – P. 146-155.
106. Hybrid control approach to multi-AUV system in a surveillance mission / I. Bychkov et al. // Information Technology in Industry. – 2018. – Vol. 6, №1. – P. 20-26.
107. The hybrid reciprocal velocity obstacle / J. Snape et al. // IEEE Transactions on Robotics. – 2011. – Vol. 27, №. 4. – P. 696-706.
108. A real-time path planning algorithm for auv in unknown underwater environment based on combining pso and waypoint guidance / Z. Yan et al. // Sensors. – 2019. – Vol. 19(1).
109. On obstacle avoidance path planning in unknown 3D environments: A fluid-based framework / J. Wu et al. // ISA Transactions. – 2021. – Vol. 111. – P. 249-264.
110. Formation control for autonomous robots with collision and obstacle avoidance using a rotational and repulsive force-based approach / A.D. Dang et al. // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2019. – Vol. 16, № 3. – P. 1-16. 1.
111. Bychkov I.V. A lobster-inspired multi-robot control strategy for monitoring non-stationary concentration fields / I.V. Bychkov, A.A. Tolstikhin, S.A. Ulyanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2099(1). – P. 012027
112. Kosov A.A. Distributed model of space exploration by two types of interacting robots and its exact solutions / A.A. Kosov, E.I. Semenov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1847(1).
113. Kosov A.A. On first integrals and stability of stationary motions of gyrostat / A.A. Kosov, E.I. Semenov // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 2022. – Vol. 430. – P. 133103.
114. Косов А.А. Об аналогах случая Бобылева-Стеклова для гиростата / А.А. Косов // Материалы конф. “Ляпуновские чтения” (Иркутск, 6–10 декабря 2021 г.). Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2021. – С. 27-28.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций

1. Kostromin R. Microservice-Based Approach to Simulating Environmentally-Friendly Equipment of Infrastructure Objects Taking into Account Meteorological Data / R. Kostromin, O. Basharina, A. Feoktistov, I. Sidorov // Atmosphere. – 2021. – Vol. 12, № 9: 1217. – P. 1–24. (опубликована 17.09.2021, DOI: 10.3390/atmos12091217, ISSN: 2073-4433, WOS: 000699345600001, EID: 2-s2.0-85116120025, E-Library: 47101237)

2. Костромин Р.О. Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников / Р.О. Костромин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 1 (21). – С. 132–145. (опубликована 30.04.2021, DOI: 10.38028/ESI.2021.21.1.011, ISSN: 2413-0133, E-Library: 45662417)

3. Интеллектуализация разработки распределенных пакетов прикладных программ на основе непрерывной интеграции программного обеспечения и конфигурирования ресурсов / И.В. Бычков и др. // Информационные технологии и нанотехнологии: Сб. тр. по материалам VII Междунар. конф. и молодеж. шк. (ИТНТ-2021): в 3 т. Изд-во Самар. нац. исслед. ун-та им. С. П. Королева, 2021. – Т. 3. – С. 033232. (опубликована 20.09.2021, ISBN: 978-5-7883-1514-0, E-Library: 46677726)

4. Kostromin R. Service-Oriented Tools for Automating Digital Twin Development / R. Kostromin, A. Feoktistov, M. Voskoboinikov // Proc. of the 4th Scientific-practical Workshop on Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021), Irkutsk, Russia, September 14, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2984. – P. 95–100. (опубликована 16.10.2021, DOI: 10.47350/ITAMS.2021.12, ISSN: 1613-0073, EID: 2-s2.0-85118208778)

5. Бычков И.В. Автоматизация конфигурирования вычислительных узлов среды / И.В. Бычков, А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // XIV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления: Материалы XVI мультikonференции: в 4 т. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2021. – Т. 2. – С. 97–99. (опубликована 27.09.2021, ISBN: 978-5-9275-3851-5)

6. Agent-based Intellectualization of Continuous Software Integration and Resource Configuration for Distributed Computing / I. Bychkov et al. // Proc. of the 7th Int. Conf. on Information Technology and Nanotechnology (ITNT 2021). IEEE. – 2021. Принята в печать.

7. Горский С.А. Средства организации расчетных баз данных, предназначенных для сбора, хранения и обработки многовариантных экспериментальных данных / С.А. Горский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2021662947. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – 2021. (опубликована 10.08.2021)

8. Feoktistov A.G. Static-dynamic algorithm for managing asynchronous computations in distributed environments / A.G. Feoktistov, S.A. Gorsky // Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2858. – P.64–73. (опубликована 05.05.2021, DOI: 10.47350/AICTS.2020.07, ISSN: 1613-0073, EID: 2-s2.0-85105672523, E-Library: 46053064)

9. Algorithms for Planning on Computational Model with Redundancy and Uncertainty / A. Feoktistov et al. // Programming and Computer Software. – 2021. – Vol. 47, № 8. – P. 601-611. Принята в печать. (ISSN: 1608-3261 0361-7688)

10. Алгоритмы планирования вычислений с учетом избыточности и неопределенности / А.Г. Феоктистов // Труды ИСП РАН. Принята в печать.

11. Поддержка вычислений в распределенных средах на основе непрерывной интеграции / И.В. Бычков // Информационные технологии. – 2021. – № 12. – С. 619-625. (опубликована 10.12.2021, DOI: 10.17587/it.27.619-625, ISSN: 1684-6400, E-Library: ...)

12. Information and algorithmic support of a multi-level integrated system for the investment strategies formation / D.A. Gercekovich et al. // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2913. – P. 74–84. (опубликована 24.07.2021, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2021.06, ISSN: 1613-0073, EID: 2-s2.0-85111367594, E-Library: 46949360)

13. Edelev A.V. Identification of the energy system critical elements using the PARMONC library / A.V. Edelev, M.A. Marchenko, O.Yu Basharina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1715. – P. 012064. (опубликована 04.01.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012064, ISSN: 1742-6588, EID: 2-s2.0-85100740698, E-Library: 46752579)

14. Gorsky S., Edelev A., Feoktistov A. Data Processing in Problem-Solving of Energy System Vulnerability based on In-Memory Data Grid // MANCS 2021. Отправлена в редакцию.

15. Oparin G.A. Application of binary dynamical systems in the problem of classification of Boolean vectors / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2858.

P. 127–134. (Опубликована 05.05.2021, DOI: 10.47350/AICTS.2020.15, ISSN 1613-0073, EID: 2-s2.0-85105641778, E-Library: 46086789)

16. Pashinin A.A. Application of user dew agent in hybrid-computing environments / A.A. Pashinin, V.G. Bogdanova // Proc. of the 1st Int. Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS 2021), Irkutsk, Russia, December 7-11, 2020. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2858. – P. 135–145. (Опубликована 05.05.2021, DOI: 10.47350/AICTS.2020.16, ISSN 1613-0073, EID: 2-s2.0-85105623609, E-Library: 46054856)

17. Oparin G.A. Service-oriented Application for Solving Parametric Synthesis Problem of a Boolean Network with Given Dynamic Properties / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Proc. of the 44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 27 Sept. – 1 Oct. 2021, Opatija, Croatia. IEEE-2021. – P. 242–247. (опубликована 15.11.2021, DOI: 10.23919/MIPRO52101.2021.9597079, ISSN 2623-8764)

18. Oparin G.A. Classification in binary feature space using logical dynamic models / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Proc. of the 44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 27 Sept. – 1 Oct. 2021, Opatija, Croatia. IEEE- 2021. – P. 1020–1025. (Опубликована 15.11.2021, DOI: 10.23919/MIPRO52101.2021.9596697, ISSN 2623-8764)

19. Пашинин А.А. Средства автоматизации построения композитных сервисов для научных вычислений / А.А. Пашинин, В.Г. Богданова // Материалы Межд. научной конф. «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2021), г. Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021. Короткие статьи и описания плакатов. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2021. – С. 283. (Опубликована 30.03.2021, E-Library: 45751745)

20. Oparin G.A. A logical method for the synthesis of periodic trajectory in a binary dynamical system / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2913. – P. 119–128. (Опубликована 24.07.2021, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2021.10, ISSN 1613-0073, EID: 2-s2.0-85111352846, E-Library: 46986578)

21. Oparin G.A. Investigation of observability property of controlled binary dynamical systems: a logical approach / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // Proc. of the 3rd Int. Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk, Russia, July 5-9, 2021. CEUR-WS Proceedings. – 2021. – Vol. 2913.

– P. 129–138. (Опубликована 24.07.2021, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2021.11, ISSN 1613-0073, EID: 2-s2.0-85111381554, E-Library: 46949616)

22. Oparin G.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems / G.A. Oparin, V.G. Bogdanova, A.A. Pashinin // MESA, 2021, принята в печать.

23. Bychkov I.V. A lobster-inspired multi-robot control strategy for monitoring non-stationary concentration fields / I.V. Bychkov, A.A. Tolstikhin, S.A. Ulyanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2099, №1. – P. 012027 (опубликована 13.12.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012027, ISSN: 1742-6588)

24. Bychkov I. Hierarchical event-based control of multi-robot systems in unstructured environments / I. Bychkov, S. Ulyanov, N. Nagul, A. Davydov, M. Kenzin, N. Maksimkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1864. – P. 012001. (опубликована 20.05.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012001, ISSN: 1742-6588, EID: 2-s2.0-85107394206, E-Library: 46797541)

25. Davydov A.V. Modular discrete event systems control based on logic inference / A.V. Davydov, A.A. Larionov, N.V. Nagul // CEUR Workshop Proceedings, ICCS-DE 2021. – 2021. – P. 32-46. (опубликована 24.07.2021, DOI: 10.47350/ICCS-DE.2021.11, ISSN 1613-0073, EID: 2-s2.0-85111366474, E-Library: 46949344)

26. Davydov A.V. On events processing in a formal logical approach to the control of discrete event systems / A.V. Davydov, A.A. Larionov, N.V. Nagul // CEUR Workshop Proceedings, AICTS 2021. – 2021. – P. 32-46. Принята в печать.

27. Davydov A. Positively Constructed Formulas-Based Approach to Mobile Robot Control Using DES / A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // Proc. of the 44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 27 Sept. – 1 Oct. 2021, Opatija, Croatia. – 2021. – P. 1064-1069. (опубликована 15.11.2021, DOI: 10.23919/MIPRO52101.2021.9597024, ISSN 2623-8764)

28. Davydov A. Application of the PCF calculus for solving the problem of nonblocking supervisory control of discrete event systems / A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // Journal of Physics: Conference. – 2021. – Vol. 1864, № 1. – P. 012048. (опубликована 20.05.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012048, ISSN: 1742-6588, EID: 2-s2.0-85107446803, E-Library: 46836488)

29. Kosov A. A. Distributed model of space exploration by two types of interacting robots and its exact solutions / A.A. Kosov, E.I. Semenov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. Vol. 1847(1). – P. 012007. (опубликована 15.04.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1847/1/012007, ISSN: 1742-6588, EID: 2-s2.0-85104584404, E-Library: 46055010)

30. Kosov A.A. On first integrals and stability of stationary motions of gyrostat / A.A. Kosov, E.I. Semenov // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. – 2022. – Vol. 430. P. 133103. (опубликована 30.11.2021, DOI: 10.1016/j.physd.2021.133103, ISSN: 0167-2789, ISSN: 0167-2789, EID: 2-s2.0-85120684247)

31. Kenzin M. Self-adaptive coordination for fuel-constrained robot teams with periodic and aperiodic communications / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – Принято к печати. (планируется к публикации 01.02.2022, ISSN 0954-4062, Online ISSN 2041-2983)

32. Kenzin M. Emergency broadcasting strategies for distributed robotic groups under limited communication / M. Kenzin, I. Bychkov, N. Maksimkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1864(1). (опубликована 01.05.2021, DOI: 10.1088/1742-6596/1864/1/012043, ISSN 1742-6588, Online ISSN 1742-6596, EID: 2-s2.0-85107391421)

33. Бычков И.В. Методы стратегического и оперативного планирования в широкомасштабных групповых миссиях роботов / И.В. Бычков и др. // XIV Всероссийская мультikonференция по проблемам управления: Материалы XVI мультikonференции: в 4 т. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2021. (опубликована 27.09.2021, ISBN: 978-5-9275-3851-5)

34. Кензин М.Ю. Стратегии эффективного распространения информации внутри динамической сети мобильных роботов / М.Ю. Кензин // XXII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов (Новосибирск, 25-29 октября 2021 г.). – 2021. – С. 52-53. – Принята в печать. (планируется к публикации 01.02.2022)

35. Кензин М.Ю. Моделирующий комплекс «Situational awareness system for distributed robotic groups» / М.Ю. Кензин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669692. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – 2021. (Опубликована 02.12.2021)

36. Косов А.А. Об аналогах случая Бобылева-Стеклова для гиростата // Материалы конференции «Ляпуновские чтения», г. Иркутск, 6 - 10 декабря 2021. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2021. – С. 27-28. (Опубликована 06.12.2021)

37. Толстихин А.А. Подход к управлению группой мобильных роботов при решении задачи обследования физического поля, основанный на поведении омаров // XXII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: тезисы докладов (Новосибирск, 25-29 октября 2021 г.). 2021. С. 46. Принята в печать. (Дата подачи: 30.09.2021)

38. Толстихин А.А. Мультиагентный децентрализованный подход к обследованию полей концентрации, инспирированный поведением омаров // Материалы конференции «Ляпуновские чтения», г. Иркутск, 6 - 10 декабря 2021. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2021. – С. 54. (Опубликована 06.12.2021)

39. Толстихин А.А. Программное обеспечение программно-аппаратного комплекса TEMAR (Testbed Environment for Multiple Autonomous Robots) / Толстихин А.А. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021669690. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (РОСПАТЕНТ). – 2021. (опубликована 2.12.2021)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Список конференций

№ п/п	Наименование доклада	Дата доклада (ДД.ММ.ГГ)	Место проведения конференции	Название конференции, семинара	Статус конференции (Международная, Всероссийская, Региональная, Локальная)	Статус доклада (Пленарный, Секционный, Стендовый)	Авторы	Докладчик	Ссылка на web-страницу
3	Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников	29.06.2021	Иркутск, Россия,	XXVI Байкальская Всероссийская конференция с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении»	Всероссийская	Секционный	Костромин Р.О.	Костромин Р.О.	https://conf.isem.irk.ru/event/13/
4	Information and Algorithmic Support of a Multi-Level Integrated System for the Investment Strategies Formation	08.07.2021	Иркутск, Россия	3rd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021)	Международная	Секционный	David Gercekovich, Olga Basharina, Irina Shilnikova, Evgeniya Gorbachevskaya, Sergey Gorsky	Башарина О.Ю.	https://iccs-de.icc.ru/
6	Интеллектуализация разработки распределенных пакетов прикладных	23.09.2021	Самара, Россия	VII Международная конференция и молодёжная школа	Международная	Секционный	Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Горский С.А.,	Костромин Р.О.	http://itnt-conf.org/

	программ на основе непрерывной интеграции программного обеспечения и конфигурирования ресурсов			«Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ -2021)			Костромин Р.О.		
7	Service-Oriented Tools for Automating Digital Twin Development	17.09.2021	Иркутск, Россия	4th Scientific-practical Workshop on Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2021)	Международная	Секционный	Roman Kostromin, Alexander Feoktistov, Mikhail Voskoboynikov	Костромин Р.О.	-
8	Автоматизация конфигурирования вычислительных узлов среды функционирования цифровых двойников	28.09.2021	Дивноморское, Геленджик, Россия	XIV Всероссийская конференция по проблемам управления (МКПУ-2021)	Всероссийская	Секционный	Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Костромин Р.О.	Костромин Р.О.	https://conf.mvs.sfedu.ru/
9	Средства автоматизации построения композитных сервисов для научных вычислений	01.04.2021	г. Волгоград, Россия	Международная научная конференция «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2021), г. Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021	Международная	Стендовый	Пашинин А.А., Богданова В.Г.	Пашинин А.А.	https://agora.guru.ru/display.php?conf=pavt2021
10	A logical method for the synthesis of periodic trajectory in a	08.07.2021	Иркутск, Россия	3rd International Workshop on Information, Computation, and	Международная	Секционный	Gennady Oparin, Vera Bogdanova, Anton	Пашинин А.А.	https://iccs-de.icc.ru/

	binary dynamical system			Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021)			Pashinin		
11	Investigation of observability property of controlled binary dynamical systems: a logical approach	08.07.2021	Иркутск, Россия	3rd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021)	Международная	Секционный	Gennady Oparin, Vera Bogdanova, Anton Pashinin	Пашинин А.А.	https://iccs-de.icc.ru/
12	Service-oriented Application for Solving Parametric Synthesis Problem of a Boolean Network with Given Dynamic Properties	01.10.2021	Opatija, Croatia.	44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) Sept 27-Okt 1, 2021,	Международная	Секционный	Gennady Oparin, Vera Bogdanova, Anton Pashinin	Пашинин А.А.	http://www.mipro.hr/MIPRO2021.DS-BE/ELink.aspx
13	Classification in Binary Feature Space Using Logical Dynamic Models	30.09.2021	Opatija, Croatia.	44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) Sept 27-Okt 1, 2021,	Международная	Секционный	Gennady Oparin, Vera Bogdanova, Anton Pashinin	Пашинин А.А.	http://www.mipro.hr/MIPRO2021.CIS/ELink.aspx
14	Стратегии эффективного распространения информации	27.10.2021	Новосибирск, Россия,	XXII Всероссийская конференция молодых	Всероссийская	Секционный	Кензин М.Ю.	Кензин М.Ю.	http://conf.nsc.ru/ym2021/ru

	внутри динамической сети мобильных роботов			ученых по математическому моделированию и информационным технологиям					
15	A lobster-inspired multi-robot control strategy for monitoring non-stationary concentration fields	7.10.2021	Новосибирск, Россия	Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2021» (МНЧ-2021)	Международная	Секционный	Бычков И.В., Ульянов С.А., Толстихин А.А.	Толстихин А.А.	http://conf.nsc.ru/msr2021
16	Подход к управлению группой мобильных роботов при решении задачи обследования физического поля, основанный на поведении омаров	27.10.2021	Новосибирск, Россия	XXII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям	Всероссийская	Секционный	Толстихин А.А.	Толстихин А.А.	http://conf.nsc.ru/ym2021/ru
17	Мультиагентный децентрализованный подход к обследованию полей концентрации, инспирированный поведением омаров	6.12.2021	Иркутск, Россия	37-ая Всероссийская конференция Ляпуновские чтения	Всероссийская	Секционный	Толстихин А.А.	Толстихин А.А.	http://www.icc.irk.ru/ru/content/lyapunovskie-chteniya-2021
18	Методы стратегического	28.09.2021	Дивноморское,	XIV Всероссийская	Всероссийская	Секционный	Бычков И.В., Ульянов С.А.	Ульянов С.А.	https://conf.mvs.sfedu.ru/

	и оперативного планирования в широкомасштабных групповых миссиях роботов		Геленджик, Россия	мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2021)			С.А., Нагул Н.В., Давыдов А.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н.		
19	Об аналогах случая Бобылева-Стеклова для гиростата	6.12.2021	Иркутск, Россия	37-ая Всероссийская конференция Ляпуновские чтения	Всероссийская	Секционный	Косов А.А.	Косов А.А.	http://www.icc.irk.ru/ru/content/lyapunovskie-chteniya-2021
20	Modular discrete event systems control based on logic inference	08.07.2021	Иркутск, Россия	3rd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2021)	Международная	Секционный	Davydov A.V., Larionov A.A., Nagul N.V.	Давыдов А.В.	https://iccs-de.icc.ru/
21	Positively Constructed Formulas-Based Approach to Mobile Robot Control Using DES	30.09.2021	Opatija, Croatia.	44th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO) Sept 27-Oct 1, 2021,	Международная	Секционный	Davydov A., Larionov A., Nagul N.	Давыдов А.В.	http://www.mipro.hr/MIPRO2021.CIS/ELink.aspx
22	On events processing in a formal logical approach to the control of discrete event systems	06.12.2021	Иркутск, Россия	2nd International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems,	Международная	Секционный	Davydov A., Larionov A., Nagul N.	Давыдов А.В.	https://aicts.icc.ru/

				December 6-10, 2021						
--	--	--	--	------------------------	--	--	--	--	--	--