

*На правах рукописи*



**АЛАДИН ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**МИВАРНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО  
ПЛАНИРОВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», г. Москва, Россия.

Научный руководитель: Варламов Олег Олегович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева», г. Москва, Россия.

Официальные оппоненты:

- 1) Виноградов Геннадий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией 29 отдела АО «Научно-исследовательский институт «Центрпрограммсистем», г. Тверь, Россия.
- 2) Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем и технологий Воронежского института высоких технологий – автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования, г. Воронеж, Россия.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Россия.

Защита диссертации состоится 20 мая 2026 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета 75.1.026.01 в АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева» по адресу: 117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «Научно-исследовательский институт вычислительных комплексов им. М. А. Карцева» и на сайте <https://niivk.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 75.1.026.01  
канд. техн. наук, доцент



Е.И. Мутина

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Актуальность темы исследования обусловлена стремительным развитием технологий искусственного интеллекта, робототехники и киберфизических систем. В современных условиях, когда технические системы становятся всё более автономными и требуют способности к адаптации и функционированию в реальном времени, проблема автоматического планирования действий при принятии управленческих решений приобретает особую значимость.

Существующие подходы к автоматическому планированию в пространстве состояний сталкиваются с высокой вычислительной сложностью и недостаточной скоростью обработки данных, что ограничивает их применение в автономных системах и системах управления в реальном времени. При построении моделей планирования существенную роль играет формализация знаний о предметной области. Высокая трудоёмкость разработки и сопровождения таких моделей затрудняет создание интеллектуальных систем, способных функционировать в динамичных условиях.

В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых моделей и методов интеллектуального планирования действий, направленных на снижение вычислительной сложности и повышение скорости обработки данных при принятии управленческих решений, обеспечивая тем самым надёжность и оперативность функционирования технических систем.

Перспективным направлением решения обозначенных проблем является использование миварных технологий логического искусственного интеллекта, основанных на линейно-вычислительной логике и продукционных правилах. Данные технологии обеспечивают формализацию знаний для роботизированных и робототехнических комплексов в виде миварных сетей и позволяют достигать линейной вычислительной сложности при построении логического вывода. Это делает возможным создание гибких и масштабируемых систем планирования, адаптируемых к динамическим изменениям внешней среды.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых моделей и методов интеллектуального планирования, способных обеспечить более высокую производительность при решении задач автоматического планирования в технических системах. Работа выполнена в соответствии с научным направлением разработки математического и алгоритмического обеспечения интеллектуальных систем планирования и управления техническими объектами.

**Степень разработанности темы.** Исследования в области автоматического планирования имеют фундаментальную теоретическую основу, заложенную в работах основоположников данного направления. Значительный вклад в развитие теории автоматического планирования внесли R.E. Fikes и N.J. Nilsson, разработавшие автоматический планировщик и формальный язык STRIPS, а также J. McCarthy, A. Tate, V. Kumar, A. Blum, M. Furst, H. Kautz и B. Selman, развившие

формализмы планирования и языки описания предметных областей. Вопросы вычислительной сложности задач планирования исследовались в трудах Т. Bylander, N. Gupta, D. Nau, S. Chenoweth и G. Sussman, доказавших NP-полноту ряда постановок задач планирования и ограничения STRIPS-подобных алгоритмов. Существенный прогресс в развитии методов планирования и языков описания действий и домена связан с работами E. Pednault, предложившего язык ADL, и D. McDermott с соавторами, разработавшими язык PDDL.

Современные тенденции развития интеллектуальных планировщиков связаны с применением методов машинного обучения и нейронных сетей, исследуемых в работах E. Onaindia, B. Jerbić и S. Thiébaux. Отечественные исследования в области автоматического планирования охватывают широкий спектр направлений и представлены, в частности, трудами Г.С. Осипова, А.И. Панова и Г.В. Рыбиной.

Проблематика автоматического планирования получила развитие в ряде диссертационных исследований И.Н. Габдрахманова, А.А. Алимова, Б.С. Юдинцева, Ю.М. Блохина и Чинь Суан Лонга. Миварным технологиям логического искусственного интеллекта также посвящён ряд диссертационных работ таких авторов, как О.О. Варламов, Р.А. Санду, Д.А. Чувиков и О.В. Кривошеев.

Анализ работ по теме показал, что автоматическое планирование является ключевым элементом при создании робототехнических, транспортных и киберфизических систем. В частности, особый интерес представляет планирование в пространстве состояний, которое применяется в интеллектуальных системах. Обзор позволил выявить ограничения существующих подходов, обусловленные высокой вычислительной сложностью и зависимостью от экспертной формализации знаний. Это подтверждает необходимость поиска новых подходов к решению задач планирования.

Определены направления дальнейших исследований, связанные с автоматизацией генерации баз знаний, снижением вычислительных затрат и повышением адаптивности систем интеллектуального планирования. В настоящем исследовании для решения выявленных проблем применяются миварный и метаграфовый подходы, обеспечивающие формализацию знаний о предметной области, их обработку, а также создание производительных и масштабируемых интеллектуальных систем управления.

**Объектом исследования** являются интеллектуальные системы планирования действий при принятии управленческих решений в технических системах.

**Предметом исследования** являются модели и методы интеллектуального планирования действий в пространстве состояний.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационного исследования являются снижение вычислительной сложности задач интеллектуального планирования действий в пространстве состояний и ускорение процесса их обработки при принятии управленческих решений в технических системах.

Для достижения поставленной цели решены следующие частные научные задачи:

- 1) анализ существующих подходов автоматического и интеллектуального

планирования действий в пространстве состояний и выявление их ограничений и определение направлений их совершенствования;

2) разработка и исследование моделей миварной базы знаний и миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений;

3) разработка методов автоматической генерации миварных баз знаний и решения задач планирования действий в пространстве состояний;

4) разработка математического и алгоритмического обеспечения на основе разработанных моделей и методов;

5) проведение эксперимента по оценке производительности математического и алгоритмического обеспечения, реализующего предложенные модели и методы.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач в исследовании используются методы системного анализа, экспертного моделирования, принятия решений, теории информации, теории самообучающихся технических систем и теории графов. Общей методологической основой является системный подход.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1) модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний, характеризующаяся структурной декомпозицией знаний по множествам правил и параметров, обеспечивающей возможность автоматической генерации, масштабирования и параллельной обработки информации;

2) модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний, для описания которой используются миварный и метаграфовый подходы, что делает возможным представление системы в виде сложного графа взаимосвязанных элементов и обеспечивает формализацию интерфейсов её взаимодействия с другими информационными системами;

3) метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний, основанный на интеграции миварного и метаграфового подходов с целью обеспечения адаптации систем управления и принятия решений к изменениям предметной области посредством динамического масштабирования баз знаний в зависимости от количества управляемых объектов;

4) метод решения задач принятия решений и обработки информации для планирования действий в пространстве состояний, использующий циклическую обработку миварных сетей для автоматической генерации частных планов действий и их адаптации в соответствии с текущим состоянием предметной области;

5) математическое и алгоритмическое обеспечение, реализующее параллельную обработку логических правил в миварной машине логического вывода с механизмом выборочного вычисления выходных параметров при активации правил, что обеспечивает снижение вычислительной сложности и ускорение построения плана действий в интеллектуальных системах управления.

**Теоретическая значимость** заключается в том, что новые предлагаемые модели миварной базы знаний и миварной проблемно-ориентированной системы и методы автоматической генерации миварных баз знаний и решения задач планирования действий в пространстве состояний могут быть применены при подготовке информационных моделей систем планирования действий и для исследования и анализа их организационной структуры в рамках концепции гибридных интеллектуальных информационных систем.

**Практическая значимость** работы заключается в снижении вычислительной сложности задач интеллектуального планирования действий в пространстве состояний и ускорении их обработки при принятии управленческих решений в технических системах. В соответствии с предлагаемыми моделями и методами разработана миварная машина логического вывода в виде программного обеспечения, на основе которой предлагается создавать системы интеллектуального планирования действий. Предложены варианты применения полученных результатов для разработки систем поддержки управления и принятия решений транспортных средств и автономных робототехнических комплексов различного базирования и назначения, а также систем поддержки принятия решений в медицине и сельском хозяйстве.

**Достоверность** результатов обеспечивается применением известных математических методов при разработке моделей и методов, а также подтверждается результатами аналитических расчётов и вычислительных экспериментов.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний обеспечивает структурную декомпозицию знаний по множествам правил и параметров и предоставляет возможность автоматической генерации баз знаний, их масштабирования и параллельной обработки;

2) модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний позволяет представлять систему в виде сложного графа взаимосвязанных элементов и обеспечивает формализацию интерфейсов её взаимодействия с другими информационными системами;

3) метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний обеспечивает адаптацию систем управления и принятия решений к изменениям предметной области посредством динамического масштабирования баз знаний в зависимости от количества управляемых объектов;

4) метод решения задач принятия решений и обработки информации для планирования действий в пространстве состояний позволяет применять миварные сети для автоматической генерации частных планов действий и их адаптации к текущему состоянию предметной области;

5) математическое и алгоритмическое обеспечение обеспечивает снижение вычислительной сложности и ускорение построения плана действий в интеллектуальных системах управления.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докла-

дывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT» (Дивноморское, 2017 г., 2018 г.); Международный научно-технический конгресс «Интеллектуальные системы и информационные технологии» («ИС & ИТ», «IS&IT») (Дивноморское, 2019 г., 2020 г., 2023 г., 2024 г.); Студенческая научная весна (Москва, 2018 г.); Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИИУС-2018) (Нальчик, 2018 г.); Международный автомобильный научный форум (МАНФ-2018) «Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем» (Москва, 2018 г.); XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС - 2019) (Москва, 2019 г.); Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий (Ростов-на-Дону, 2020 г.); III Всероссийская научная конференция «Интеллектуальные технологии и проблемы математического моделирования» (Ростов-на-Дону, 2020 г.); Международный автомобильный научный форум (МАНФ-2020) «Наземные интеллектуальные транспортные средства и системы», Автонет-2020 «Форум инновационных транспортных технологий» (Москва, 2020 г.); Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных (Москва, 2022 г., 2023 г., 2024 г.); Международная научная конференция молодежной школы «МИВАР» (Москва, 2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.); Международная молодёжная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE) (Москва, 2025 г.).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертации использованы при реализации гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерциализации в рамках инновационного проекта № 13554ГУ/2018 от 23.07.2018 г., предоставленного Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), и внедрены в практическую деятельность ООО «НПИ ФИРМА «ГИПЕРИОН», ООО «Интерпром», ООО «Окологика», а также в образовательный процесс кафедры «Системы обработки информации и управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта» паспорта специальности 2.3.1. «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 73 печатные работы, в том числе: 7 статей опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК; 12

публикаций в изданиях, индексируемых в базах «Scopus» и «Web of Science»; 1 монография и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные публикации по теме диссертации представлены 25 работами, из которых 4 подготовлены без соавторов. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателем предложены: [4, 9, 10, 12, 13] – формализация знаний в виде миварных сетей в соответствии с моделью миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний, а также создание систем управления и принятия решений, обеспечивающих их обработку; [7, 18, 21, 22] – использование модели миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний и создание системы поддержки принятия решений, реализующей обработку баз знаний, построенных на её основе; [5, 6, 8, 11, 15] – метод решения задач принятия решений и обработки информации для планирования действий в пространстве состояний; [14] – архитектура системы управления и принятия решений с применением миварных технологий логического искусственного интеллекта; [16] – способ предварительной подготовки знаний для формализации в виде миварных сетей; [17] – применение модели миварной базы знаний и метода решения задач принятия решений и обработки информации в контуре управления с циклическим и календарным планированием процессов; [19] – алгоритмы работы машин логического вывода и их архитектуры; [23, 24] – реализация математического и алгоритмического обеспечения для обработки миварных баз знаний; [25] – обоснование и способы применения моделей и методов планирования действий при решении задач в пространстве состояний.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 179 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста (основной текст занимает 136 страниц, содержит 44 рисунка и 9 таблиц).

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и частные задачи, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, выносимых на защиту.

**В первой главе** представлены результаты обзорно-аналитического исследования методов интеллектуального (автоматического) планирования действий, применяемых при принятии управленческих решений в технических системах. Планирование рассматривается как процесс синтеза плана – последовательности действий, переводящей предметную область из текущего состояния в заданное целевое при наличии ограничений и допустимых операций. Показано, что работоспособность планировщика определяется качеством модели предметной области: полнотой описания действий и условий их применимости, корректностью ограничений и адекватностью выбранного формализма.

В рамках главы проведено разграничение задач планирования и диспетчеризации: планирование ориентировано на построение последовательности действий для достижения цели с учётом ограничений предметной области и характеризуется высокой вычислительной сложностью, тогда как диспетчеризация связана с организацией выполнения запланированных действий (составлением расписания) с учётом доступных ресурсов. Отмечено, что в задачах реального времени возникает необходимость компромисса между осуществимостью и оптимальностью: стремление к получению оптимального плана приводит к росту вычислительных затрат, тогда как на практике приоритет часто смещается в сторону своевременности и устойчивости принимаемых решений.

Формальная постановка задачи планирования представлена в терминах пространства состояний предметной области. Состояние предметной области  $S_{\text{ПРО}}$  в момент времени  $t$  рассматривается в виде кортежа  $\langle X(t), C(t), R(t) \rangle$ , где  $X$  – множество имён (знаков) объектов среды предметной области,  $C$  – множество их свойств (признаков),  $R$  – множество отношений между ними. Действие  $g_k \in G$ , где  $G$  – множество имён (знаков) действий, допустимых над объектами множества  $X$ , обеспечивает преобразование одного состояния в другое:  $S_i(t) \xrightarrow{g_k} S_j(t)$ .

Задача планирования  $Z$  по переводу предметной области из состояния  $S_n$  в  $S_c$  задаётся кортежем  $\langle S_n, G, S_c \rangle$ . Решением задачи является последовательность действий (план)  $\{g_1, g_2, \dots, g_k\} \subseteq G$ , применение которой, начиная с состояния  $S_n$ , переводит предметную область в состояние  $S_c$ . Допустимых планов может существовать несколько.

Ретроспективный анализ развития методов интеллектуального планирования выявил переход от ранних подходов, основанных на доказательстве теорем (с характерными для них ограничениями производительности и проблемой фрейма), к планированию в пространстве состояний, а затем – к частично-упорядоченным планам и иерархическому планированию, использующему декомпозицию подцелей для перераспределения вычислительных ресурсов на приоритетные подзадачи. Такая эволюция отражает объективную потребность в более гибких моделях представления знаний и более эффективной организации поиска решений по мере роста сложности доменов задач. При этом анализ формализаций и инструментальных средств показывает, что современные универсальные планировщики на основе PDDL и ASP существенно зависят от размера и сложности предметной области: увеличение числа объектов и ограничений приводит к росту вычислительной трудоёмкости, что ограничивает их применение в автономных технических системах реального времени с жёсткими требованиями к быстродействию.

Анализ работ по применению методов планирования в робототехнических комплексах показал, что в условиях ограниченных вычислительных ресурсов бортовых средств и требований реального времени определяющим фактором становится не только качество формируемого плана, но и способность системы оперативно адаптироваться к изменениям состояния среды, а также эффективно обрабатывать знания о предметной области для обеспечения перепланирования и устойчивого поведения. В качестве перспективного направления, отвечающе-

го указанным требованиям, обоснован выбор миварных технологий логического искусственного интеллекта. Показано, что миварный подход обеспечивает унифицированное представление знаний и высокопроизводительный логический вывод с линейной вычислительной сложностью, а также применим при решении задач управления роботами, построения маршрутов, анализа дорожных ситуаций и координации групп мобильных исполнителей.

**Таким образом, обоснована направленность дальнейших исследований на разработку миварных моделей и методов, ориентированных на снижение вычислительной сложности планирования и повышение адаптивности систем управления.**

**Во второй главе** представлены результаты разработки двух моделей, обеспечивающих формализацию представления знаний предметной области для задач интеллектуального планирования и управления, ориентированных на структурирование, масштабируемость и адаптацию к изменяющимся условиям среды. Первая модель (рисунок 1) – модель миварной базы знаний, задающая логическую группировку параметров и правил и обеспечивающая анализ текущего состояния предметной области, выявление признаков достижения целей и синтез управляющих воздействий. Вторая модель (рисунок 2) – модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений, учитывающая динамику среды, роль машины логического вывода и взаимодействие с компонентами гибридной интеллектуальной информационной системы.

Формальная основа построения моделей задана через миварное представление концептуальной модели предметной области  $KMPpO_{\text{мивар}} = \langle V, S, O \rangle$ , где  $V$  – множество вещей (объектов, сущностей),  $S$  – множество свойств (атрибутов, характеристик),  $O$  – множество отношений (связей, взаимодействий). Состояние предметной области  $S_{\text{про}}(t)$  в момент времени  $t$  представляется в виде кортежа  $\langle V(t), S(t), O(t) \rangle$ . Одной из форм реализации миварной базы знаний является миварная сеть  $MIG = \langle V, E \rangle$ , представляемая двудольным ориентированным графом с множеством вершин  $V = P \cup R$ , где  $P$  – параметры,  $R$  – правила, а множество рёбер  $E$  включает только связи типа «параметр—правило» (вход/выход). Данная структура фиксирует, что переход от известных значений параметров к искомым выполняется посредством вычислительных действий правил.

Для формализации модели миварной базы знаний было предложено представить параметры  $P_i$  и правила  $R_i$  в виде кортежей:  $P_i = \langle IDP_i, VAL_i \rangle$  и  $R_i = \langle IDR_i, IN_i, OUT_i, ACT_i \rangle$ , где  $IDP_i$  и  $IDR_i$  – идентификаторы параметра и правила,  $VAL_i$  – значение параметра,  $IN_i$  и  $OUT_i$  – входное и выходное множества параметров правила,  $ACT_i$  – вычислительное действие для расчёта значений параметров из  $OUT_i$ . Действие  $ACT_i$  выполняется при известности всех значений параметров из  $IN_i$  (условие активации правила). Введено ограничение  $IN_i \cap OUT_i = \emptyset$ , обеспечивающее двудольность миварной сети и исключающее переопределение ранее установленных значений параметров в процессе миварной логико-вычислительной обработки.

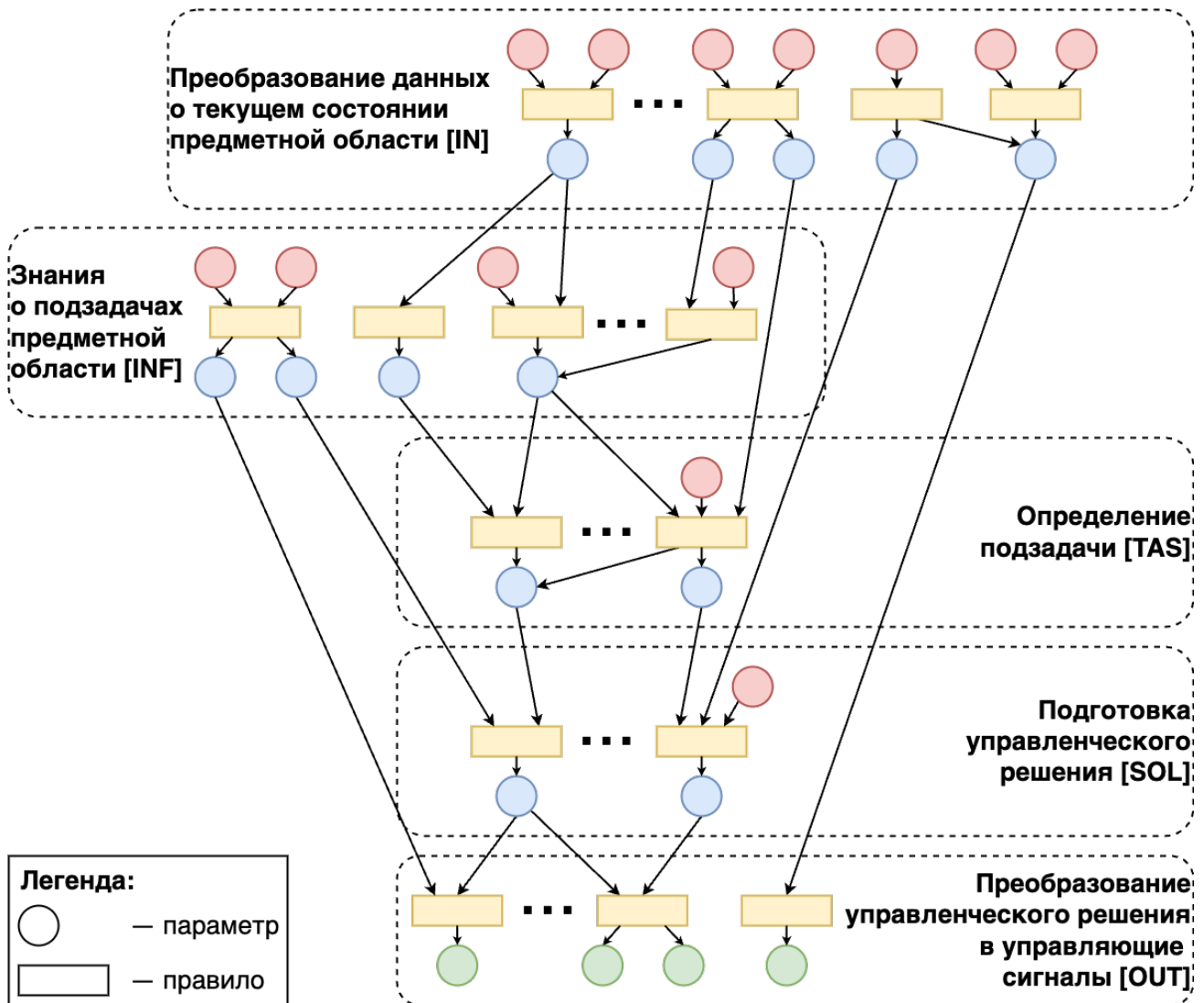


Рисунок 1 — Модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний

Разработанная модель миварной базы знаний для управленческих задач в пространстве состояний представлена ориентированным графом, отражающим группировку параметров и правил в множества, выделяемые при декомпозиции задачи на подзадачи (рисунок 1):  $IN$  – подготовка и преобразование данных о текущем состоянии предметной области;  $INF$  – знания о подзадачах и фактах предметной области, обеспечивающие организацию декомпозиции;  $TAS$  – определение текущей подзадачи и контроль её статуса;  $SOL$  – подготовка управленческого решения по выбранной подзадаче;  $OUT$  – преобразование решения в формат управляющих сигналов для внешних систем исполнения. Показано, что указанные множества реализуются как подграфы миварной сети, допускающие независимую обработку, а логический вывод по базе знаний включает компоненты из  $IN$  и  $OUT$ , что связывает анализ состояния и синтез решения в единой структуре.

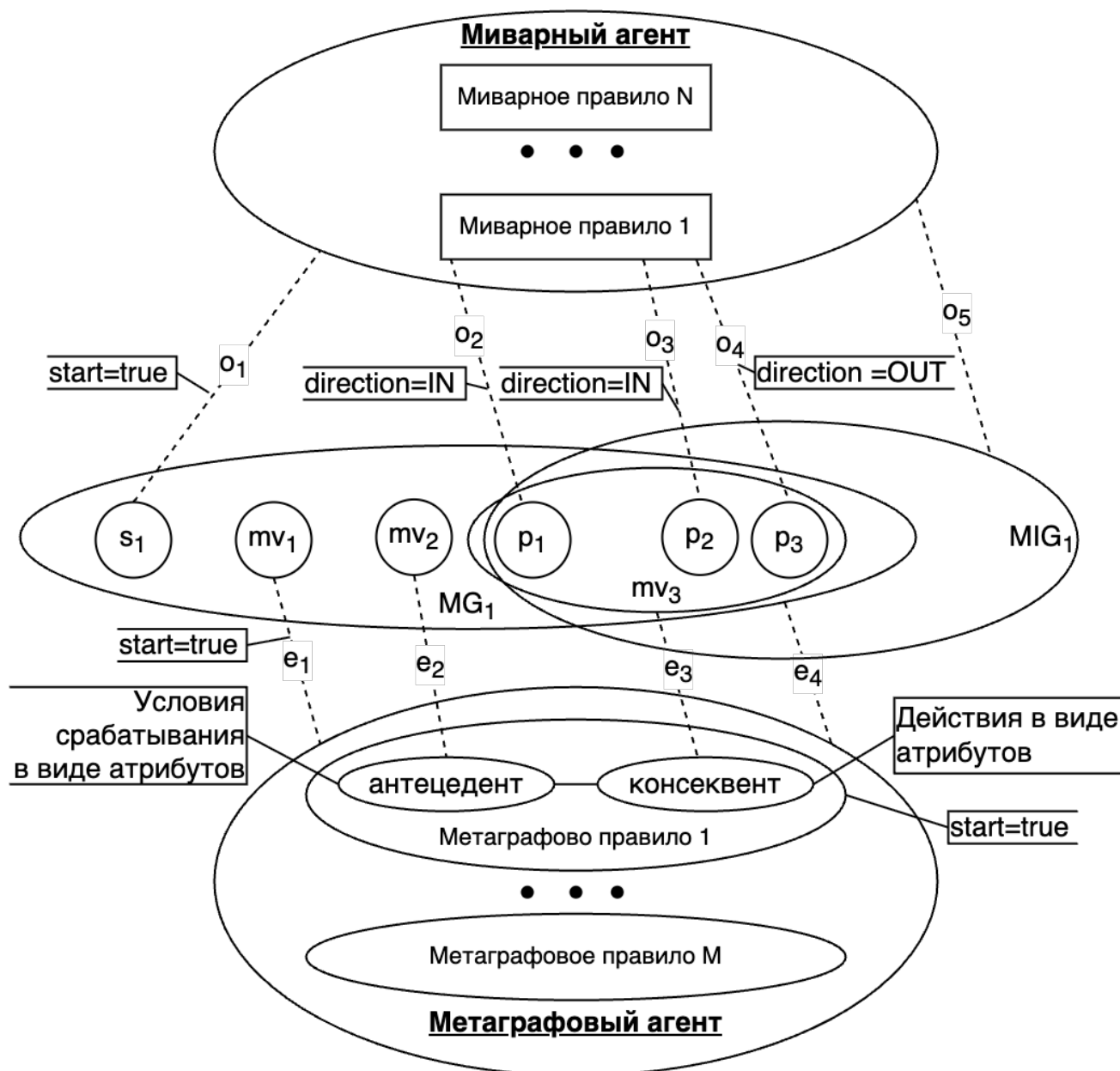


Рисунок 2 — Модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний

Для описания применения миварной базы знаний в составе информационной системы и формализации взаимодействия миварной машины логического вывода с внешней средой, как показано на рисунке 2, применён метаграфовый подход, формализация которого представлена в работах Ю. Е. Гапанюка. Метаграф определяется как  $\langle V, MV, E, ME \rangle$  с вершинами  $V$ , метавершинами  $MV$ , рёбрами  $E$  и метарёбрами  $ME$  и используется для представления разнородных структур и интеграционных связей. Компоненты миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений интерпретируются как взаимодействующие агенты гибридной интеллектуальной информационной системы, формализуемые посредством метаграфов. Для этого используется отображение элементов миварной сети в метаграф (параметры – в вершины с атрибутами идентификатора и значения, правила – в структуры метаграфа со связями входов/выходов), что

обеспечивает единый формализм для анализа взаимодействия модулей обработки данных и принятия решений.

Ключевым результатом является создание и описание миварного агента как специализированного метаграфового агента:  $ag^{MI} = \langle MG_D, \{r_i\}, AG^{ST} \rangle$ , где  $MG_D$  – фрагмент метаграфа данных и знаний (параметры миварной сети), на основе которого выполняются правила из множества  $\{r_i\}$  (правила миварной сети) и стартовое условие выполнения агента  $AG^{ST}$ , которое может быть представлено фрагментом метаграфа. Отличия миварного агента заключаются в использовании замкнутых правил (установление атрибутов вершин-параметров без переопределения ранее заданных значений) и в автоматическом определении порядка активации правил по текущему набору известных параметров без задания первого правила, что обеспечивает формальную основу интеграции миварной машины логического вывода с другими агентами и внешними информационными системами.

**Таким образом, разработаны модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний и модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений, обеспечивающие структурированное, масштабируемое представление знаний и формализованное взаимодействие миварной машины логического вывода с компонентами гибридной интеллектуальной информационной системы.**

**В третьей главе** представлены результаты разработки двух методов: метода автоматической генерации миварной базы знаний, обеспечивающего динамическое масштабирование структуры знаний в зависимости от текущей задачи и состояния предметной области в режиме реального времени, и метода решения задач принятия решений и обработки информации в пространстве состояний на основе автоматически сгенерированной базы знаний.

Метод автоматической генерации основан на модели миварной базы знаний с разбиением исходной задачи на подзадачи и формированием соответствующих подграфов миварной сети. Процесс генерации (рисунок 3) отвечает за перевод предметной области из начального состояния в целевое при заданных ограничениях и допустимых действиях. При изменении целей либо состава объектов управления выполняется повторная генерация базы знаний с учётом актуального состояния среды и обновлённой задачи.

Метод формализует подготовку исходных данных: системный анализ предметной области, построение обобщённого алгоритма решения и формализацию объектов управления. Масштабируемость обеспечивается использованием прототипов и шаблонов параметров и правил миварной сети: прототип фиксирует действие правила при задании входных/выходных множеств, шаблон допускает формирование кортежа правила в ходе генерации, включая случаи заранее неизвестного числа параметров. Генерация фрагментов миварной сети допускает применение специализированных программ и шаблонизаторов.

Для интеграции генератора в миварную проблемно-ориентированную систему разработана модель генератора в виде метаграфового агента (рисунок 4), порождающего и модифицирующего фрагменты метаграфа посредством разомкну-

тых и замкнутых метаграфовых правил. Агент задаётся вершиной метаграфа и включает вложенные метавершины правил, при этом стартовое правило выделяется атрибутом `start=true`. Входные и выходные параметры миварного правила отображаются атрибутом ребра метаграфа: `direction=IN` – вход, `direction=OUT` – выход.

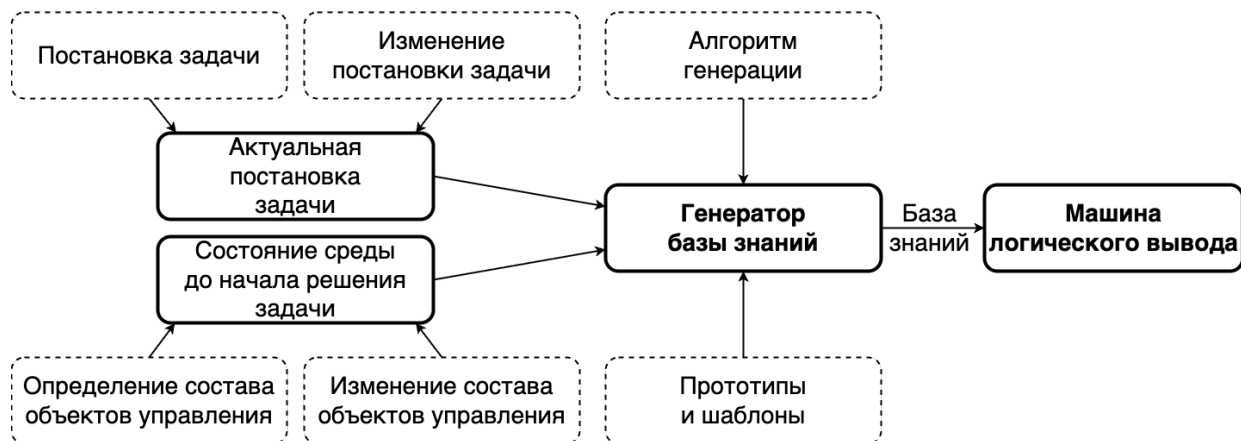


Рисунок 3 — Обобщённый процесс автоматической генерации миварной базы знаний для решения задач в пространстве состояний

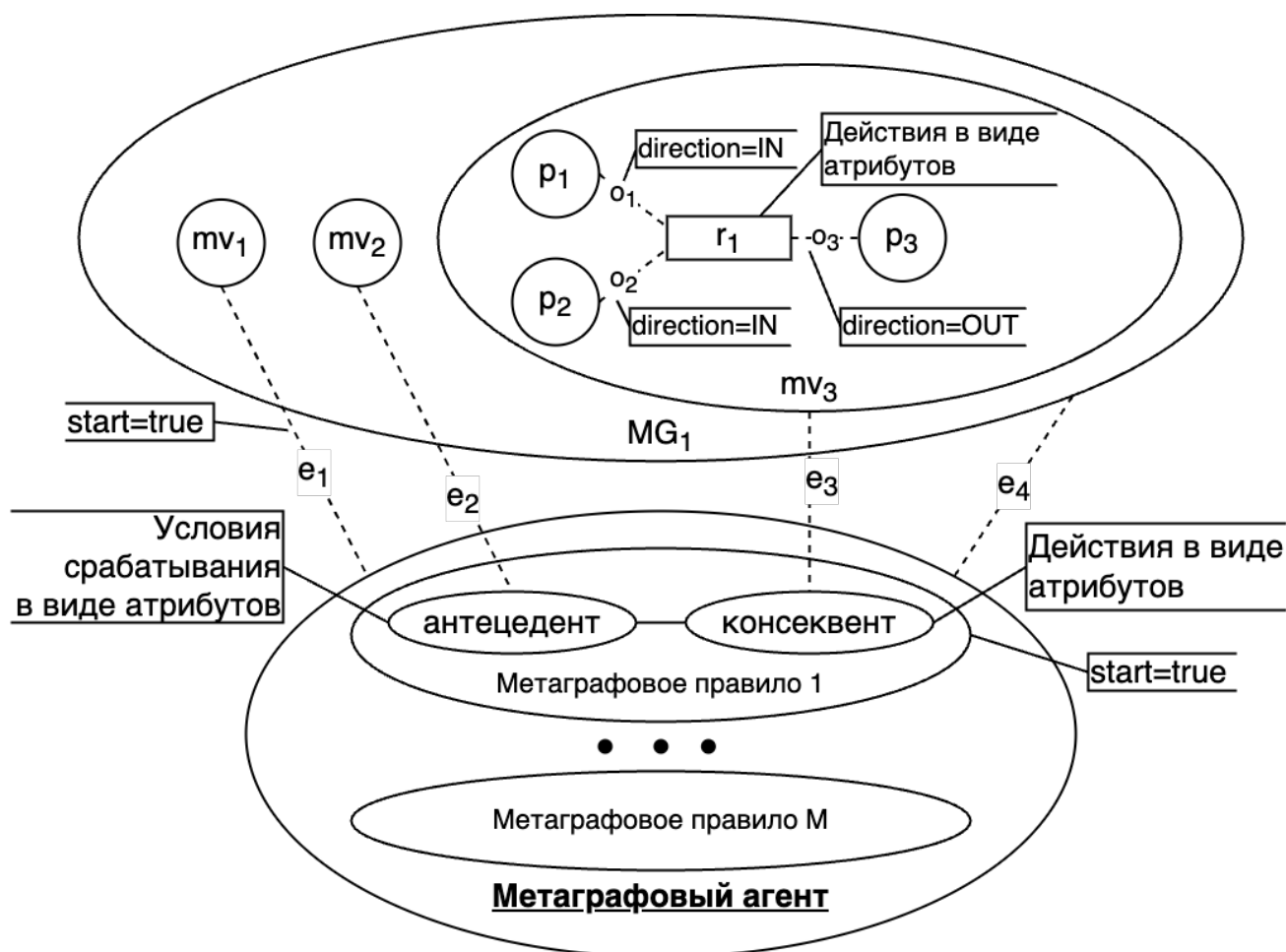


Рисунок 4 — Модель генератора миварных сетей для решения управленческих задач в пространстве состояний

Метод решения задач принятия решений и обработки информации в пространстве состояний реализует цикл «анализ состояния – формирование шага плана – исполнение – обратная связь», обеспечивает пошаговое формирование частных планов и повторное планирование с повторной генерацией миварной базы знаний при изменении цели, состояния или конфигурации среды.

Для реализации метода используется миварный планировщик (рисунок 5), формирующий запросы к машине логического вывода, интерпретирующий результаты вывода и вырабатывающий управляющие воздействия. Предусмотрены режимы поэтапной передачи частных планов на исполнение и предварительного построения полного плана с воспроизведением изменений состояния предметной области в рабочей памяти и агрегацией частичных планов.

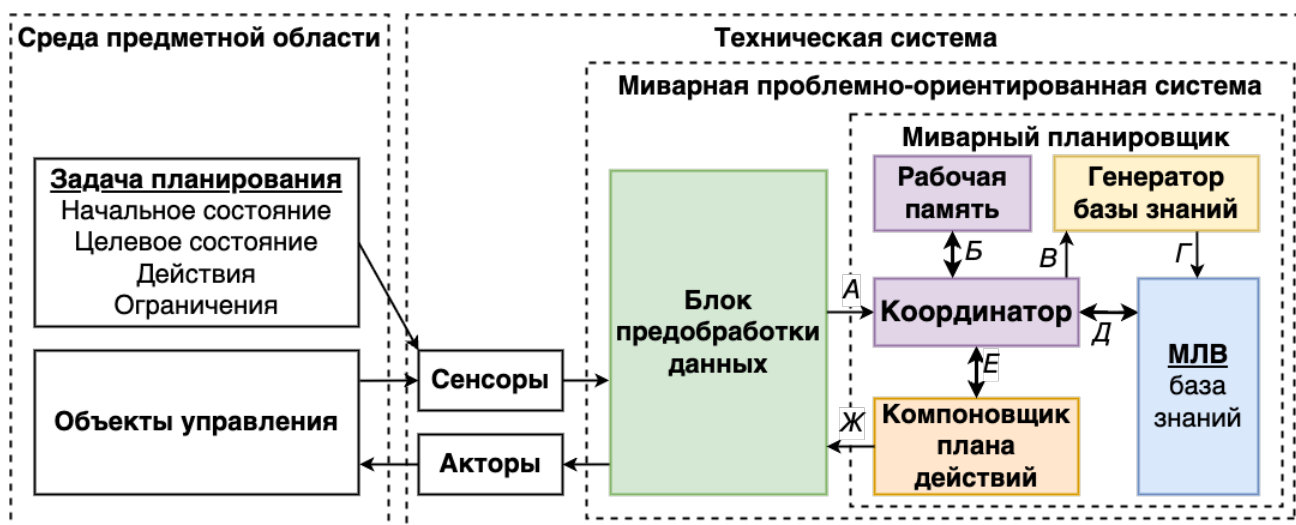


Рисунок 5 — Миварный планировщик в пространстве состояний в составе технической системы

Применимость методов показана на миварной системе планирования действий роботов и роботизированных средств (МИПРА) для модифицированного домена Blocks World – «Мир кубиков», где задача планирования состоит в переводе системы из начального состояния в целевое при формализованном описании конфигураций башен на площадках. Метод автоматической генерации миварной базы знаний масштабирует структуру знаний под заданное количество кубиков и башен, формируя параметры для описания объектов в пространстве и решения подзадач. Правила автоматически формируются по шаблонам, обеспечивающим декомпозицию решения по промежуточным целям. Метод планирования реализуется в пошаговом режиме, последовательно используя результаты функционирования машины логического вывода и обновления рабочей памяти для генерации и корректировки частных планов вплоть до достижения целевого состояния.

**Таким образом, разработанные методы автоматической генерации миварных баз знаний и решения задач принятия решений и обработки информации в пространстве состояний обеспечивают динамическую адаптацию структуры знаний и циклическую генерацию и корректировку планов в режиме реального времени.**

**В четвёртой главе** представлены результаты разработки программного обеспечения на основе предложенных моделей и методов интеллектуального планирования действий при принятии управленческих решений. Ключевым результатом является создание программной реализации миварной машины логического вывода, отвечающей требованиям автономной работы на бортовых вычислительных платформах роботов, поддержки параллельной обработки правил с задействованием всех доступных вычислительных потоков, а также возможности выборочного вычисления выходных параметров при их активации без обязательного расчёта всех параметров правила.

Обобщённый алгоритм обработки миварной сети разработанной машины логического вывода (рисунок 6) реализует прямой поиск от множества известных параметров задачи и осуществляет разделение процессов отбора правил, готовых к активации, и их параллельного выполнения. Матричное представление алгоритма определяет миварную сеть через матрицы, отражающие информацию о входных и выходных множествах правил, а процесс поиска формализуется операциями, обеспечивающими проверку готовности правил к активации и необходимости вычисления выходных параметров.

На основе разработанной машины логического вывода создана система МИПРА, предназначенная для решения задач в домене «Мир кубиков». Она реализует два режима функционирования: пошаговое формирование и немедленное исполнение частичных планов при работе в реальной среде, а также предварительное построение полного плана с последующей передачей на исполнение в виртуальной среде. Архитектура полностью соответствует модели миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний, обеспечивая взаимодействие с подсистемами предобработки сенсорных данных и управления исполнительными устройствами.

Универсальность и гибкость предложенных моделей и методов продемонстрирована разработкой комплекса программных систем для различных предметных областей. Логическая интеллектуальная система контроля за соблюдением правил дорожного движения формирует экспертные заключения о действиях водителя на основе базы знаний и текущей дорожной ситуации. Логическая интеллектуальная система обеспечения ухода за растениями осуществляет мониторинг и корректировку микроклимата в теплице с цикло-календарным планированием. Программный комплекс на основе информационно-аналитической системы обеспечивает контроль качества и оценку безопасности использования термолабильных компонентов крови. Все разработанные решения используют единую модель миварной базы знаний с декомпозицией по подзадачам, что обеспечивает масштабируемость и возможность расширения функциональности.

Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности реализации моделей и методов планирования действий проведена с помощью МИПРА на трёх тестовых стендах с различными аппаратными характеристиками. Результаты показали, что общее время решения задачи планирования на стенде в виде персонального компьютера (стенд № 1 рисунок 7) аппроксимируется кубической

зависимостью  $y = -2.4 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 3.06 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0.00271 \cdot x + 0.162$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.99746$ , что соответствует теоретической оценке вычислительной сложности  $KD = O(x^3)$ .

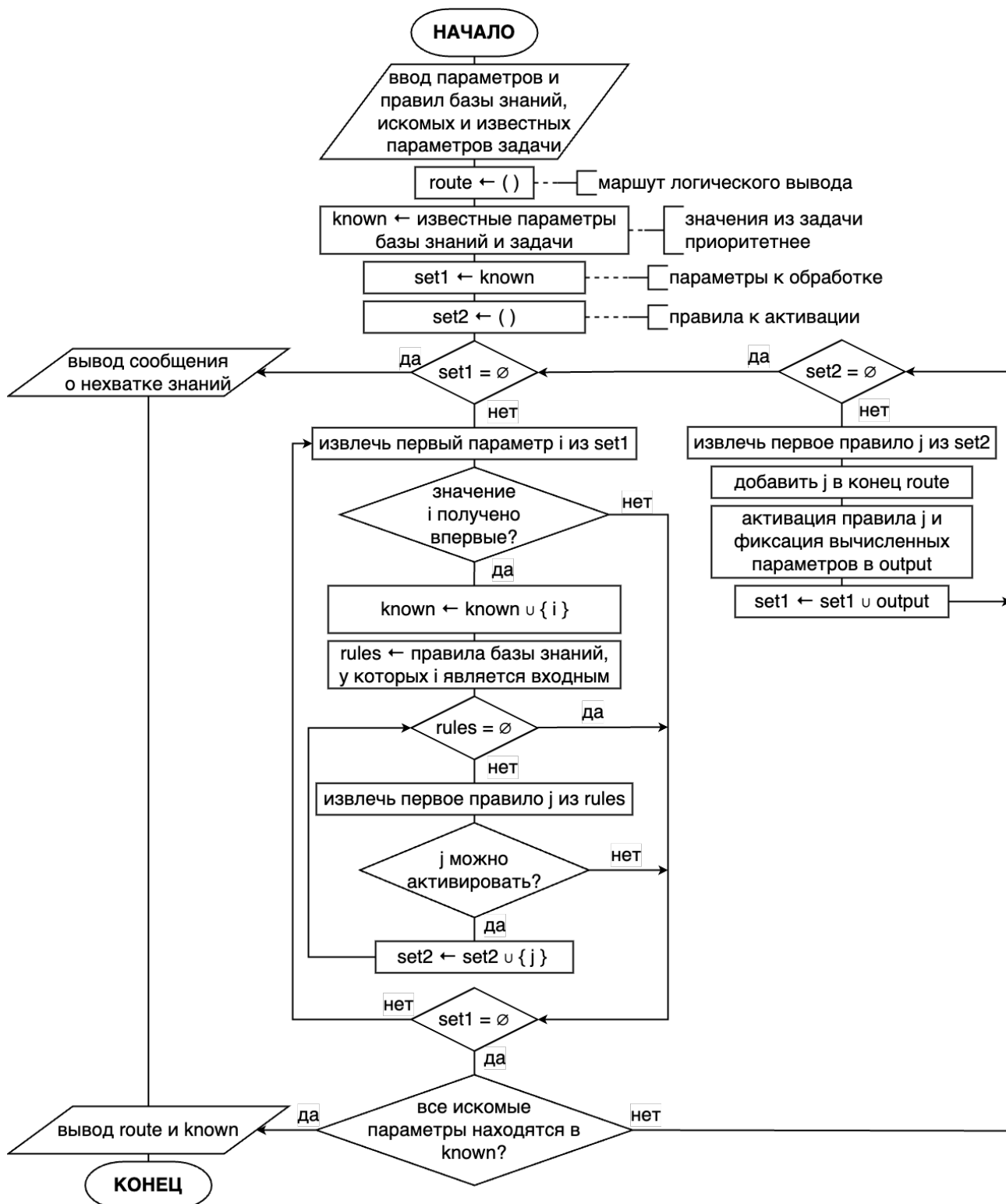


Рисунок 6 — Блок-схема обобщённого алгоритма обработки миварной сети машиной логического вывода программного комплекса “Balabza.Razumator”

Численные результаты эксперимента для персонального компьютера (стенд № 1 рисунок 7) продемонстрировали следующие средние значения времени ре-

шения задачи планирования: для 100 кубиков (400 правил) – 0.195 секунды, для 300 кубиков (1200 правил) – 2.038 секунды, для 600 кубиков (2400 правил) – 9.035 секунды, для 1000 кубиков (4000 правил) – 25.652 секунды. Сравнение производительности на различных аппаратных платформах показало сохранение типа зависимости времени решения от количества кубиков при изменении абсолютных значений согласно вычислительным возможностям платформы, включая эффективную работу на одноплатном микрокомпьютере.

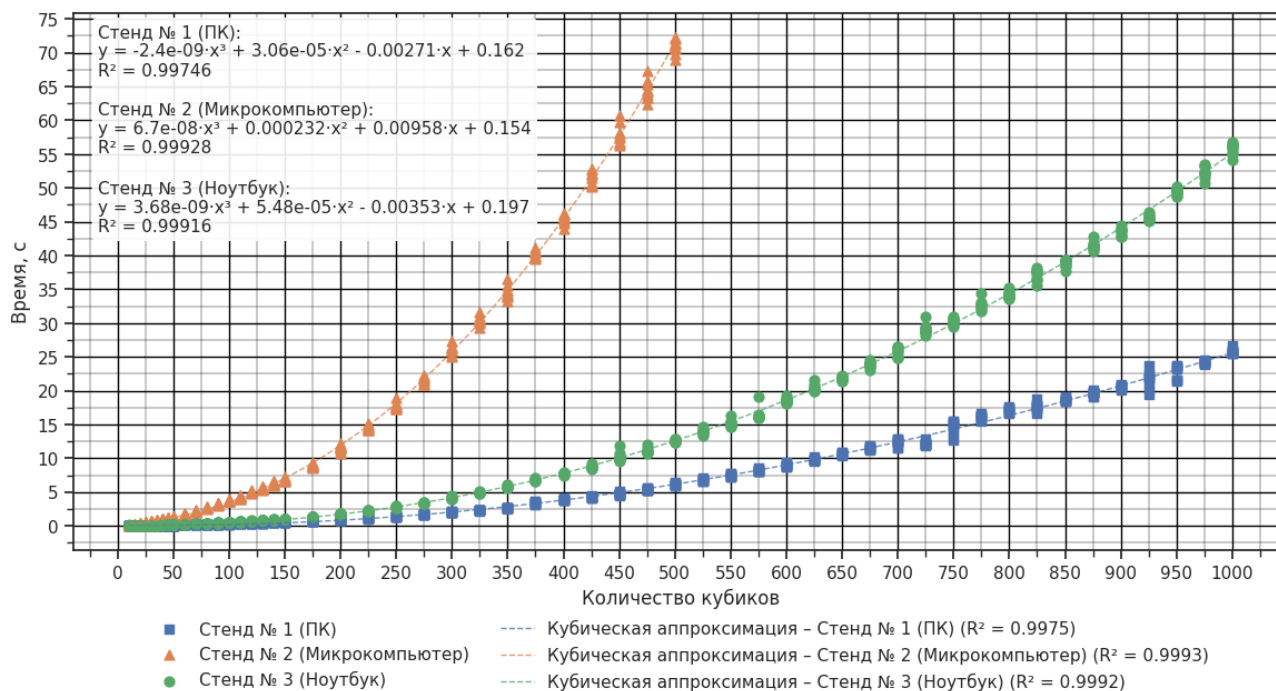


Рисунок 7 — Сравнение производительности на разных стендах (общее время решения задачи планирования)

Сопоставление результатов с характеристиками альтернативных планировщиков показало существенное превосходство МИПРА по скорости подготовки планов действий. Вычислительная сложность построения логического вывода для одного шага планирования составляет  $KD = O(x^2)$ , что при выполнении не более трёх шагов для достижения каждой промежуточной цели обеспечивает общую сложность функционирования машины логического вывода на уровне  $KD = O(x^3)$ .

Для демонстрации зависимости производительности МИПРА от числа доступных вычислительных потоков на персональном компьютере (стенд № 1 рисунок 8) получены метрики общего времени решения задачи планирования для задач с числом кубиков не более 400. При увеличении числа доступных вычислительных потоков с 1 до 12 для задач с 400 кубиками и 60 площадками общее время решения сократилось с 4.1286 секунд до 3.2522 секунд, что соответствует ускорению в 1.27 раза. Экспериментальная проверка показала, что разработанная машина логического вывода эффективно использует доступные вычислительные потоки и обеспечивает сокращение времени решения задач планирования при увеличении их количества.

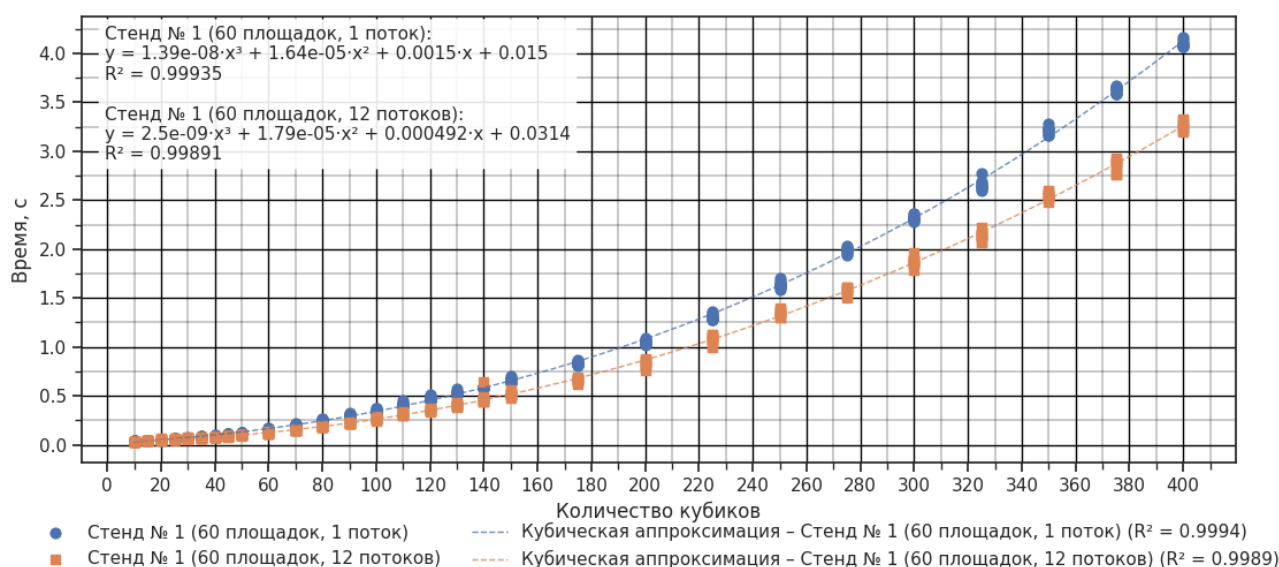


Рисунок 8 — Сравнение производительности при различном количестве доступных вычислительных потоков на стенде № 1 при решении задач с 60 площадками (общее время решения задачи планирования)

**Таким образом, разработанный комплекс программных средств на основе предложенных моделей и методов интеллектуального планирования действий в пространстве состояний обеспечивает эффективное принятие управленческих решений в различных предметных областях и функционирование на широком спектре аппаратных платформ от одноплатных микрокомпьютеров до высокопроизводительных рабочих станций.**

## Заключение

В ходе проведенного исследования были достигнуты поставленные цели и решены все задачи диссертационной работы. Получены следующие основные результаты:

1. Разработана модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний, обеспечивающая структурную декомпозицию знаний по множествам параметров и правил, а также возможность автоматической генерации, масштабирования и параллельной обработки логического вывода.

2. Разработана модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний, позволяющая представлять систему в виде сложного графа взаимосвязанных элементов и формализовать интерфейсы взаимодействия с внешними информационными системами в рамках гибридных интеллектуальных информационных систем.

3. Предложен метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний, основанный на использовании заранее подготовленных прототипов и шаблонов параметров и правил. Метод обеспечивает динамическое масштабирование базы знаний при изменении количества объектов управления и состояния предметной области без участия

когнитолога или эксперта в режиме реального времени.

4. Разработан метод решения задач принятия решений и обработки информации для планирования действий в пространстве состояний, реализующий итеративный цикл «анализ состояния – формирование шага плана – исполнение – обратная связь», обеспечивающий автоматическую генерацию частных планов действий и их адаптацию к текущему состоянию и целям, включая повторное планирование при изменениях среды.

5. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, реализующее параллельную обработку логических правил в миварной машине логического вывода, что обеспечивает снижение вычислительной сложности и ускорение построения планов действий в интеллектуальных системах управления.

6. Создана и реализована программная миварная машина логического вывода для задач интеллектуального планирования действий при принятии управленческих решений, обеспечивающая автономную работу на бортовых вычислительных платформах, использование доступных вычислительных потоков и выборочное вычисление выходных параметров при активации правил.

7. Работоспособность разработанного математического и алгоритмического обеспечения подтверждена вычислительными экспериментами на миварной системе планирования действий роботов и роботизированных средств: показаны высокая скорость решения задач, масштабируемость и переносимость на различные аппаратные платформы, а сравнение с альтернативными планировщиками выявило преимущество по скорости подготовки планов и снижению вычислительной сложности.

## **Основные публикации по теме диссертации**

### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Аладин, Д. В. Модель миварной базы знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний / Д. В. Аладин // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 66–71.

2. Аладин, Д. В. Модель миварной проблемно-ориентированной системы управления и принятия решений в пространстве состояний / Д. В. Аладин. – Текст : электронный // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. – 2025. – Т. 13, № 4. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=2083>. – Дата публикации: 20.10.2025.

3. Аладин, Д. В. Метод автоматической генерации миварных баз знаний для решения управленческих задач в пространстве состояний / Д. В. Аладин // *Проблемы искусственного интеллекта*. – 2025. – № 3(38). – С. 88–99.

4. Варламов, О. О. О создании миварных систем контроля за соблюдением правил дорожного движения на основе “Разуматоров” и экспертных систем / О. О. Варламов, Д. В. Аладин // *Радиопромышленность*. – 2018. – № 2. – С. 25–35.

5. Варламов, О. О. О применении миварных сетей для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний / О. О. Варламов, Д. В. Аладин // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – № 6-2(86). – С. 75–82.

6. Варламов, О. О. Успешное применение миварных экспертных систем для MIPRA - решения задач планирования действий робототехнических комплексов в реальном времени / О. О. Варламов, Д. В. Аладин // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 15–25.

7. Программный комплекс с поддержкой принятия решений о безопасности применения термолабильных компонентов крови / О. О. Варламов, Д. А. Чувилов, В. Н. Лемонджава, А. Г. Гудков, Д. В. Аладин, Л. Е. Адамова, В. Г. Осипов, А. В. Четкин, В. Ю. Леушин, А. Д. Касьянов, Н. А. Ветрова // Медицинская техника. – 2021. – № 5(329). – С. 40–43.

### **Публикации в изданиях, индексируемых в базах «Scopus» и «Web of Science»**

8. Varlamov, O. A New Generation of Rules-based Approach: Mivar-based Intelligent Planning of Robot Actions (MIPRA) and Brains for Autonomous Robots / O. Varlamov, D. Aladin // Machine Intelligence Research. – 2024. – Vol. 21, No. 5. – P. 919–940.

9. Logical artificial intelligence Mivar technologies for autonomous road vehicles / O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, D. V. Aladin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 534. – P. 012015.

10. Logic-based artificial intelligence in systems for monitoring the enforcing traffic regulations / D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 534. – P. 012025.

11. Control of vehicles and robots: Creation of planning systems in the state space (MIPRA) / D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Fedoseev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747. – P. 012097.

12. Control of machines and robots: Creation of mivar decision-making systems for controlling autonomous tractors and special vehicles of the ministry of emergencies / D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747. – P. 012098.

13. Control of vehicles and robots: Creating of knowledge bases for mivar decision making systems robots and vehicles / D. V. Aladin, O. O. Varlamov, L. E. Adamova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 747. – P. 012099.

14. Creation of autonomous groups of combine harvesters and tractors for agriculture based on the Mivar decision-making systems “ROBO!RAZUM” / O. O. Varlamov, D. V. Aladin, L. E. Adamova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 819. – P. 012002.

15. About the project developing “MIPRA” – the intelligent planner in the state space for vehicles, tractors, and robots based on the architectural solutions of the Mivar

systems for traffic enforcement / D. V. Aladin, O. O. Varlamov, D. A. Fedoseev [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 819. – P. 012006.

16. A new method for creating Mivar knowledge bases in tabular-matrix form for ground intelligent vehicle control systems / D. A. Chuvikov, D. V. Aladin, L. E. Adamova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2061. – P. 012123.

17. Creating a “Logical intelligent plant care system” in digital agriculture based on Mivar approach / D. V. Aladin, E. V. Aladina, D. A. Chuvikov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 9541. – P. 012004.

18. A Software Package Supporting Decision Making on the Safety of Thermolabile Blood Components / O. O. Varlamov, D. A. Chuvikov, V. N. Lemondzhava, A. G. Gudkov, D. V. Aladin, L. E. Adamova, V. G. Osipov, A. V. Chechetkin, V. Yu. Leushin, A. D. Kasyanov, N. A. Vetrova // Biomedical Engineering. – 2022. – Vol. 55, No. 5. – P. 355–359.

19. Aladin, D. V. On Approaches to Creating the Logical Inference Machines for Ensuring Compatibility and Integration of Systems and Controls / D. V. Aladin, A. K. Bilalov, L. I. Ilinov // 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – [б. м.] : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025.

### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618424 Российская Федерация. Система верификации миварных моделей : № 2020617729 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 28.07.2020 / Д. В. Аладин.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610851 Российская Федерация. Серверная часть программного комплекса на основе информационно-аналитической системы с поддержкой принятия решений об эффективности и безопасности применения термолабильных компонентов крови в медицинской практике : № 2021669016 : заявл. 24.11.2021 : опубл. 17.01.2022 / Д. В. Аладин, Д. А. Чувииков, А. А. Кононенко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью “Научно-производственная инновационная фирма “ГИПЕРИОН”.

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680245 Российская Федерация. Клиентская часть программного комплекса на основе информационно-аналитической системы с поддержкой принятия решений об эффективности и безопасности применения термолабильных компонентов крови в медицинской практике : № 2021668891 : заявл. 24.11.2021 : опубл. 08.12.2021 / Д. В. Аладин, Д. А. Чувииков, А. А. Кононенко [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью “Научно-производственная инновационная фирма “ГИПЕРИОН”.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684948 Российская Федерация. ЛИСА МЛВ : № 2023683700 : заявл.

09.11.2023 : опубл. 21.11.2023 / Д. В. Аладин, А. М. Балашов, Ю. Е. Гапанюк [и др.].

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616642 Российская Федерация. ЛИСА Редактор : заявл. 01.03.2025 : опубл. 18.03.2025 / Д. В. Аладин, Е. В. Аладина, А. К. Билалов [и др.].

### **Монография**

25. Миварные системы принятия решений роботов. РобоРазум : монография / О. О. Варламов, А. А. Коценко, Д. В. Аладин [и др.]. – Москва : ИНФРА-М, 2024. – 549 с.

Подписано в печать: 18.03.2026  
Заказ № 21608. Тираж 100 экз.  
Бумага офсетная. Формат 60х90/16.  
Типография «Автореферат.ру»  
ОГРНИП 320774600073831

119313, Москва, ул. Марии Ульяновой, д.3, к.1  
+7 (977) 518-13-77, +7 (499) 788-78-56  
[www.avtoreferat.ru](http://www.avtoreferat.ru), e-mail: [riso@mail.ru](mailto:riso@mail.ru)