

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ
ИМЕНИ В.М. МАТРОСОВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 004:4; 004:7

№ госрегистрации:

AAAA-A17-117032210078-4

Инв. № 2017-7

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИДСТУ СО РАН

академик



И.В. Бычков

« 23 января 2018 » г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

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

Руководитель темы

академик И.В. Бычков

подпись, дата 23.01.2018

Иркутск 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы
академик



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

Исполнители темы:

зам. директора по н.р.
д-р техн. наук



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

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



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

зав. лаб.
канд. техн. наук.



А.П. Новопашин (раздел 1)

зав. лаб.
канд. техн. наук



С.А. Ульянов (раздел 2)

вед. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук



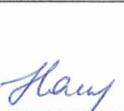
А.А. Косов (раздел 2)

ст. науч. сотр.
канд. техн. наук.



В.Г. Богданова (раздел 1)

ст. науч. сотр.
канд. физ.-мат. наук



Н.В. Нагул (раздел 2)

ст. науч. сотр.
канд. техн. наук.



А.Г. Феоктистов (раздел 1)

науч. сотр.
канд. техн. наук.



С.А. Горский (раздел 1)

науч. сотр.
канд. техн. наук.



И.А. Сидоров (раздел 1)

науч. сотр.



А.В. Давыдов (раздел 2)

мл. науч. сотр.



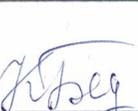
М.Ю. Кензин (раздел 2)

мл. науч. сотр.



А.А. Пашинин (раздел 1)

программист



К.В. Беденко (раздел 2)

программист	 _____	Ю.А. Дядькин (раздел 1)
программист	 _____	Р.О. Костромин (раздел 1)
программист	 _____	Д.А. Костылев (раздел 2)
программист	 _____	А.А. Ларионов (раздел 2)
программист	 _____	А.А. Толстихин (раздел 2)
Нормоконтролёр канд. техн. наук.	 _____	Е.С. Фереферов

РЕФЕРАТ

Отчет 41 с., 6 рис., 3 табл., 85 источников.

Ключевые слова: распределенные, информационно-вычислительные, мультиагентные, самоорганизующиеся, двоично-динамические и дискретно-событийные системы, автономные мобильные роботы, групповое управление.

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

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

В ходе выполнения этапа НИР 2017 г. разработаны новые модели, методы, алгоритмы и программные средства, обеспечивающие фундаментальную основу и высокоуровневый инструментарий для создания управляющих систем с элементами самоорганизации в различных предметных областях научных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
Основные результаты этапа НИР: теоретические исследования и вычислительные эксперименты.....	8
1 Блок 1 – «Разработка методов и средств создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях».....	8
2 Блок 2 – «Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации».....	21
Заключение.....	31
Список использованных источников.....	33

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

Актуальность и новизна исследований в рамках НИР. Во многих сферах человеческой деятельности, связанных с использованием сложных технических систем, актуальной проблемой является организация эффективного группового управления объектами различной природы, например, автономными мобильными роботами или распределенными вычислительными устройствами, в процессе решения сложной прикладной задачи на основе коллективного взаимодействия этих объектов. Такое взаимодействие осуществляется посредством передачи сигналов (сообщений) между управляющими программами объектов в их коммуникационной среде. В общем случае групповое управление реализуется в информационно-вычислительной сети, формируемой путем соединения программно-аппаратных устройств управления объектов

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

Обоснование необходимости проведения НИР. Построение проблемно-ориентированной самоорганизующейся МАС для систем группового управления порождает ряд проблем, связанных с автоматизацией процессов: разработки агентов и агентных платформ, реализации эффективных и надежных алгоритмов функционирования агентов, накопления и применения предметных знаний агентами. Существующие в настоящее время инструменты для создания МАС не позволяют решить вышеперечисленные проблемы в полной мере. В этой связи возникает необходимость создания технологии разработки проблемно-ориентированных самоорганизующихся мультиагентных систем группового управления, включая методы, инструментальные средства и приложения.

Исследования в рамках НИР организованы в виде двух блоков: Блок 1 – «Методы и средства создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях»; Блок 2 – «Разработка методов анализа и управления мультиагентными системами подводных робототехнических комплексов с элементами самоорганизации».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭТАПА НИР: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

1 Блок 1 – «Разработка методов и средств создания и применения мультиагентных систем с элементами самоорганизации для управления распределенными приложениями в гетерогенных вычислительных сетях»

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

Задачи этапа НИР по блоку в 2017 году:

- 1) Разработать новые булевы модели и алгоритмы синтеза законов управления для двоичных динамических систем (ДДС).
- 2) Построить новые модели извлечения знаний агентами в процессе их самоорганизации для управления распределенными вычислениями в гетерогенной среде.

Выбор направления исследований обусловлен высокой актуальностью решаемых задач.

Характеристика задач и результаты исследований:

1) **Разработка новых булевых моделей и алгоритмов синтеза законов управления для двоичных динамических систем.**

Методика решения данной задачи основана на комплексном применении метода конвертации системы булевых уравнений из алгебраической нормальной формы (АНФ) в конъюнктивную нормальную форму (КНФ) [1], современных методов параллельного решения задачи проверки истинности квантифицированной булевой формулы (задача TQBF) [2,3] и задачи булевой выполнимости (задача SAT) [4], технологии разработки композитных приложений [5-7] на основе сервис-ориентированного подхода [7-9].

Выбор направления исследований. Методы решения задач и их сравнительная оценка. Класс линейных ДДС, как объект научных исследований, имеющий большое практическое значение, появился в последней четверти прошлого века благодаря работам [10,11]. Большое число публикаций того времени, как и современных работ, посвящено вопросам анализа линейных ДДС, т.е. разработке методов исследования разнообразных динамических свойств таких, как устойчивость, управляемость, наблюдаемость, идентифицируемость, периодичность и ряда других свойств. Вопросам синтеза линейной статической (или динамической) обратной связи по состоянию (или по выходу) уделялось существенно меньше внимания.

В ранних работах для решения задачи синтеза использовались линейные модели ДДС в виде графа переходов [12] и в виде передаточных функций [13]. В последние два десятилетия

преобладает подход, связанный с использованием алгебраических моделей пространства состояний [14]. Следует отметить, что возможности распараллеливания этих методов для достаточно больших размерностей векторов состояния и управления весьма ограничены. Обзор программных средств для решения задач управления сложными динамическими объектами приведен в [15]. Однако в этих средствах не реализованы используемые в рамках приводимого исследования сервис-ориентированный подход и мультиагентное управление, дающие качественное преимущество при решении задач синтеза в распределенной вычислительной среде (РВС).

В результате решения задачи разработаны булевы модели, алгоритмы и программные средства синтеза законов управления для линейных ДДС и нелинейных ДДС с аддитивным входением управляющих воздействий, предложены два способа управления выполнением разработанных программных средств на основе сервис-ориентированного подхода и мультиагентного управления.

Новизна полученных результатов. В результате исследований разработан *новый* логический метод синтеза линейной обратной связи по состоянию (задача о статическом регуляторе), когда в общем случае для описания динамики нелинейного объекта и линейного регулятора используются уравнения состояний, а спецификация требуемого динамического свойства замкнутой системы (в нашем случае это свойство устойчивости) задается на языке формальной логики. В такой постановке задача синтеза сводится к проверке истинности квантифицированной булевой формулы (задача TQBF [16]) с последующим поиском матрицы обратной связи (задача SAT [16]). Предложенный метод допускает естественное распараллеливание по данным и высокую масштабируемость при увеличении размерности задачи.

Теоретические исследования изложены в работах [17,18] и проведены для следующей постановки задачи. Рассматривается линейная ДДС, векторно-матричное уравнение которой имеет вид:

$$x^t = Ax^{t-1} \oplus Bu^{t-1}, \quad (1)$$

где x, u – соответственно вектор состояния и вектор управления ($x \in B^n, u \in B^m, B = \{0,1\}$), $t \in T = \{1,2, \dots, k\}$ – дискретное время (номер такта), A – $(n \times n)$ двоичная матрица состояния, B – $(n \times m)$ двоичная матрица входа, операции сложения и умножения выполняются по mod 2.

Задача синтеза статического регулятора для (1) состоит в выборе закона управления из класса линейных обратных связей по состоянию вида:

$$u^{t-1} = Px^{t-1}, \quad (2)$$

где P – двоичная матрица параметров регулятора соответствующего порядка, при котором состояние равновесия $x = 0$ замкнутой системы

$$x^t = A^c x^{t-1} = (A \oplus BP)x^{t-1} \quad (3)$$

является устойчивым. Положение равновесия $x = 0$ автономной системы (3) будем называть устойчивым, если для любого $x^0 \in B^n$ существует такой момент времени $t \in T$, что траектория $x(t, x^0)$ за t тактов достигает нулевого состояния: $x(t, x^0) = 0$. Очевидно, что $x(t, x^0) = 0$ для всех последующих моментов времени $t > k$.

Впервые понятие устойчивости линейной автономной ДДС введено в работе [9]. Свойство устойчивости имеет важное значение при построении отказоустойчивых автоматов, в которых необходимо обеспечить правильное поведение системы после возникновения сбоя, в системах коррекции ошибок, которые должны быть до заданной степени нечувствительны к аддитивному шуму.

В проведенных исследованиях рассматривается свойство k -устойчивости в предположении, что величина k достаточно мала ($k \ll 2^n$). Такое ограничение является в практических задачах вполне естественным для больших размерностей n вектора состояния. Поэтому свойство k -устойчивости будем называть свойством практической устойчивости.

Метод построения булевой модели синтеза обратной связи включает алгоритмы преобразования системы (1) к АНФ, конвертирования АНФ в КНФ, алгоритмы решения задач TQBF и SAT. Известно [19], что система булевых уравнений (3) эквивалентна одному булеву уравнению вида:

$$\phi(P, X) = \bigvee_{t=1}^k \bigvee_{i=1}^n (x_i^t \oplus \sum_{j=1}^n A_{ij}^c x_j^{t-1}) = 0, \quad (3)$$

где X – последовательность состояний x^0, x^1, \dots, x^k , а A_{ij}^c вычисляется по формуле

$$A_{ij}^c = A_{ij} \oplus \sum_{r=1}^m B_{ir} P_{rj}. \quad (4)$$

Выражение в круглых скобках в (4) при фиксированных t, i представляет собой булеву функцию от переменных $x_i^t, x_1^{t-1}, x_2^{t-1}, \dots, x_n^{t-1}, p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{mj}$, представленную в АНФ.

Спецификацию задачи синтеза матрицы обратной связи P , обеспечивающей устойчивость нулевого решения системы (3) представим на языке формальной логики в виде следующей формулы:

$$(\exists P)(\forall x^0)(\exists t \in T)(x(t, x^0) = 0).$$

С учетом (4) это выражение примет вид:

$$(\exists P) \left(\forall X: \overline{\phi}(P, X) \right) (\exists t: t \in T)(x(t, x^0) = 0). \quad (5)$$

В формуле (5) $\overline{\phi}(P, X)$ представляет для системы (3) характеристическую функцию множества состояний траектории, выпущенной из начального состояния x^0 .

С учетом того, что характеристическая функция нулевого состояния имеет вид конъюнкции фазовых переменных $\overline{x}_1 \cdot \overline{x}_2 \cdot \dots \cdot \overline{x}_n$ и в силу конечности множества T подформулу

$$(\exists t: t \in T)(x(t, x^0) = 0)$$

заменяем на эквивалентную ей формулу

$$\bigvee_{t=1}^k \bigwedge_{i=1}^n \overline{x}_i^t.$$

Заменяем ограниченный квантор всеобщности на обычный квантор всеобщности. Тогда формула (5) примет вид:

$$(\exists P)(\forall X) \left(\overline{\phi}(P, X) \right) \rightarrow \bigvee_{t=1}^k \bigwedge_{i=1}^n \overline{x}_i^t. \quad (6)$$

Избавимся от операции импликации в формуле (6). Тогда получим эквивалентную (5) квантифицированную булеву формулу (2QBF)

$$(\exists P)(\forall X) (\phi(P, X)) \vee \bigvee_{t=1}^k \bigwedge_{i=1}^n \overline{x}_i^t. \quad (7)$$

Если значение этой формулы равно 1 (т.е. «истина»), то существует хотя бы одно значение матрицы P , которое является решением задачи синтеза обратной связи. Для стандартных решателей задачи TQBF подкванторное выражение необходимо представить в конъюнктивной нормальной форме (КНФ). Для этого запишем отрицание формулы (7)

$$(\forall P)(\exists X) \left(\overline{\phi}(P, X) \right) \wedge \bigwedge_{t=1}^k \bigvee_{i=1}^n x_i^t. \quad (8)$$

В силу двойственности, если выражение (8) ложно, то выражение (7) истинно. Получение формулы $\overline{\phi}(P, X)$ для уравнения (4) выполняется с помощью свободно распространяемых программных средств [1] конвертирования уравнения АНФ=0 в уравнение КНФ=1.

Для конструктивного решения задачи синтеза обратной связи (т.е. вычисления значения матрицы P) при условии, что задача синтеза разрешима, поступим следующим образом. Пусть $P = P^*$, где P^* – некоторое значение двоичной матрицы P . Поставим $P = P^*$ в выражение (7). Тогда из (8) получим следующую SAT-задачу:

$$\left(\overline{\phi}(P^*, X) \right) \wedge \bigwedge_{t=1}^k \bigvee_{i=1}^n x_i^t. \quad (9)$$

Если для (9) получен ответ «unsat», то P^* – есть решение задачи синтеза управления. В случае выполнимости булевой формулы (9) переходим к следующему значению матрицы P . В худшем случае необходимо решить $2^{n \cdot m}$ задач булевой выполнимости (матрица P содержит $(n \times m)$ элементов). Аналогичным образом строится булева модель синтеза стабилизирующей обратной связи для нелинейной ДДС с аддитивным вхождением управляющих воздействий [18].

Программная реализация метода выполнена с использованием разработанных исполнителями блока инструментальных средств HrcSoMas [7], предназначенных для автоматизации создания композитного приложения на основе пакета прикладных программ и управления его выполнением в РВС. В состав композитного приложения синтеза обратной связи для системы, заданной уравнениями (1) и (2), входят вычислительные сервисы, обеспечивающие выполнение следующих функций:

- генерацию системы уравнений (4) на основе заданных входных данных;
- параллельное создание модели исходной задачи в форматах TQBF (8) и SAT (9);
- последовательное решение задачи (для задач небольшой размерности) TQBF с помощью решателя DepQBF [2] или параллельное решение задачи с помощью разработанных исполнителями блока специализированного параллельного решателя hrcqsat [17,18];
- параллельное решение набора SAT-задач, полученных для всевозможных значений матрицы P путем проведения многовариантных расчетов;
- информирование пользователя о статусе задачи и предоставление результатов решения.

Принципы действия разработанных объектов. Вычислительные сервисы композитного приложения являются повторно используемыми компонентами (могут быть включены в состав

другого приложения), имеют программный интерфейс и web-интерфейс (могут работать автономно). Средства описания логики выполнения вычислительных сервисов приведены в [20]. Развернуть приложение можно на стороне сервера, обеспечивая доступ к компонентам с помощью web-интерфейса, или на стороне клиента, обеспечивая локальный доступ к компонентам (рисунок 1).

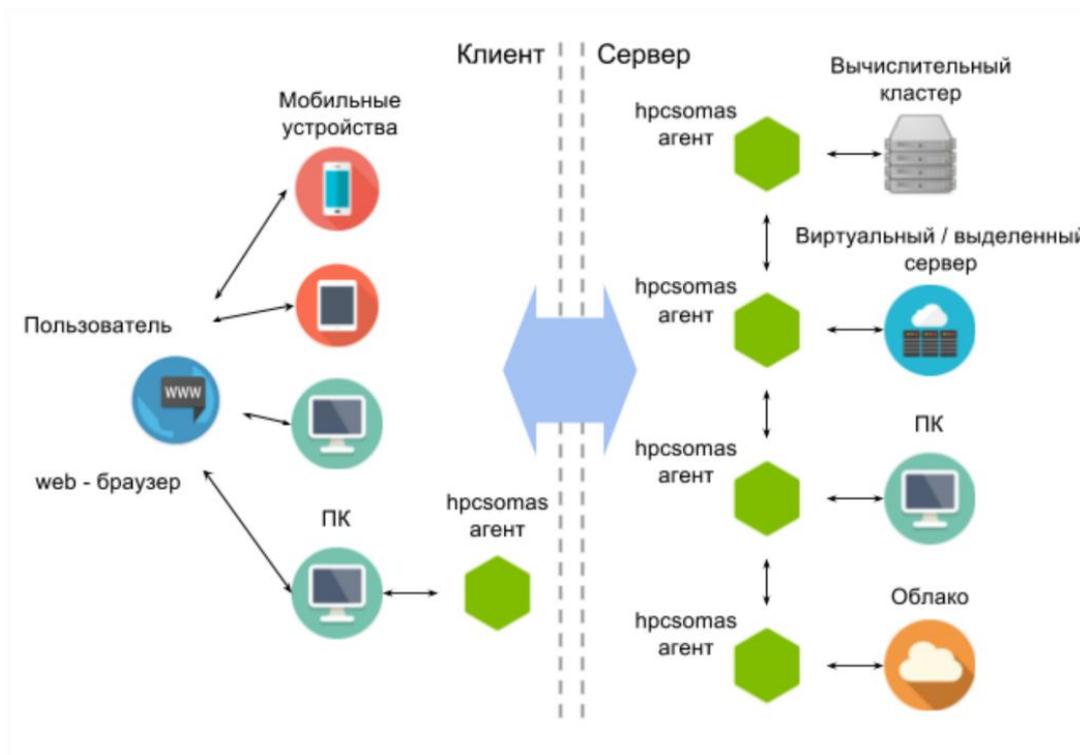


Рисунок 1 – Развертывание hpcsomas-приложения на вычислительных ресурсах

Дополнительно обеспечивается связь между компонентами, установленными на вычислительных узлах с внешним доступом с узлами, к которым можно обратиться только по локальной сети. Для обеспечения безопасности взаимодействие компонент осуществляется путем использования ключей доступа, задаваемых в конфигурационных настройках. Планирование комплексного использования компонент приложения осуществляется на основе вычислительной модели предметной области, а выполнение спланированного потока работ осуществляется с помощью децентрализованного мультиагентного управления. Распределение этого потока на ресурсы РВС на уровне приложения пользователя производится совместно hpcsomas-агентами, установленными на вычислительные ресурсы.

Указание на выполнение действий по запуску заданий, распределенных на вычислительный ресурс, hpcsomas-агент отправляет своим вычислительным агентам. Стандартный сценарий работы вычислительного агента подразумевает запуск задания через консоль или постановку этого задания в очередь системы управления заданиями вычислительного ресурса с последующим отслеживанием состояния выполнения. Реализация сервиса конвертирования булевой модели

(далее сервиса SageMath) потребовала введения дополнительного сценария поведения вычислительного агента. Для использования при конвертировании Sage Tutorial [1] была выбрана версия этого продукта для виртуальных машин, не требующая установки значительного числа пакетов в существующую систему или непосредственной установки такой системы на компьютер пользователя. Поэтому потребовался вычислительный агент, связывающийся с виртуальной машиной под управлением Oracle VM Virtual Box [21], на которой запускается сервис SageMath с необходимыми параметрами и данными (рисунок 2). Сценарий поведения такого агента описан в [22].

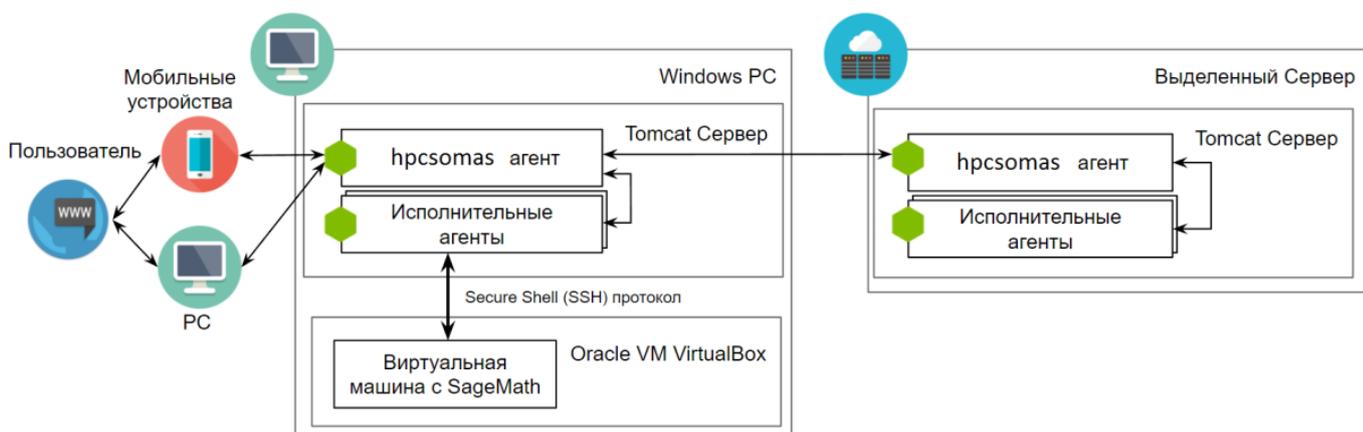


Рисунок 2 – Размещение hpcsomas-агентов для сервиса SageMath

Альтернативный способ организации взаимодействия вычислительных сервисов может быть осуществлен с помощью самоорганизующейся дискретно-событийной MAC на основе децентрализованного управления [23,24]. Коммуникационная модель взаимодействия и модель динамики функционирования установленных на вычислительных ресурсах агентов, которым делегированы права на участие вычислительных сервисов в решении задачи на распределенной модели предметной области, приведены в [25].

Для реализации алгоритма решения задачи TQBF разработан параллельный решатель hpcqsat, дающий, в отличие от известных решателей, возможность найти матрицу обратной связи или выдать ответ, что обратной связи не существует, на этапе проверки истинности квантифицированной булевой формулы, позволяя исключить этап решения SAT-задачи. Решатель hpcqsat представляет собой MPI-приложение на языке C++ (рисунок 3).

Главный процесс приложения организует динамическую очередь подзадач, получаемых в результате расщепления модели исходной задачи по заданным булевым переменным. Для представления узла дерева и работы с ним разработан ряд методов, в том числе рекурсивных. Расщепление по каждой переменной образует две новые подзадачи (полученные введением унарного ограничения в задачу верхнего уровня и выводом переменной из-под знака квантора) в

очереди на решение. В дочернем процессе могут запускаться препроцессор, упрощающий остаточную булеву функцию, полученную после расщепления, или последовательный решатель. Решатель, запускающийся на выполнение в дочернем процессе, будем называть базовым. В качестве базового решателя используется DepQBF [2].

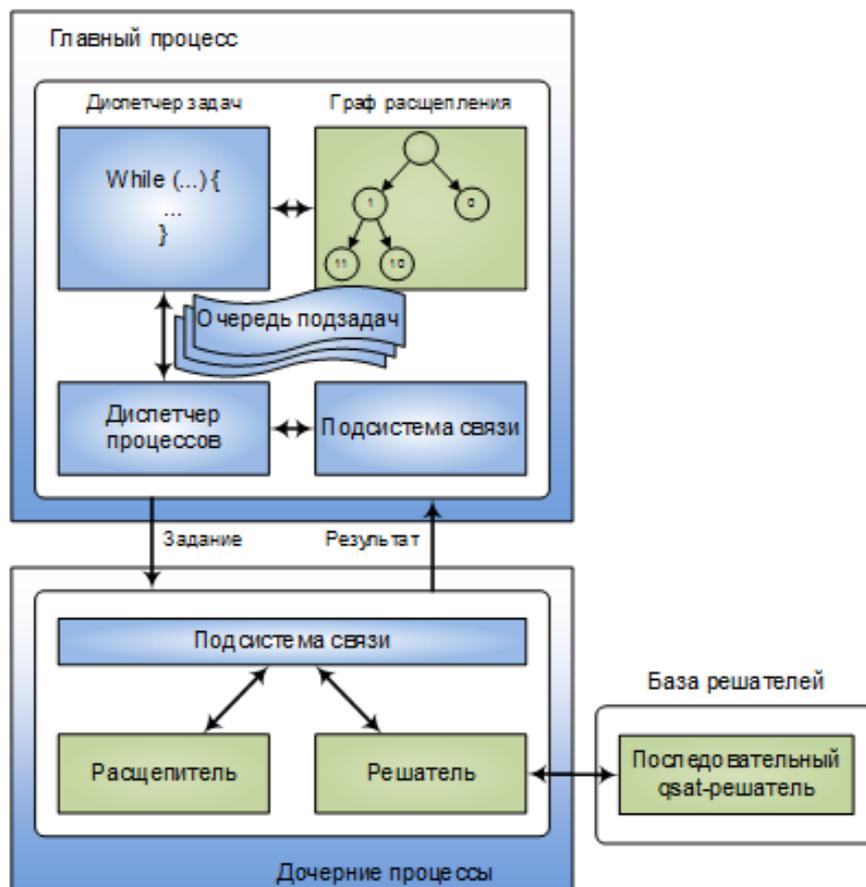


Рисунок 3 – Архитектура решателя hrcqsat

Экспериментальные исследования. В таблице 1 приведены статистические данные вычислительного эксперимента, проведенного с использованием ресурсов «Иркутского суперкомпьютерного центра СО РАН» [26] для сравнения параллельного решателя hrcqsat с аналогичным параллельным решателем HordeQBF [3] и последовательным решателем DepQBF на ряде тестовых задач [27], подтверждающие работоспособность и эффективность разработанного решателя.

Достоверность полученных результатов подтверждена на практике при решении задач синтеза обратной стабилизирующей связи для линейных и нелинейных ДДС с аддитивным вхождением управляющих воздействий [17,18,22,28,29].

Таблица 1 – Статистические данные решения тестовых задач

Время решения (в секундах)	DepQBF	hpcqsat	HordeQBF
общее	1066,72	624,52	959,84
среднее	56,14	32,87	50,52
минимальное	0,01	0,08	1
максимальное	1014,02	565,18	921,57

Обобщение и оценка полученных результатов. Поставленная в рамках блока задача решена в полном объеме. Разработан логический метод решения задачи о статическом регуляторе для линейной ДДС. Программная реализация метода для вычислительного кластера допускает естественное распараллеливание по данным и обеспечивает высокую масштабируемость при увеличении размерности задачи. Логический метод применим для решения задачи о статическом регуляторе по выходу и о динамическом регуляторе по выходу или состоянию. Дальнейшее развитие логического метода связывается с его применением для решения задачи синтеза обратной связи для мономиальных ДДС, имеющих большое значение в исследовании генных регуляторных сетей [30], а также для других динамических свойств, которыми должна обладать замкнутая система управления.

2) Построение новых моделей извлечения знаний агентами в процессе их самоорганизации для управления распределенными вычислениями в гетерогенной среде.

Выбор направления исследований. Методы решения задач. Исследования, связанные с вопросами повышения степени предметной ориентированности и интеллектности технологий организации гетерогенных сред, включая Grid-системы и облачные инфраструктуры, являются в настоящее время чрезвычайно актуальными [31]. Это обусловлено необходимостью все более эффективного интегрированного использования гетерогенных ресурсов среды в процессе разработки и выполнения масштабируемых приложений. Востребованным подходом к планированию вычислений и распределению ресурсов в гетерогенной среде является применение МАС, основанных на использовании рыночных механизмов регулирования использования ресурсов [32]. Агент в такой системе представляет собой интеллектуальную (использующую элементы искусственного интеллекта) программную сущность, наделенную правами и обязанностями по обслуживанию вычислительного процесса и управления им. Пользователи и владельцы ресурсов гетерогенной среды делегируют агентам свои права и обязанности, а также поручают представлять их интересы, которые зачастую является противоречивыми относительно критериев эффективности вычислительного процесса [33]. Качество функционирования агентов во многом зависит от степени доступности необходимых им знаний и широты их представления. Тем самым актуализируется развитие существующих и разработка новых моделей представления знаний в

рамках разрабатываемого исполнителями блока проекта подхода к мультиагентному управлению распределенными вычислениями [34,35].

В результате решения задачи разработана новая модель классификации масштабируемых программных комплексов, являющаяся развитием концептуальной модели гетерогенной среды [36] и специфицирующая процесс решения ресурсоемких научных и прикладных задач в гетерогенной среде (вычислительной сети) с виртуализированными ресурсами. Разработанная модель [37] базируется на применении методологии концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в гетерогенных средах, включающей специализированные модели и методы представления и использования знаний о заданиях и ресурсах. Эти знания используются в процессе мультиагентного управления потоками заданий масштабируемых приложений. МАС организуется на основе принципов самоорганизации [38,39]. Извлечение и применение знаний агентами осуществляется путем их локальных взаимодействий между собой.

В модели используются следующие параметры, определяющие свойства приложений: число заданий приложения (c_1) и наличие связи между ними (c_2), наличие подзаданий (c_3) и зависимостей между подзданиями (c_4), уровень масштабирования (c_5), возможность предсказания времени выполнения задания (c_6), используемая система управления заданиями (c_7), влияние объема исходных данных (c_8). Значения параметров c_1 - c_8 приведены на рисунке 4.

Результаты применения системы классификации для определения свойств четырех приложений [37] приведены в таблице 2.

Применение системы классификации приложений позволяет выбрать наиболее подходящую систему управления заданиями. Так, например, время выполнения заданий приложений 1–3 под управлением гибридной системы, заданной в процессе классификации приложений, в сравнении с директивным назначением системы управления прохождением заданий или гипервизора показывает улучшение на 9%, 11% и 12% соответственно. Распределение ресурсов для выполнения заданий этих приложений с учетом их классификации обеспечивает снижение накладных расходов до 7%.

Разработана новая модель [40-45], предназначенная для уменьшения степени неопределенности свойств заданий путем их классификации. Данная модель используется в процессе мультиагентного управления потоками заданий масштабируемых приложений в гетерогенной среде с виртуализированными ресурсами [46-49].



Рисунок 4 — Параметры приложений в системе классификации: число заданий приложения (а), зависимость между заданиями (б), наличие подзаданий (в), зависимость между подзаданиями (г), уровень масштабирования (д), зависимость времени выполнения задания от объема исходных данных (е), система управления заданиями (ж), предсказание времени выполнения заданий (з)

Таблица 2 — Классификация приложений

Приложение	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8
1	1	-	+	+	Гетерогенная среда	+	Гибридная система	На основе априорной информации
2	N	-	-	-	Гетерогенная среда	+	Гибридная система	На основе вычислительной истории
3	N	-	-	-	Гетерогенная среда	+	Гибридная система	На основе вычислительной истории
4	1	-	+	+	Гетерогенная среда	+	Система управления прохождением заданий	На основе практических экспериментов

Пусть имеется конечное множество $H = \{h_1, h_2, \dots, h_k\}$ следующих характеристик заданий (требований к вычислительной системе): время решения задачи, объем дисковой и оперативной памяти, количество узлов, процессоров и ядер, программные библиотеки, компиляторы и их ключи и т.д. Каждая характеристика h_i имеет область допустимых значений D_i , включая символ θ неопределенности.

Введем конечное множество $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ классов заданий. Каждый класс c_j определяется основным (обязательным) $H_{mj} \subseteq H$ и дополнительным (необязательным) $H_{aj} \subseteq H$ множеством характеристик, таких, что $H_{mj} \cap H_{aj} = \emptyset$ и $|H_{mj}| \geq 1$. Если характеристика $h_i \in H_{mj} \cup H_{aj}$, то для этого класса ей соответствует область допустимых значений $D_{ij}^* \subseteq D_i \setminus \{\theta\}$. Следовательно, любой класс c_j может включать характеристику h_i с конкретизированной областью допустимых значений D_{ij}^* , $j \in \overline{1, m}$.

Разработано программное средство для администратора среды [40], использующее данную модель и позволяющее формировать множества характеристик и классов заданий, а также задавать соответствие между классами заданий и вычислительными ресурсами. Эти знания включаются в концептуальную модель среды.

Обозначим через x вектор булевых переменных размерности k . Он используется для представления характеристик задания. Соответствие индексов элементов вектора x и индексов характеристик из H является взаимно-однозначным. Элементы вектора x определены следующим образом:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{if } D'_i \subseteq D_i \setminus \{\theta\}, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где D'_i – область допустимых значений характеристики h_i , $i \in \overline{1, k}$. Задание может быть классифицировано только в том случае, когда существует хотя бы один элемент вектора $x_i = 1$.

Мы используем характеристическую функцию $\chi_j(x)$ для проверки соответствия области допустимых значений D'_i характеристики h_i и области допустимых значений D_{ij}^* характеристики из класса c_j . Эта функция определена следующим образом:

$$\chi_j(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\forall h_i \in H_{mj} \ x_i = 1 \wedge D'_i \subseteq D_{ij}^*) \wedge (\forall h_i \in H_{aj} \ x_i = 0 \vee x_i = 1 \wedge D'_i \subseteq D_{ij}^*), \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $i \in \overline{1, k}$ и $j \in \overline{1, m}$.

С помощью функции $\chi_j(x) \forall j \in \overline{1, m}$ осуществляется первичная классификация заданий. В результате ее работы заданиям могут быть назначены несколько классов. В этой связи мы выполняем дополнительную классификацию, используя вычислительную историю. Определим через $\phi_j(x, v)$ функцию расчета вероятности принадлежности задания классу c_j , учитывая вычислительную историю заданий v . Эта функция определена следующим образом:

$$\phi_j(x, v) = \begin{cases} \frac{1}{m}, & \text{if } \forall l \in \overline{1, m} \phi_l(x, v) = 0, \\ \frac{\phi_j(x, v)}{\sum_{l=1}^m \phi_l(x, v)} & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $\phi_l(x, v)$ и $\phi_j(x, v)$ – функции, возвращающие число выполненных заданий, соответствующих классам c_l и c_j соответственно. Учитываются только задания, которые являются аналогичными классифицируемому заданию.

Дополнительная классификация может быть использована для уменьшения неопределенности свойств заданий. Для отражения изменения степени неопределенности целесообразно использовать информационную двоичную энтропию:

$$E(z) = -\sum_{i=1}^m p_i(z) \log_2 p_i(z),$$

где z – случайное событие соответствия задания одному из m классов, $p_i(z) > 0$ – вероятность соответствия задания i -у классу. Уменьшение энтропии отражает уменьшение неопределенности.

Рассмотрим простой иллюстративный пример использования энтропии. Пусть имеется множество $C = \{c_1, c_2, \dots, c_8\}$ классов и задание, которое может относиться к каждому из восьми классов этого множества, $\chi_j(x) = 1, j = \overline{1, 8}$. Классы различаются между собой по одной характеристике, которая определяет восемь разных временных интервалов выполнения задания. Эта характеристика не указана для рассматриваемого задания.

На основе первичной классификации вероятность принадлежности задания каждому из восьми классов получается равной 0.2. (таблица 3). В этом случае $E(z) = 3.76$. Дополнительная

классификация работ, основанная на вычислительной истории выполнения аналогичных заданий, позволяет уточнить полученную вероятность и уменьшить энтропию. Уменьшение неопределенности облегчает принятие решений по выбору наиболее вероятного класса задания.

Таблица 3 — Показатель энтропии

Вероятность	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	$E(z)$
Вероятность принадлежности к классу после первичной классификации	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	3.76
Вероятность принадлежности к классу после дополнительной классификации	0.11	0.68	0.08	0.05	0.04	0.02	0.01	0.01	1.42

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

Разработанные модели извлечения и применения знаний агентами интегрированы в инструментальные комплексы [50] для создания масштабируемых приложений. Применение этих моделей позволило повысить эффективность процесса решения задач регулирования транспортных потоков [51], повышения эффективности IP-телефонии [52], исследования топливно-энергетического комплекса Вьетнама с точки зрения обеспечения его энергетической безопасности [53,54], оптимизации складской логистики [55] и анализа многоэкстремальных функций методом мултистарта [56].

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

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием методов организации распределенных вычислений и представления знаний, а также путем имитационного моделирования [57,58].

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

Целью блока проекта является разработка совокупности новых специализированных моделей (эволюционных, дискретно-событийных, логических и непрерывно-дискретных), адекватных различным режимам функционирования группы мобильных роботов, разработка

новых и развитие известных методов их исследования в направлении получения конструктивных алгоритмов анализа и синтеза самоорганизующихся систем группового управления.

Задачи этапа НИР по блоку в 2017 году:

1) Обосновать корректность и полноту методов поиска вывода для конструктивного класса позитивно-образованных формул с функциональными символами. Разработать транслятор из языка логики предикатов первого порядка в язык позитивно-образованных формул.

2) Разработать новую модель для задачи выполнения многоцелевой миссии группой функционально разнородных мобильных роботов. Разработать эволюционный подход к решению данной задачи, включающий в себя новые генетические операторы и алгоритмические схемы для учета жестких пространственно-временных ограничений, связанных, в первую очередь, с функциональной разнородностью группы.

3) Исследовать известные подходы к децентрализованному управлению многокомпонентными системами, представленными дискретно-событийными моделями. Для задачи управления группой мобильных роботов оценить сложность построения дискретно-событийного регулятора верхнего уровня в составе гибридной системы управления.

4) Разработать алгоритмы управления автономным подводным роботом, обеспечивающих движение по заданной траектории при наличии навигационных ошибок, неопределенности массо-инерционных параметров роботов и ограничений на ресурсы управления.

5) Развить теорию устойчивости движения сложных многокомпонентных (мультиагентных) систем с переключениями в процессе функционирования. Разработать новые способы агрегирования и построения вектор-функций Ляпунова и обобщенно однородных систем сравнения Матросова, приводящих к более конструктивным условиям асимптотической устойчивости, проверяемым по правым частям, и обобщающих и усиливающих известные способы (F. Bailey, D. Siljak, В.Д. Фурасов).

Выбор направления исследований обусловлен актуальностью задач организации системы управления подводными робототехническими комплексами при автономном выполнении групповых миссий.

Характеристика задач и результаты исследований:

1) Доказательство корректности и полноты методов поиска вывода для конструктивного класса позитивно-образованных формул с функциональными символами; разработка транслятора из языка логики предикатов первого порядка в язык позитивно-образованных формул.

Методы решения задачи. В качестве теоретического базиса для разработки методов машинного обучения используется логическое исчисление позитивно-образованных формул (ПОФ) и разработанный на его основе метод для автоматического доказательства теорем (АДТ).

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

В результате решения задачи рассмотрена модификация исчисления ПОФ, которая обеспечивает учет требований конструктивного планирования. Применение логического исчисления ПОФ (с дескриптивной семантикой) и его модификация в задачах с конструктивной семантикой (планирование действий, синтез программ, автоматическое управление и т.п.) были рассмотрены ранее для языка без функциональных символов. На этапе 2017 г. рассмотрен язык с функциональными символами, но с ограничением на класс формул: в древовидной структуре ПОФ запрещается ветвление после узлов с кванторами всеобщности, содержащих неограниченные переменные в конъюнктах. Данное ограничение существенно увеличивает эффективность процедуры поиска вывода, при этом класс формул является все еще более широким, чем класс в языке хорновских дизъюнктов. В описанном классе формул и исчислении, обозначенном JF, введены три новых правила вывода, используемые для обработки формул, представляющих задачи, т.е. формул вида $G1 \rightarrow G2$, где $G1$ – произвольная ПОФ класса JF, описывающая условия и конструктивные средства решения задачи, а $G2$ – некоторая формализация цели. Учитывая вышесказанное, корректность и полнота конструктивного исчисления ПОФ обосновываются следующей теоремой.

Теорема. Пусть $G1 \rightarrow G2$ – задача, где $G1$ – ПОФ из класса JF, а $G2$ – формула вида $\forall X A (\exists Y1 B1, \dots, \exists Yn Bn)$, тогда JF-вывод формулы $G1 \& \neg G2$ конструктивен (т.е. преобразуем в интуиционистский вывод).

Разработана программная система – транслятор языка первопорядковых логических формул в формате ТРТР в язык позитивно-образованных формул ТРТР2РСФ. Программа позволяет осуществлять синтаксический анализ и трансляцию формул языка классической первопорядковой логики, записанных в формате ТРТР, в логический язык позитивно-образованных формул. Входными данными для программы является файл из библиотеки ТРТР, который обрабатывается транслятором с помощью методов, разработанных исполнителями блока. Результатом работы является позитивно-образованная формула в оперативной памяти ЭВМ, являющаяся преобразованным соответствием исходной формулы, поступившей на вход, и

пригодная для дальнейшей обработки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы [59].

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

Транслятор TRTP2PCF позволяет оценивать практическую применимость разрабатываемых программных систем для АДТ на основе исчисления ПОФ при помощи огромной базы тестовых примеров TRTP (tptp.org).

2) Разработка новой модели для задачи выполнения многоцелевой миссии группой функционально разнородных мобильных роботов и эволюционного подхода к ее решению при жестких пространственно-временных ограничениях.

Методы решения задачи. Разработка новой модели задачи группового управления роботами осуществлялась на основе исследований новых расширенных постановок задач класса маршрутизации транспорта, отличающихся высокой степенью детализации при моделировании реальных задач и наличием комплексного набора взаимосвязанных условий и ограничений. Как известно, для обширного класса задач маршрутизации не существует точных методов нахождения оптимальных решений за полиномиальное время, что приводит к необходимости нахождения только лишь приближенных рациональных решений, поиск которых не требовал бы значительных вычислительных затрат. Считается, что эволюционный подход и его модификации в среднем превосходят любые другие методы при решении различных задач класса маршрутизации транспорта. Основным преимуществом эволюционных алгоритмов является тот факт, что они не требуют знаний о природе самой задачи и действующих в ее рамках ограничений. В то же время, дальнейшее внедрение таких знаний в тело алгоритма в виде разнообразных эвристик и процедур локальной оптимизации позволяет добиться дополнительного повышения эффективности работы алгоритма.

Полученные результаты. Для задачи планирования групповой траектории для разнородных мобильных роботов при выполнении многоцелевой миссии была разработана новая математическая модель, которая базируется на постановках класса задач маршрутизации

транспорта (ЗМТ). В зависимости от типа исследовательской миссии, дополнительных ограничений и требований, накладываемых на действия группы, задача может приобретать различные черты таких разновидностей ЗМТ, как периодическая маршрутизация, маршрутизация с временными окнами или циклическая маршрутизация [60]. В некотором роде, постановка, разработанная на этапе 2017 г., является естественным развитием именно циклической маршрутизации [61], как одной из наиболее актуальных и современных постановок ЗМТ ввиду своей высокой сложности и широкой применимости в реальных прикладных транспортных задачах, связанных с беспилотной робототехникой. Задача циклической маршрутизации заключается в продолжительном (неограниченном сверху) по времени посещении группой роботов заданного множества целей с установленной для каждой цели предельной периодичностью, а целью задачи является построение группового маршрута, который состоял бы из циклических маршрутов отдельных роботов и обеспечивал бы своевременное посещение всех целей задачи.

Разработанная модель задачи маршрутизации разнородной группы расширяет подкласс циклической маршрутизации за счет более точного моделирования реальных условий и ограничений [62,63]. Так, в первую очередь, было снято условие цикличности траекторий отдельных роботов, которое значительно упрощало задачу, исключая из множества допустимых решений наиболее сложные и эффективные групповые траектории. Во-вторых, в модель была добавлена гетерогенность действующей робототехнической группировки, как по динамическим характеристикам движения, так и по функциональным возможностям. Кроме того, в модели учитывается необходимость регулярного коммуникационного обмена между роботами группы.

Для решения задачи была разработана и программно реализована модификация эволюционных алгоритмов, обеспечивающая эффективное решение предложенной постановки задачи маршрутизации даже при жестких действующих ограничениях (рисунок 5). Эффективность работы алгоритма обеспечивается его оригинальной структурой и набором специализированных эвристик и алгоритмических процедур, направленных на генерацию и приведение решений в допустимую область поиска. В качестве основных таких вычислительных процедур можно выделить: набор эвристик для генерации стартовой популяции допустимых решений; оператор по работе с многорежимными мутацией и скрещиванием; оператор направленного локального поиска; процедура уплотнения группового маршрута для удовлетворения ограничению по связи. Разработанный эволюционный алгоритм позволяет уже на первых итерациях получать рациональные допустимые решения, а также обеспечивает их дальнейшую быструю сходимость [64].

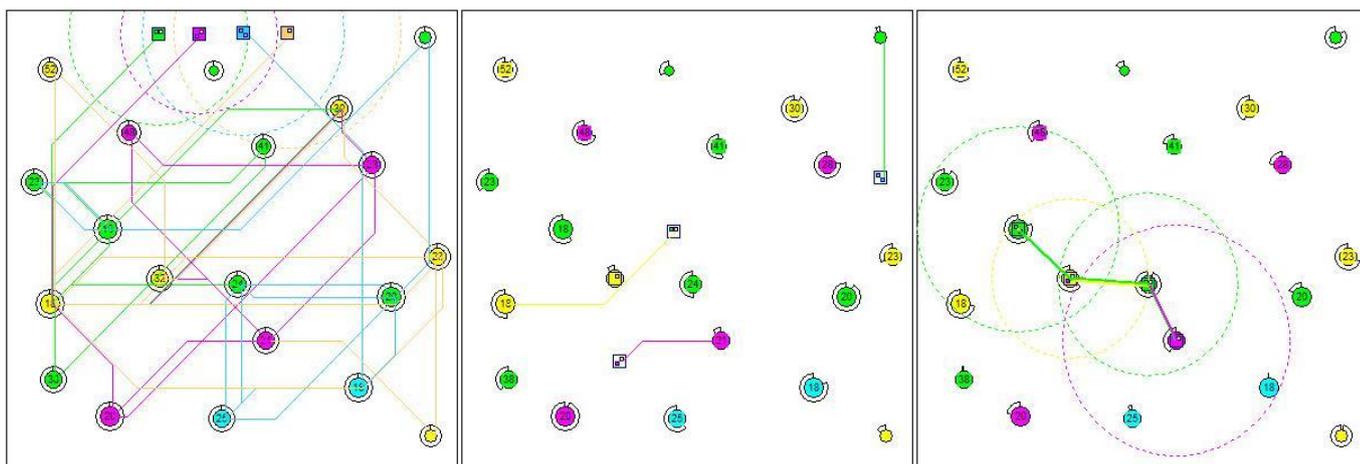


Рисунок 5 — Моделирование движения четырех роботов по сгенерированному групповому маршруту с финальным проведением коммуникационного обмена

Новизна полученных результатов. Предложенная постановка задачи групповой маршрутизации при выполнении многоцелевой миссии может быть выделена в качестве нового актуального подкласса задач маршрутизации транспорта. В некотором роде, она является естественным расширением и развитием активно исследуемой в последнее время задачи циклической маршрутизации. Эволюционный алгоритм, разработанный для решения задачи маршрутизации в предложенной постановке, обладает оригинальной структурой за счет добавления в него дополнительных оригинальных вычислительных этапов. Внедренные вычислительные этапы преимущественно базируются на известных алгоритмических процедурах, применяющихся при решении различных вариаций задач маршрутизации, но в то же время модифицированы таким образом, чтобы отвечать новым комплексным пространственно-временным, параметрическим и динамическим ограничениям.

3) Оценка сложности построения дискретно-событийного регулятора верхнего уровня в составе гибридной системы управления.

Методы решения задачи. Особенности функционирования и взаимодействия компонент автоматизированных технологических систем целесообразно моделировать на основе дискретно-событийного подхода. Для такой сложной автоматической системы, как многокомпонентный робототехнический комплекс, дискретно-событийные модели могут описывать как подсистемы и переключение режимов работы отдельного автономного подводного робота (АПР), так и порядок выполнения операций в группировке АПР, являясь, таким образом, подсистемой верхнего уровня иерархической системы управления. Как правило, при необходимости ограничить поведение дискретно-событийной системы (ДСС) в соответствии с некоторыми требованиями применяются так называемые супервизоры, запрещающие возникновение событий, ведущих к реализации нежелательного поведения. Модульность структуры большинства технологических систем и

необходимость обеспечения самоорганизации в условиях неопределенности внешней среды приводит к необходимости разработки децентрализованной структуры управления. В этой связи возникает необходимость анализа существующих алгоритмов построения децентрализованных супервизоров для ДСС, а также применения новых подходов к их синтезу.

Полученные результаты. Для реализации принципов самоорганизации в группировках автономных роботов исследованы известные подходы к супервизорному управлению многокомпонентными системами, представленными дискретно-событийными моделями. Проведен анализ алгоритмов построения монолитного, модульного, локально-модульного супервизора и применения модельных абстракций для уменьшения вычислительной сложности алгоритмов построения супервизоров. Для задачи управления группой мобильных роботов проведена оценка сложности построения дискретно-событийного регулятора верхнего уровня в составе гибридной системы управления. Изучены поведенческие эквивалентности, используемые для уменьшения размерности участвующих в построении супервизора компонент рассматриваемой системы: языковые проекции, сохраняющие свойство наблюдаемости, бисимуляция, маркирующая бисимуляция. Поскольку размерность получаемого решения в существенной степени зависит от применения эвристик, для выбора параметров некоторых из них предложено использовать подход, основанный на исчислении ПОФ. Получены первые результаты по формализации дискретно-событийных систем в виде ПОФ [65]. Для редукции супервизоров при гарантированном сохранении их свойств использован метод логико-алгебраических уравнений [66-68].

Новизна полученных результатов. Новизна проведенных исследований в рамках теории супервизорного управления заключается в использовании оригинальных логико-алгебраических методов к исследованию свойств ДСС. Предлагаемое подключение средств логического вывода для построения супервизоров ДСС существенным образом увеличит эффективность процедуры построения распределенных супервизоров, что особенно важно для многокомпонентных систем со многими ограничениями на функционирование, которые представляют собой, в частности, группировки АПР.

4) Разработка алгоритмов управления автономным подводным роботом в задаче отслеживания траектории.

Методы решения задачи. Для решения задачи отслеживания траектории автономным подводным роботом используются подход, основанный на концепции виртуальной цели, и принципы компенсации и обратной связи. Синтез регуляторов, обеспечивающих решение задачи слежения, выполнен с помощью вычислительной технологии для анализа и синтеза нелинейных систем управления на основе сублинейных векторных функций Ляпунова [69,70].

В результате решения задачи разработан алгоритм управления АПР, обеспечивающий движение по заданной траектории, задаваемой в виде последовательности путевых точек либо ее аппроксимацией кубическими сплайнами, при наличии навигационных ошибок, неопределенности инерционных параметров роботов и ограничений на ресурсы управления [71]. Он основан на концепции виртуальной цели, которая предполагает, что цель, как материальная точка, движется вдоль заданной кривой, а задача управления АПР состоит в совмещении собственного положения с положением цели. При этом, помимо управлений, реализующих поступательное и угловое движение АПР, для решения задачи отслеживания также вводится дополнительное управление, регулирующее скорость движения виртуальной цели, что обеспечивает быстрое уменьшение возможных больших отклонений аппарата от цели. Стабилизирующее управление роботом формируется на основе измерений положения робота в подвижной связанной с целью системе координат, одна ось которой совпадает с касательной к кривой в точке положения цели, а вторая ось перпендикулярна первой. Синтез регуляторов по критерию минимума ошибки слежения выполнен для модели движения АПР на плоскости с учетом возможных неуправляемых боковых смещений робота (скольжения), сил и моментов сопротивления движению, присоединенных масс аппарата. При синтезе учитывались: погрешности измерений относительного положения АПР, их дискретность во времени, ограничения на управляющие силу и момент, создаваемые движительной установкой, а также ограничения на кривизну кривой. Проведены численные расчеты, подтвердившие высокое качество синтезированного управления. Разработанный алгоритм отслеживания траектории использован при разработке двухуровневой системы управления группой АПР в миссии по обследованию придонной области [72,73], а также при решении задачи отслеживания траектории для группы роботов [74,75]. Результаты численного моделирования разработанной системы управления группой АПР в исследовательской миссии представлена на рисунке 6.

Новизна полученных результатов. Разработанный робастный алгоритм управления АПР в задаче отслеживания криволинейного пути в отличие от известных в литературе в комплексе учитывает погрешности измерений, их дискретность по времени, ограничения на ресурсы управления, неопределенности инерционных параметров робота, а также возможные изменения траектории в процессе движения. Важно, что в предлагаемом решении разработка не завершается выделением областей значений для параметров алгоритма, допустимых с точки зрения решения рассматриваемой задачи, как это сделано в большинстве известных работ, а эти параметры определяются по явным алгоритмам с использованием сублинейных векторных функций Ляпунова, исходя из обеспечения минимума ошибки слежения. Также стоит отметить, что разработанный алгоритм не требует непрерывного измерения параметров движения АПР и значительных вычислительных ресурсов, что упрощает его реализацию на борту.

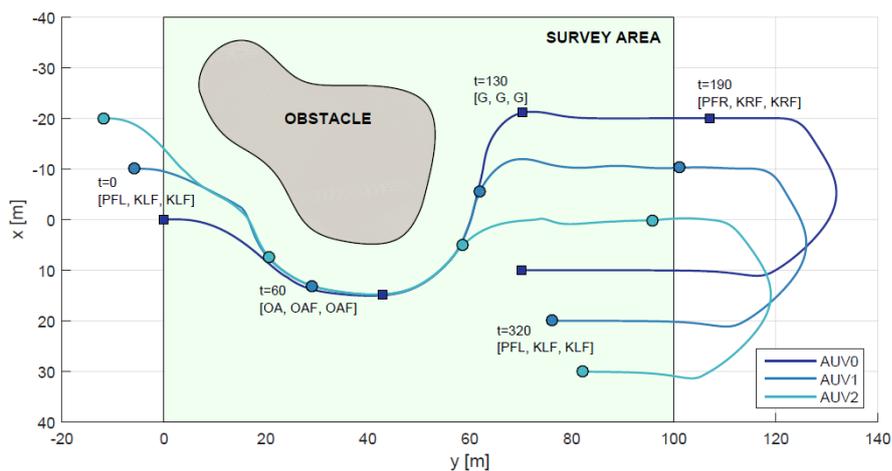


Рисунок 6 — Результаты моделирования многорежимной системы управления АПР в обследовательской миссии

5) Развитие теории устойчивости движения сложных мультиагентных систем с переключениями.

Методы решения задачи. Динамика МАС во многих случаях описывается системами дифференциальных уравнений, содержащих отдельные подсистемы и функции взаимодействия подсистем. Такие системы в отечественной литературе называют сложными или крупномасштабными [76], а в англоязычной литературе используется термин Large-scale systems [77]. Для сложных систем наиболее адекватным методом исследования устойчивости и других динамических свойств в мировой литературе признан метод векторных функций Ляпунова, а для построения точных решений эффективно применение метода редукции. На данном этапе проекта исследования были направлены на развитие метода векторных функций Ляпунова для исследования устойчивости сложных систем с переключениями как подсистем, так и взаимосвязей между ними, а также на построение точных решений параболических систем реакции-диффузии, которые можно рассматривать как МАС с диффузией в подсистемах и взаимодействием посредством химических реакций.

Полученные результаты. Проведено дальнейшее развитие теории устойчивости движения сложных многокомпонентных (мультиагентных) систем с переключениями в процессе функционирования [78,79]. Разработан новый способ агрегирования и построения вектор-функций Ляпунова и обобщенно однородных систем сравнения Матросова, приводящих к более конструктивным условиям асимптотической устойчивости, проверяемым по правым частям, и обобщающих и усиливающих известные способы (F. Bailey [80], D. Siljak [77], В.Д. Фурасов [81]).

Исследована нелинейная система реакции-диффузии, моделируемая системой уравнений параболического типа со степенными нелинейностями. Предложена конструкция точных решений, позволяющая декомпозировать процесс отыскания компонент, зависящих от времени и пространственных координат. Построены новые многопараметрические семейства точных решений, задаваемых элементарными функциями. Выделены случаи взрывающихся (blow-up solution) или периодических по времени и анизотропных по пространственным переменным точных решений [82-85].

Новизна полученных результатов. Для изучения сложных систем с изменяющейся структурой в проекте развивается метод, основанный на использовании векторных функций Ляпунова, который по охвату исследуемых систем, конструктивности и возможности доведения до простых вычислительных процедур превосходит известные аналоги. Оригинальность предложенного подхода в применении вектор-функций Ляпунова характеризуется двумя основными моментами. Во-первых, в отличие от большинства работ, где используются линейные системы сравнения, в проекте предложен оригинальный способ агрегирования, приводящий к нелинейной обобщенно-однородной системе сравнения, дающей лучшие условия устойчивости, чем известные подходы (F. Bailey [80], D. Siljak [77], В.Д. Фурасов [81]). Во-вторых, в проекте развиваются вычислительные технологии для анализа и синтеза нелинейных систем на основе сублинейных вектор-функций Ляпунова, основным достоинством которых является возможность алгоритмического получения соответствующих систем сравнения для отдельных структурных состояний системы, а также установления явных соотношений, связывающих смежные структуры. Данная технология, в отличие от известных аналогов, позволяет в комплексе учитывать многие неопределенности и возмущения, присущие реальным приложениям.

Особенность подхода к исследованию сложных систем типа реакции-диффузии заключается в последовательном применении редукции к изучаемым уравнениям, что позволяет находить многопараметрические семейства точных решений, представимых элементарными функциями. На этом пути были найдены семейства периодических решений.

Поставленные в рамках блока задачи решены в полном объеме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В процессе выполнения работ на этапе НИР 2017 г. получены следующие результаты:

1) Разработаны новые булевы модели и алгоритмы синтеза обратной связи для линейных и нелинейных ДДС на основе логического метода синтеза линейной обратной связи по состоянию. Предложена программная реализация логического метода.

2) Предложена новая модель классификации масштабируемых программных комплексов, специфицирующая процесс решения ресурсоемких научных и прикладных задач в гетерогенной вычислительной сети.

3) Доказана корректность и полнота метода поиска вывода для конструктивного класса позитивно-образованных формул с функциональными символами. Разработан транслятор из языка логики предикатов первого порядка в язык позитивно-образованных формул.

4) Разработана новая расширенная модель задачи циклической маршрутизации группы разнородных мобильных роботов при выполнении многоцелевой миссии. Разработана и реализована модификация эволюционных алгоритмов с оригинальной структурой для решения задачи маршрутизации разнородной робототехнической группы в предложенной постановке.

5) Получена оценка сложности построения дискретно-событийного регулятора верхнего уровня в составе гибридной системы управления.

6) Разработаны алгоритмы управления автономным подводным роботом, обеспечивающих движение по заданной траектории при наличии навигационных ошибок, неопределенности инерционных параметров роботов и ограничений на ресурсы управления.

7) Разработан новый способ агрегирования и построения вектор-функций Ляпунова и обобщенно однородных систем сравнения Матросова, приводящих к более конструктивным условиям асимптотической устойчивости, проверяемым по правым частям.

По результатам этапа НИР 2017 г. опубликовано 19 работ в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science и Scopus [7,15,28,34-36,40,46,51-54,62,64,65,67,68,71,75]; 18 работ в изданиях, включенных в базу данных РИНЦ [17,18,20,22,23,25,37,38,41,42,47-50,63,66,82,85]. Общее количество публикаций по результатам этапа НИР 2017 г. – 53, из них в журналах – 39.

Наиболее значимые результаты этапа НИР 2017 г.:

1. Разработаны булевы модели, алгоритмы и программные средства синтеза законов управления для линейных ДДС и нелинейных ДДС с аддитивным входением управляющих воздействий. Предложены два способа управления выполнением разработанных программных средств на основе сервис-ориентированного подхода и мультиагентного управления: организация управления композитным приложением с помощью сервисов логики выполнения; организация взаимодействия вычислительных сервисов с помощью самоорганизующейся МАС на основе децентрализованного управления на распределенной модели предметной области. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., д.т.н. Опарин Г.А., к.т.н. Богданова В.Г., к.т.н. Горский С.А., Пашинин А.А.

2. Разработаны новые модели и инструментальные средства организации вычислений в гетерогенной среде с виртуализированными ресурсами, базирующиеся, в отличие от известных, на интегрированном применении методов и средств инженерии знаний. Эти модели и средства успешно применены в процессе решения ряда практических задач. *Авторы результата:* ак., Бычков И.В., к.т.н. Феоктистов А.Г., к.т.н. Сидоров И.А., к.т.н. Горский С.А., Костромин Р.О.

3. Разработан алгоритм управления автономным подводным роботом [71], обеспечивающий движение по заданной траектории при наличии навигационных ошибок, неопределенности инерционных параметров роботов и ограничений на ресурсы управления. Он составляет основу различных режимов многорежимной системы управления группой подводных роботов в миссии по обследованию придонной области [72,73], а также используется для управления лидером при движении в формации [62,75]. *Авторы результата:* ак. Бычков И.В., к.т.н. Ульянов С.А., к.ф.-м.н. Нагул Н.В., Давыдов А.В.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Sage Tutorial in Russian [Электронный ресурс] // URL: http://doc.sagemath.org/pdf/ru/tutorial/SageTutorial_ru.pdf (дата обращения: 19.12.2017).
2. Lonsing F. DepQBF: A Dependency-Aware QBF Solver / F. Lonsing, A. Biere // *Journal of Satisfiability, Boolean Modeling and Computation*. – 2010. – Vol. 7. – Pp. 71-76.
3. Balyo T. HordeQBF: A Modular and Massively Parallel QBF Solver / T. Balyo, F. Lonsing // 19th International Conference «Theory and Applications of Satisfiability Testing» (SAT 2016), July 5-8, 2016, Bordeaux, France. *Lecture Notes in Computer Science*. – 2016. – Vol. 9710. – Pp. 531-538.
4. The MiniSAT Page: сайт. – URL: <http://minisat.se> (дата обращения: 19.12.2017).
5. Automating Environmental Computing Applications with Scientific Workflows / R. Ferreira da Silva et al. // *Environmental Computing Workshop (ECW 2016)*, 12th International Conference on e-Science, October 23-26, 2016, Baltimore, Maryland, USA. IEEE. – 2016. – Pp. 400-406.
6. Hybrid Evolutionary Workflow Scheduling Algorithm for Dynamic Heterogeneous Distributed Computational Environment / D. Nasonov et al. // *International Joint Conference SOCO'14-CISIS'14-ICEUTE'14*, June 25-27, 2014, Bilbao, Spain. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2014. – Vol. 299. – Pp. 83-92.
7. Automation Development Framework of Scalable Scientific Web Applications Based on Subject Domain Knowledge / I.V. Bychkov et al. // 14th International Conference on Parallel Computing Technologies (PaCT 2017), September 4-8, 2017, Nizhny Novgorod, Russia. *Lecture Notes in Computer Science*. – 2017. – Vol. 10421. – Pp. 278-288.
8. Sukhoroslov O. Web-Based Platform for Publication and Distributed Execution of Computing Applications / O. Sukhoroslov, S. Volkov, A. Afanasiev // 14th International Symposium on Parallel and Distributed Computing (ISPDC), Jun 29 – Jul 2, 2015, Limassol, Cyprus. IEEE. – 2015. – Pp. 175-184.
9. Knowledge-Based Expressive Technologies within Cloud Computing Environments / S.V. Kovalchuk et al. // *Practical Applications of Intelligent Systems: Eighth International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE 2013)*, November 20-23, 2013, Shenzhen, China. *Advances in Intelligent Systems and Computing* – 2014. – Vol. 279. – Pp.1-11.
10. Гилл А. Линейные последовательностные машины / А. Гилл. – М.: Наука, 1974. – 288 с.
11. Фараджев Р.Г. Линейные последовательностные машины / Р.Г. Фараджев. – М.: Советское радио, 1975. – 248 с.
12. Gill A. Analysis and Synthesis of Stable Linear Sequential Circuits / A. Gill // *Journal of ACM*. – 1965. – Vol. 12(1). – Pp. 141-149.

13. Фараджев Р.Г. Об уравнениях синтеза линейных последовательностных машин / Р.Г. Фараджев // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 9. – С. 81-90.
14. Reger J. A Finite Field Framework for Modeling, Analysis and Control of Finite State Automata / J. Reger, K. Schmidt // Mathematical and Computer Modeling of Dynamic Systems. – 2004. – Vol. 10(3-4). – Pp. 253-285.
15. Somov Ye.I. Methods and Software for Computer-Aided design of the Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems / Ye.I. Somov, G. Oparin // 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA 2016 World Congress), July 4-8, 2016, La Rochelle, France. AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1798(1). – Pp. 020118-1-020118-9.
16. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982. – 416 с.
17. Параллельное решение задачи о статическом регуляторе для двоичных динамических систем / Г.А. Опарин и др. // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2017): Короткие статьи и описания плакатов XI Междунар. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 416-426.
18. Методы и средства синтеза линейной обратной связи в двоичных динамических системах: логический подход / Г.А. Опарин и др. // Аналитическая механика, устойчивость и управление: тр. XI Междунар. Четаевской конф. (13-17 июня 2017 г., Казань). – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т. 3. – С. 147-157.
19. Бохман Д. Двоичные динамические системы / Д. Бохман, Х. Постхоф. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.
20. Опарин Г.А. Сервис-ориентированные средства распределенного решения декомпозируемых вычислительных задач / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 4. – С. 52-61.
21. VM VirtualBox: сайт. – URL: <https://www.virtualbox.org/> (дата обращения: 19.12.2017)
22. Богданова В.Г. Web-сервис синтеза линейной обратной связи для двоичных динамических систем / В.Г. Богданова, С.А. Горский, А.А. Пашинин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 4. – С. 62-70.
23. Самоорганизация процесса сборочного программирования в распределенной вычислительной среде / И.В. Бычков и др. // 10-я Всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ 2017: материалы 10-ой Всероссийской мультikonференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11-16 сентября 2017 г.): в 3 т./ [редкол. И.А. Каляев (отв. Ред.) и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – Т. 3. – С.80-83.

24. Опарин Г.А. Разработка сервис-ориентированного интеллектуального решателя вычислительных задач на основе самоорганизующейся мультиагентной системы / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5-7 декабря 2017 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2017. – С.40.
25. Интеллектуализация децентрализованного управления распределенными вычислениями / И.В. Бычков и др. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 10. – С. 35-42.
26. Иркутский суперкомпьютерный центр Сибирского отделения РАН: сайт. – URL: <http://hrc.icc.ru> (дата обращения 19.12.2017).
27. QBF Gallery 2014 (Competition) [Электронный ресурс] // URL: <http://qbf.satisfiability.org/gallery/applications.tgz> (дата обращения: 19.12.2017).
28. Service-Oriented Application for Parallel Solving the Parametric Synthesis Feedback Problem of Controlled Dynamic Systems / G.A. Oparin et al. // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 353-358.
29. Богданова В.Г. Параллельное решение декомпозируемых вычислительных задач на основе сервис-ориентированного подхода / В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5-7 декабря 2017 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2017. – С.8.
30. A Control Theory for Boolean Monomial Dynamical Systems / D. Boolman et al. // Discrete Event Dynamic Systems. – 2010. – Vol. 20(1). – Pp. 19-35.
31. Talia D. Clouds meet agents: Toward intelligent cloud services / D. Talia // IEEE Internet Computing. – 2012. – Vol. 16(2). – Pp. 78–81.
32. Singh A. A Novel Agent Based Autonomous and Service Composition Framework for Cost Optimization of Resource Provisioning in Cloud Computing / A. Singh, D. Juneja, M. Malhotra // Journal of King Saud University (Computer and Information Sciences). – 2017. – Vol. 29(1). – Pp. 19-28.
33. Shyam G.K. Resource Allocation in Cloud Computing Using Agents / G.K. Shyam, S.S. Manvi // International Advance Computing Conference (IACC), June 12 - 13, 2015, Bangalore, India. IEEE. – 2015. – Pp. 458–463.
34. Automation of Multi-Agent Control for Complex Dynamic Systems in Heterogeneous Computational Network / G. Oparin et al. // 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA 2016 World Congress), July 4-8, 2016, La Rochelle, France. AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1798(1). – Pp. 020117-1-020117-10.

35. The Service-Oriented Multiagent Approach to High-Performance Scientific Computing / I. Bychkov et al. // 6th International Conference on Numerical Analysis and Its Applications (NAA 2016), June 15-22, 2016, Lozenetz, Bulgaria. Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10187. – Pp. 261-268.
36. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management / I. Bychkov et al. // XII International Symposium Intelligent Systems 2016 (INTELS 2016), October 5-7, 2016, Moscow, Russia. Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – Pp. 162-167.
37. Феоктистов А.Г. Классификация масштабируемых программных комплексов / А.Г. Феоктистов, А.С. Корсуков, О.Ю. Башарина // Вестник ИрГТУ. – 2017. – № 11. – С. 92-103.
38. Костромин Р.О. Мультиагентная система управления распределенными вычислениями / Р.О. Костромин, А.Г. Феоктистов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 4. – С. 18-22.
39. Костромин Р.О. Подход к автоматизации создания самоорганизующейся мультиагентной системы для управления вычислениями в интегрированной НРС-среде / Р.О. Костромин // Материалы XIII Всерос. конф. молодых ученых «Моделирование, оптимизация и информационные технологии – 2017». – Иркутск: Научно-организационный отдел ИДСТУ СО РАН, 2017. – С. 40.
40. Knowledge Elicitation in Multi-Agent System for Distributed Computing Management / A. Feoktistov et al. // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 1350-1355.
41. Феоктистов А.Г. Извлечение знаний агентами в системе управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 3. – С. 136-143.
42. Феоктистов А.Г. Методы и средства извлечения знаний в мультиагентной системе управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин, Ю.А. Дядькин // 10-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ 2017: материалы 10-ой Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11-16 сентября 2017 г.): в 3 т./ [редкол. И.А. Каляев (отв. Ред.) и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – Т. 3. – С.117-119.
43. Феоктистов А.Г. Библиотека алгоритмов для эффективного извлечения и применения проблемно-ориентированных знаний агентами / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663706. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2017.

44. Костромин Р.О. Извлечение знаний агентами в самоорганизующейся системе управления распределенными вычислениями / Р.О. Костромин // Материалы XVIII Всерос. конф. молодых учёных по математическому моделированию (г. Иркутск, Россия, 21-25 августа 2017 г.). – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. – С. 78-79.
45. Феоктистов А.Г. Модель извлечения знаний в процессе мультиагентного управления распределенными вычислениями / А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин // Материалы конф. «Ляпуновские чтения» (г. Иркутск, 5-7 декабря 2017 г.). – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2017. – С. 55.
46. Job Flow Management for Virtualized Resources of Heterogeneous Distributed Computing Environment / I. Bychkov et al. // 3rd International Conference «Information Technology and Nanotechnology» (ITNT-2017), April 25-27, 2017, Samara, Russia. Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – Pp. 534-542.
47. 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.
48. Интеллектуальная технология управления вычислениями в виртуализированной кластерной среде / И.В. Бычков и др. // 10-я Всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ 2017: материалы 10-ой Всероссийской мультиконференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11-16 сентября 2017 г.): в 3 т./ [редкол. И.А. Каляев (отв. Ред.) и др.]. – Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – Т. 3. – С. 84-86.
49. Феоктистов А.Г. Оценка времени выполнения заданий в Grid с виртуализированными ресурсами / А.Г. Феоктистов // Моделирование и анализ сложных технических и технологических систем: Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 113-116.
50. Феоктистов А.Г. Инструментальные средства разработки распределенных пакетов программ / А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, С.А. Горский // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2017. – № 4. – С. 32-37.
51. Multiobjective Vehicle-type Scheduling in Urban Public Transport / D. Pena et al. // International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW 2017), May 29 – June 2, 2017, Orlando, Florida, USA. IEEE. – 2017. – Pp. 482-491.
52. Load-Aware Strategies for Cloud-based VoIP Optimization with VM Startup Prediction / J.M. Cortes-Mendoza et al. // International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW 2017), May 29 – June 2, 2017, Orlando, Florida, USA. IEEE. – 2017. – Pp. 472-481.
53. Edelev A.V. Combinatorial Modeling Approach to Find Rational Ways of Energy Development with Regard to Energy Security Requirements / A.V. Edelev, I.A. Sidorov // 6th International Conference

- on Numerical Analysis and Its Applications (NAA 2016), June 15-22, 2016, Lozenetz, Bulgaria. Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10187. – Pp. 310-317.
54. The Combinatorial Modelling Approach to Study Sustainable Energy Development of Vietnam / A. Edelev et al. // Supercomputing: Third Russian Supercomputing Days (RuSCDays 2017), September 25-26, 2017, Moscow, Russia. Communications in Computer and Information Science. – 2017. – Vol. 793. – P. 207-218.
55. Феоктистов А.Г. Автоматизация разработки и применения распределенных пакетов прикладных программ / А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, С.А. Горский // Проблемы информатики. – 2017. – № 4. (в печати)
56. Феоктистов А.Г. Инструментальные средства разработки распределенных пакетов прикладных программ на основе модульного подхода / А.Г. Феоктистов, И.А. Сидоров, С.А. Горский // Марчуковские научные чтения: Труды Междунар. конф. – Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2017. – С. 950-956.
57. Автоматизация распределенного имитационного моделирования систем массового обслуживания / А.Г. Феоктистов и др. // Вестник ИрГТУ. – 2017. – № 12. (в печати)
58. Феоктистов А.Г. Инструментальный комплекс для автоматизации имитационного моделирования систем массового обслуживания / А.Г. Феоктистов, Ю.А. Дядькин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017616449. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2017.
59. Ларионов А.А. Транслятор языка первопорядковых логических формул в формате ТРТР в язык позитивно-образованных формул ТРТР2PCF / А.В. Давыдов, А.А. Ларионов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613922. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2017.
60. Bychkov I.V. Task Allocation and Path Planning for Network of Autonomous Underwater Vehicles / I.V. Bychkov, M.Yu. Kenzin, N.N. Maksimkin // 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2017), September 25-29, 2017, Vladivostok, Russia. Information Technology in Industry. (в печати)
61. Drucker N. Cyclic Routing of Unmanned Aerial Vehicles / N. Drucker, M. Penn, O. Strichman // Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming: 13th International Conference CPAIOR-2016, May 29 - June 1, 2016, Banff, AB, Canada. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9676. – Pp. 125-141.
62. Intelligent Control of Autonomous Underwater Vehicles Groups / I. Bychkov et al. // 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2017). April 24-26, 2017, Nagoya, Japan. IEEE. – 2017. – Pp. 180-183.

63. Кензин М.Ю. Гибридный эволюционный подход к маршрутизации гетерогенной группы подводных роботов / М.Ю. Кензин, И.В. Бычков, Н.Н. Максимкин // Аналитическая механика, устойчивость и управление: тр. XI Междунар. Четаевской конф. (13-17 июня 2017 г., Казань). – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т. 1. – С. 87-94.
64. Kenzin M.Yu. An Evolutionary Approach to Route the Heterogeneous Groups of Underwater Robots // M.Yu. Kenzin, I.V. Bychkov, N.N. Maksimkin // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 1328-1331.
65. Davydov A. The Formal Description of Discrete-Event Systems Using Positively Constructed Formulas / A. Davydov, A. Larionov, N. Nagul // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 1161-1165.
66. Нагул Н.В. Сохранение свойства безотказности супервизора для дискретно-событийной системы / Н.В. Нагул // Аналитическая механика, устойчивость и управление: тр. XI Междунар. Четаевской конф. (13-17 июня 2017 г., Казань). – Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. – Т. 2. – С. 176-185.
67. Nagul N. On the Problem of Discrete-Event Systems Properties Preservation / N. Nagul, I. Bychkov // 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA 2016 World Congress), July 4-8, 2016, La Rochelle, France. AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1798(1). – Pp. 020107-1-020107-10.
68. Nagul N. On the Properties of Discrete-Event Systems with Observable States / N. Nagul // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 1328-1331.
69. Козлов Р.И. Исследование динамики нелинейных систем с неопределенностями и возмущениями методом ВФЛ, I / Р.И. Козлов, С.В. Бурносков // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 4. – С. 56-63.
70. Козлов Р.И. Исследование устойчивости нелинейных непрерывно-дискретных моделей экономической динамики методом ВФЛ, I / Р.И. Козлов, О.Р. Козлова // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 2. – С. 104-113.
71. Ul'yanov S.A. Software Toolbox for Analysis and Design of Nonlinear Control Systems and Its Application to Multi-AUV Path-Following Control / S.A. Ul'yanov, N.N. Maksimkin // 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2017), May 22-26, 2017, Opatija, Croatia. IEEE. – 2017. – Pp. 1223-1228.

72. Событийный подход к многорежимному управлению группировкой подводных роботов в обследовательской миссии. / И.В. Бычков и др. // Вычислительные технологии. – 2017. (в печати)
73. Hybrid Control Approach to Multi-AUV System in a Surveillance Mission. / I. Bychkov et al. // 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2017), September 25-29, 2017, Vladivostok, Russia. Information Technology in Industry. (в печати)
74. Hierarchical Control of Multi-AUV Systems / I. Bychkov et al. // Industry 4.0. International Scientific Journal. – 2017. – Year II (2). – Pp. 60-63.
75. Vassilyev S. A VLF-based Technique in Applications to Digital Control of Nonlinear Hybrid Multirate Systems / S. Vassilyev, S. Ulyanov, N. Maksimkin // 11th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences (ICNPAA 2016 World Congress), July 4-8, 2016, La Rochelle, France. AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1798(1). – Pp. 020170-1-020170-10.
76. Матросов В.М. Теория устойчивости многокомпонентных систем / В.М. Матросов, Р.И. Козлов, Н.И. Матросова. – М.: Физматлит, 2007. – 184 с.
77. Siljak D.D. Large-Scale Dynamic Systems: Stability & Structure / D.D. Siljak – USA: Dover Publications, 2007. – 448 p.
78. Aleksandrov A.Yu. Stability Analysis of Hybrid Mechanical Systems with Switched Nonlinear Nonhomogeneous Positional Forces / A.Yu. Aleksandrov, A.A. Kosov // 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA), May 22-27 2017, St. Petersburg, Russia. IEEE. – 2017. (в печати)
79. Kosov A.A. On the Control Problem of a Switched Mechanical System / A.A. Kosov // 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA), May 22-27 2017, St. Petersburg, Russia. IEEE. – 2017. (в печати)
80. Bailey F.N. The Application of Lyapunov's Second Method to Interconnected Systems / F.N. Bailey // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics: Series A Control. – 1965. – Vol. 3(3). – Pp. 443–462.
81. Фурасов В.Д. О векторных функциях Ляпунова и стабилизации взаимосвязанных систем / В.Д. Фурасов // Прикладная математика и механика. – Т. 39. – Вып. 1. – С. 59-65.
82. Косов А.А. О точных многомерных решениях системы уравнений реакции-диффузии со степенными нелинейностями / А.А. Косов, Э.И. Семенов // Сибирский математический журнал. – 2017. – Т. 58. – № 4 (344). – С. 796-812.
83. Косов А.А. Первые интегралы и периодические решения системы со степенными нелинейностями / А.А. Косов, Э.И. Семенов // Сибирский журнал индустриальной математики. (в печати)

84. Косов А.А. О точных многомерных решениях одной нелинейной системы уравнений реакции-диффузии / А.А. Косов, Э.И. Семенов // Дифференциальные уравнения. (в печати)
85. Косов А.А. О первых интегралах и точных решениях одной системы обыкновенных дифференциальных уравнений со степенными нелинейностями / А.А. Косов, Э.И. Семенов, С.П. Голышева // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Математика. – 2017. – Т. 20. – С. 45-60.