

*На правах рукописи*

Шестаков Евгений Игоревич

**Алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы  
управления модульными роботами**

Специальность 05.13.11 – Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2021

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева Российской академии наук» (ИТМиВТ).

Научный руководитель: **Жданов Александр Аркадьевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник АО «Институт точной  
механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева  
Российской академии наук»

Официальные оппоненты: **Абросимов Вячеслав Константинович**  
доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник Главного научно-  
исследовательского испытательного межвидового  
Центра перспективных вооружений Минобороны  
России.

**Устюжанин Андрей Евгеньевич**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Заведующий научно-учебной лабораторией методов  
анализа больших данных Национального  
исследовательского университета  
«Высшая Школа Экономики»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится «25» мая 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.087.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук по адресу: 109004, г. Москва, ул. Александра Солженицына, д. 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт системного программирования им. В.П. Иванникова Российской академии наук.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.087.01,  
Кандидат физико-математических наук

**Зеленов С.В.**

# **I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Актуальность темы работы**

В настоящее время наблюдается активная интеллектуализация программно-алгоритмических комплексов на основе различных методов, например таких, как нечеткая логика, нейронные сети, эволюционные алгоритмы, обучение с подкреплением и других. Одним из актуальных направлений развития систем искусственного интеллекта является разработка адаптивных систем управления. Данная диссертационная работа посвящена проблемам алгоритмического и программного обеспечения адаптивной системы управления модульными роботами. Модульный робот представляет собой единую многозвенную конструкцию, состоящую из однотипных механизмов (модулей). В настоящее время модульные роботы находят все более широкое применение в различных сферах человеческой деятельности, поскольку модульность конструкции и аппаратных средств обуславливает ряд преимуществ модульных роботов по сравнению с традиционными робототехническими системами.

Современные тенденции в робототехнике включают в себя активное применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Вместе с тем, как показывает анализ публикаций, алгоритмы управления модульными роботами не предусматривают автоматической адаптивности робота к изменению свойств окружающей среды, самого робота или выполняемой им работы. В основном широко используется детерминированное управление, при котором желаемое качество управления часто не достигается по ряду причин, связанных с отсутствием адаптивных свойств у систем управления. Во-первых, модульные роботы обладают большим количеством степеней свободы, что, в свою очередь, делает весьма затруднительным, а в ряде случаев и невозможным, нахождение точных аналитических решений по

управлению. Во-вторых, свойства и окружающей среды, и работа, и выполняемых им заданий могут меняться незапланированным образом. К таким факторам можно отнести, например, изменение среды, в которой действует робот, или выход из строя отдельных модулей. В связи с этим актуальной задачей является разработка способа построения программного обеспечения, алгоритмов и методов адаптивного управления применительно к модульным роботам.

**Степень разработанности проблемы.** Диссертационное исследование опирается на работы отечественной научной школы в области искусственного интеллекта и адаптивного управления, к которой относятся Д.А. Поспелов, М.Л. Цетлин, В.И. Варшавский, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Я.З. Цыпкин, А.А. Жданов и ряд других, а также на основные достижения в области управления модульными роботами, представленными в работах следующих авторов: Марк Йим (M. Yim), Шигео Хироэ (S. Hirose), К. Стой (K. Støy), В-М. Шен (W.-M. Shen), П. Уилл (P. Will), Войцех Вонашек (V. Vonásek), Е. Йошида (Eiichi Yoshida), Сатоши Мурата (Satoshi Murata), Хуан Гонсалес-Гомес и ряда других. В нашей стране достижения в этой области принадлежат С.В. Манько, М.В. Кадочникову, А.Л. Ронжину, Ю.В. Подураеву, А.А. Иванову, О.А. Шмакову, Д.А. Демидову и др.

**Объектом диссертационного исследования** является система управления многозвенными объектами.

**Предметом исследования** являются алгоритмы и программное обеспечение адаптивного управления модульными роботами.

**Цель исследования** состоит в разработке способа построения программного обеспечения для интеллектуальных адаптивных систем управления модульными роботами.

### **Задачи исследования:**

- Разработка способа построения, модели и алгоритмов адаптивной системы управления модульными роботами.
- Разработка способа построения программных средств моделирования модульных роботов.
- Разработка способа программного взаимодействия средств программного моделирования и макетного образца модульного робота.
- Разработка программного обеспечения для моделирования модульных роботов и экспериментальная проверка алгоритмов адаптивного управления модульными роботами.

**Методы исследования.** В работе использовались методы линейной алгебры, теории управления, метод Автономного Адаптивного Управления, методы компьютерного и аппаратного моделирования, а также элементы теории графов.

**Теоретическая значимость.** Разработаны способ построения адаптивной системы управления модульными роботами, способ построения программных средств моделирования модульных роботов, предложены и экспериментально проверены алгоритмы адаптивного управления, предложен способ описания модульных конфигураций и алгоритмы построения программных моделей, которые могут быть использованы для развития теории управления многозвенными объектами.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в том, что предложенный способ построения системы управления и разработанные адаптивные алгоритмы можно применять при разработке опытных и серийных образцов многозвенных роботов различного типа и назначения. В работе приведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов, демонстрирующие адаптивность и самообучаемость модульных роботов. Разработанное программное

обеспечение для моделирования модульных роботов можно применять в учебных и научно-исследовательских целях.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в получении следующих оригинальных результатов:

- разработан способ построения адаптивной системы управления модульными роботами;
- разработан способ построения программных средств моделирования модульных роботов;
- предложен способ описания конфигураций модульных роботов и алгоритм автоматического построения программных моделей по файлу описания;
- разработано и экспериментально проверено алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы управления модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа».

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Способ построения адаптивной системы управления модульными роботами.
2. Способ построения программного обеспечения для моделирования модульных роботов.
3. Алгоритмы адаптивного управления модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа».
4. Способ описания конфигураций модульных роботов и алгоритм автоматического построения 3-мерной модели роботов по файлу описания.

**Личный вклад.** Все представленные в работе результаты получены лично автором, а именно: предложены способ построения, модель и алгоритмы адаптивной системы управления модульными роботами на основе метода Автономного Адаптивного Управления, способ

построения программного обеспечения для моделирования модульных роботов. На основе предложенного способа разработано программное обеспечение, включая программную реализацию адаптивного управления модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа», проведены экспериментальные исследования предложенных подходов.

**Публикации.** Основные результаты исследования отражены в 10 печатных работах, включая рецензируемые журналы, входящие в базу Scopus [1,2] и список ВАК [3], а также в одном свидетельстве о регистрации программы для ЭВМ [11].

В работе [3] автором предложена структура программных средств моделирования, проведен обзор существующих средств моделирования, разработаны способ описания модульных конфигураций, алгоритм построения программных моделей, макетный образец модульного робота и программные средства взаимодействия макетного образца с программным комплексом моделирования. В статьях [4,5] автором предложены способы и алгоритмы адаптивного управления модульным манипулятором и описаны результаты проведенных автором экспериментальных исследований. В работах [1,6,9] автором изложены алгоритмы самообучения шагающего модульного робота и результаты проведенных экспериментальных исследований. В публикации [2] автором проведен обзор современных архитектур систем управления модульными роботами. В [8] автором рассмотрены возможности применения вероятностных автоматов для реализации механизмов самообучения. В [9] автором проведен обзор возможностей теории конечных автоматов в задачах управления роботами.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационного исследования докладывались в рамках следующих мероприятий:

- XXII Международная научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2020" (г. Москва, Россия, 12-16 октября 2020 г.)
- Нейронаука для медицины и психологии: XVI Международный междисциплинарный конгресс (Судак, Крым, Россия; 6–16 октября 2020 г.)
- Третья Международная Конференция по интерактивной коллаборативной робототехнике [ICR-2019] (г. Лейпциг, Германия, 18-22 сентября 2018)
- 10-ая Всероссийская Мультиконференция по проблемам управления [МКПУ-2017] (с. Дивноморское, г. Геленджик, Россия, 25–30 сентября 2017)
- XXIV международная научно-техническая конференция "Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации" (г. Алушта, Россия, 14–20 сентября 2015)

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и списка сокращений. Полный объем диссертации составляет 118 страниц, включая 47 рисунков, 16 таблиц, 22 формулы. Список литературы содержит 122 наименования.

## **II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** раскрыты актуальность, сформулированы предмет, объект, цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, положения, выносимые на защиту, а также теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой** главе «Актуальные проблемы алгоритмического и программного обеспечения модульных роботов» диссертационной работы приведен обзор применяемых сегодня основных алгоритмов управления модульными роботами, а именно: управляющие таблицы (Gait control



tables), центральный генератор упорядоченной активности (Central Pattern Generator), гармонический осциллятор, фазовый автомат. Показано, что данные алгоритмы не могут дообучаться или переобучаться непосредственно в процессе управления, поэтому они не имеют возможности «на ходу» приспособливаться к изменениям свойств среды или робота и в результате принципиально не могут обеспечить высокого качества управления модульными роботами в тех типичных случаях, когда а) математически формализованный закон управления построить трудно или невозможно, либо б) свойства объекта управления, окружающей среды или миссии модульного робота изменяются в процессе его функционирования мало предсказуемым способом.

Также были рассмотрены методы и алгоритмы искусственного интеллекта и самообучения, включая эволюционные алгоритмы, искусственные нейронные сети, метод адаптации Я.З. Цыпкина, самообучающиеся конечные автоматы и метод Автономного Адаптивного Управления (ААУ) А.А. Жданова. Последний представляет наибольший интерес, поскольку позволяет повысить функциональные возможности модульных роботов, а именно, возможности адаптации и самообучения непосредственно в процессе функционирования. Применение метода ААУ неразрывно связано с разработкой специализированного программного обеспечения для моделирования модульных роботов и управления ими.

Кроме того, были рассмотрены средства программного моделирования модульных роботов. Обобщение итогов проведенного аналитического обзора позволяет сделать следующие основные выводы:

- использование робототехнических симуляторов общего назначения для моделирования модульных роботов предполагает необходимость разработки дополнительных программных компонентов, в частности нацеленных на адаптивность управления;

- специальные средства моделирования, как правило, создавались для проведения тех исследований, которыми занималась конкретная научная

группа. В частности, они ориентированы на конкретную конструкцию типового модуля и на алгоритмы управления.

- исследования в области адаптивного управления модульными роботами требуют разработки нового способа построения программного обеспечения, с учетом дальнейших перспектив исследований как в области адаптивного управления, так и в области модульной робототехники. Это подразумевает, во-первых, выработку архитектуры системы управления, во-вторых – организацию взаимодействия моделирующего комплекса непосредственно с физическим образцом модульного робота, в-третьих – применение метода ААУ для управления модульными роботами.

**Вторая глава** «Адаптивная система управления модульными роботами» посвящена способу построения, моделям и алгоритмам адаптивной системы управления модульными роботами.

Принимая во внимание функциональные возможности модульных роботов, в диссертационном исследовании выбрана классическая иерархическая система управления, состоящая из 3-х уровней:

1. Уровень планирования поведения
2. Уровень построения траекторий движения
3. Приводной уровень

Смысл иерархической системы заключается в функциональном разделении задач между уровнями иерархии.

Ключевым отличием предлагаемой системы управления является введение механизма адаптации на основе метода ААУ на уровне построения траекторий движения. Таким образом, структуру адаптивной системы управления модульными роботами можно представить в виде следующей схемы (рис. 1). Также предложен способ построения адаптивной системы управления модульными роботами, основными положениями которого являются следующие:

1. Адаптивная система управления должна строиться иерархически (для функционального разделения задач между уровнями иерархии) и

содержать 3 уровня – уровень планирования поведения, уровень построения траекторий движения, приводной уровень.

2. Верхние 2 уровня (уровень планирования поведения и уровень построения траекторий движения) должны располагаться на борту одного из мехатронных модулей.
3. Адаптивность системы управления должна обеспечиваться за счет использования метода ААУ.
4. На каждом из типовых модулей стоит одно и то же программное обеспечение.
5. Система управления должна включать в свой состав средства программного моделирования для проведения обучения или переобучения без участия реального физического робота.

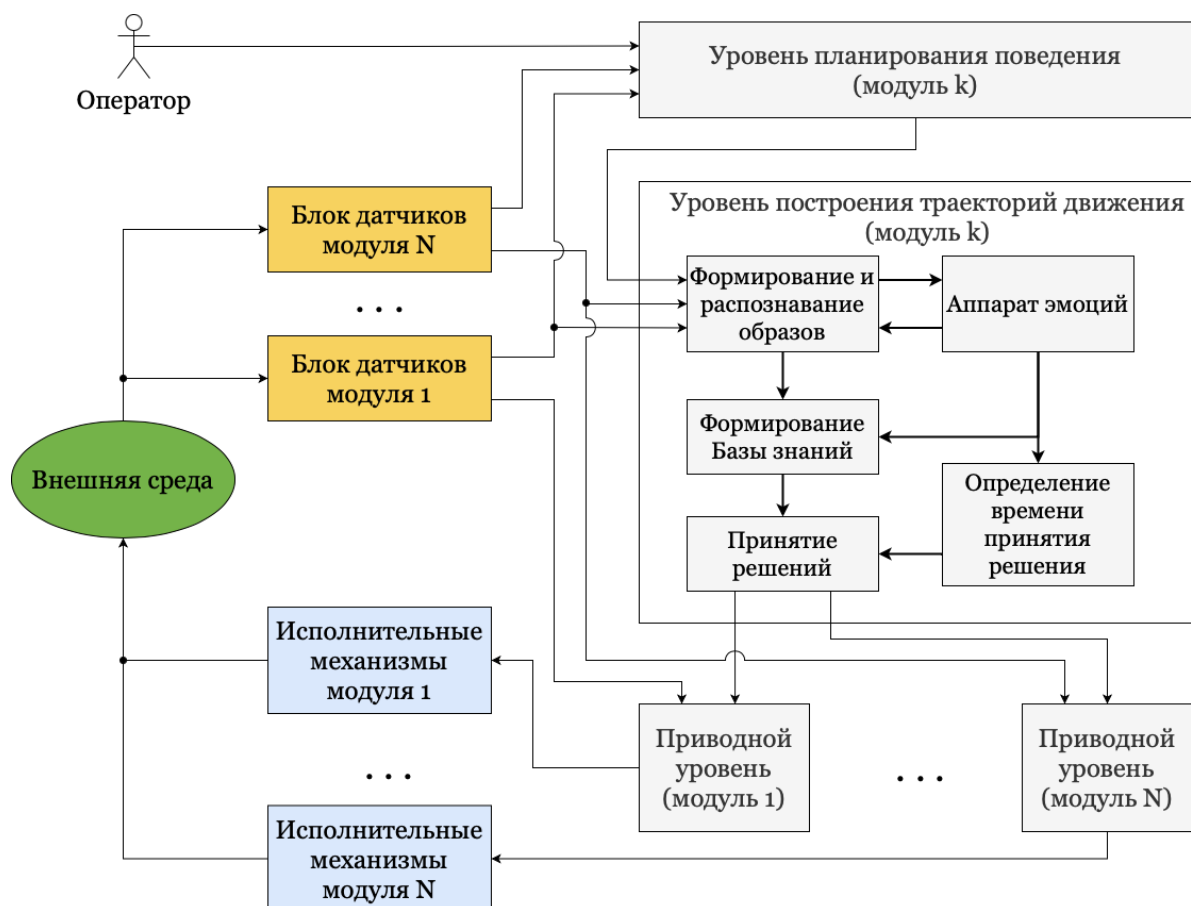


Рис. 1. Структура адаптивной системы управления модульными роботами.

Далее во второй главе предложена математическая модель, упрощенно описывающая функционирование системы, построенной по методу ААУ. Модель, названная «Самообучающийся Динамический Конечный Автомат», опирается на теорию конечных автоматов и расширяет её.

СДКА описывается кортежем:

$$(S, A, D, F, \psi, E, s_0, f, d) \quad (1)$$

где  $S$  – конечное пополняемое множество состояний;

$A$  – совмещенное конечное множество входных и выходных символов (множество действий);

$D$  – динамическая функция выходов;

$F$  – функция формирования новых состояний;

$\psi$  – функция переходов;

$E$  – функция качественной оценки состояний

$f$  – коэффициент самообучения,

$d$  – коэффициент глубины поиска решения

$s_0$  – начальное состояние автомата  $s_0 \in S$ .

В таблице 1 показано как предложенная математическая модель соотносится с блоками системы ААУ.

Кроме того, во второй главе описаны разработанные алгоритмы уровня построения траекторий движения адаптивной системы управления. На этом уровне адаптивно формируется закон изменения обобщенных координат для достижения целевой точки для модульных роботов в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа».

Задачу по нахождению закона изменения обобщенных координат для достижения целевой точки можно формализовать следующим образом.

Параметр	Описание в терминах СДКА	Описание в терминах метод ААУ
$S$	Конечное пополняемое множество состояний	Память распознанных образов
$A$	Совмещенное конечное множество входных и выходных символов (множество действий)	Множество возможных действий, которые может совершить система
$D$	Динамическая функция выходов	Блок принятия решений о действии
$E$	Функция качественной оценки состояний	Аппарат эмоций
$\psi$	Функция переходов	Блок формирования новых знаний
$F$	Функция формирования новых состояний	Блок формирования новых образов
$f$	Коэффициент самообучения	Коэффициент заполненности столбца Базы Знаний
$d$	Коэффициент глубины поиска решения	Коэффициент глубины поиска решения

Конфигурация  $C = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  модульного манипуляционного робота задана множеством обобщенных координат, однозначно определяющих его положение в пространстве. Цель задана координатами в трехмерном пространстве  $(x_u, y_u, z_u)$ , относительно локальной системы координат модульного робота. Необходимо найти такую последовательность конфигураций модульного робота  $\{C_0, \dots, C_k\}$ , что:

$$\sqrt{(x_k - x_u)^2 + (y_k - y_u)^2 + (z_k - z_u)^2} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $(x_k, y_k, z_k)$  – координаты конца кинематической цепи, определяемой конфигурацией  $C_k$ .

В диссертационной работе предложено два способа решения данной задачи, каждый из которых основан на методе ААУ. Блок датчиков должен содержать сенсоры углового положения каждого из модулей робота, датчики, позволяющие оценить окружающую обстановку (расстояния до препятствий и целевой точки, их координаты относительно локальной системы координат робота). Основные параметры, необходимые для применения метода ААУ предложенными двумя способами, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры, необходимые для применения метода ААУ.

Параметр	1-й способ	2-й способ
Образы системы формирования и распознавания образов	$C = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$	положение схвата робота относительно целевой точки, которое может описываться комбинацией понятий «левее»/«правее» и «выше»/«ниже»
Качественная оценка образов <sup>1</sup>	$E = \begin{cases} \varepsilon/d, & d \geq \varepsilon \\ 1, & d < \varepsilon \end{cases}$ <p>где <math>d</math> - расстояние от конца кинематической цепи до целевой точки;  <math>\varepsilon</math> – радиус <math>\varepsilon</math>-окрестности, определяющий требуемую точность решения.</p>	$E = \begin{cases} 0, & r_T - r_{\Pi} \geq 0 \\ 1, & r_T - r_{\Pi} < 0 \end{cases}$ <p>где <math>r_T</math> – значение рассогласования между концом кинематической цепи и целевой точкой на текущем шаге;  <math>r_{\Pi}</math> - значение рассогласования между концом кинематической цепи и целевой точкой на предыдущем шаге.</p>
Типовые действия		$q_i \rightarrow \begin{cases} q_i + \Delta \\ q_i - \Delta \\ q_i \end{cases}$

В третьей главе «Средства моделирования модульных роботов и их программное взаимодействие с макетным образцом модульного робота» предложен новый способ структурной организации программного комплекса для моделирования модульных роботов (рис. 2).

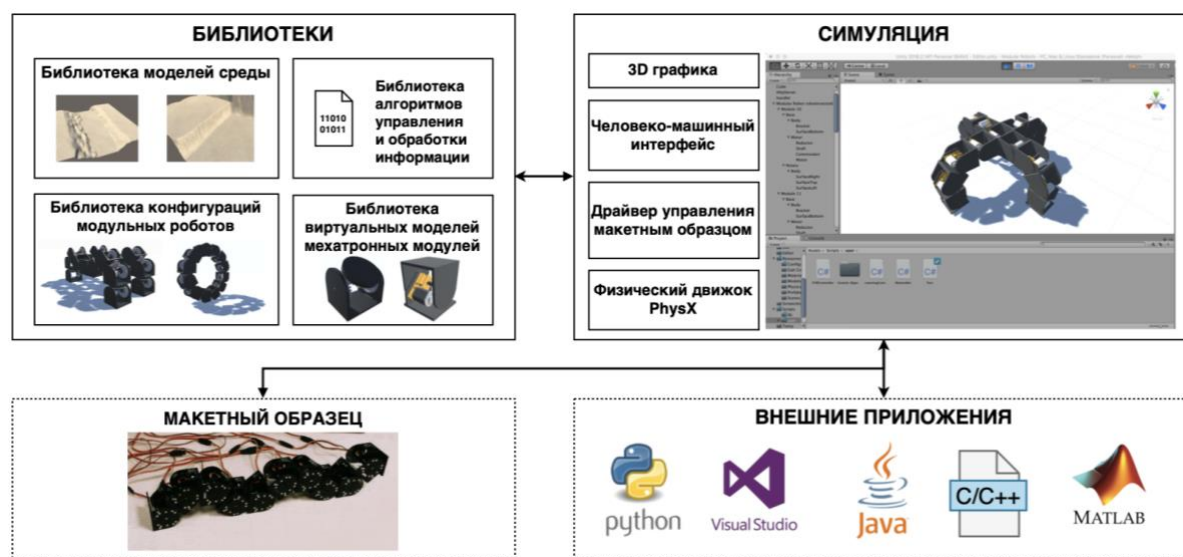


Рис. 2. Обобщенная структура разработанного программного комплекса для моделирования модульных роботов.

<sup>1</sup> Качественная оценка является многокритериальной. Также учитываются ситуации, при которых модули сталкиваются друг с другом. В этом случае оценка считается минимальной.

Программный комплекс представляет собой систему классов, взаимосвязь которых представлена на рис. 3.

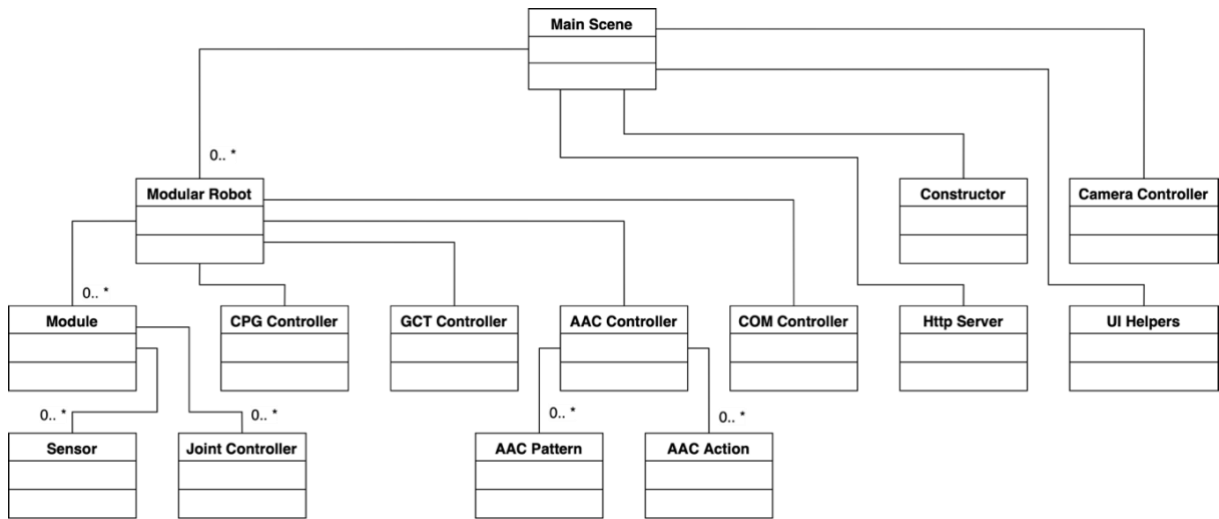


Рис. 3 UML-диаграмма классов программного комплекса.

- Класс *Modular Robot* представляет собой описание МР и реализует механизмы для управления им.
- Класс *Module* описывает отдельный мехатронный модуль МР. Класс *Modular Robot* содержит в себе список объектов *Module*.
- Класс *Joint Controller* описывает вращательное звено мехатронного модуля. В зависимости от конкретного типа мехатронного модуля, объектов типа *Joint Controller* может быть несколько в классе *Module*.
- Класс *Sensor* описывает датчик мехатронного модуля.
- Класс *GCT Controller* реализует управление МР на основе управляющих таблиц (Gait Control Tables, сокращенно GCT).
- Класс *CPG Controller* реализует управление МР на основе ЦГУА (Central Pattern Generator, сокращенно CPG).
- Класс *AAC Controller* реализует управление на основе метода ААУ (Autonomous Adaptive Control, сокращенно AAC).
- Класс *AAC Pattern* описывает образ системы ААУ. Класс *AAC Controller* содержит список объектов *AAC Pattern*.
- Класс *AAC Action* описывает действие системы ААУ. Класс *AAC Controller* содержит список объектов *AAC Action*.
- Класс *Http Server* содержит реализацию HTTP Сервера для взаимодействия программного комплекса с внешними приложениями.

- Класс *COM Controller* содержит реализацию драйвера для управления макетным образцом МР через виртуальный СОМ порт. (Макетный образец подключается через USB или Bluetooth).
- Класс *Constructor* реализует механизм построение программной модели в режиме «визуального конструктора».
- Класс *Camera Controller* реализует управление виртуальной камерой в программном комплексе.
- Класс *UI Helpers* содержит дополнительные утилиты, упрощающие работу с пользовательским интерфейсом (User Interface, сокращенно UI) (текстовые поля, кнопки, поля ввода и пр.).
- Класс *Main Scene* реализует интерфейс программы.

В рамках диссертационного исследования было разработано программное обеспечение для моделирования модульных роботов на основе вышеизложенного способа. Основой разработанного ПО программного комплекса послужила кроссплатформенная среда разработки Unity3D, которая компилирует исходный код, написанный на C# на целевую платформу (Windows, Linux, MacOS). В программном обеспечении используются протоколы HTTP, протокол обмена информации между макетным образцом и средой, стандартные драйверы целевой ОС, для работы с виртуальным СОМ-портом. Макетный образец МР подключается к программному обеспечению через USB/Bluetooth. В программном коде используются стандартные библиотеки платформы .NET и Unity3D. Размер разработанного программного обеспечения составляет ~2000 строк кода на языке C#. Целевые платформы – Windows, Linux, MacOS.

Также в 3-й главе предложен способ описания кинематической структуры модульных роботов на основе XML, словарь элементов которого приведен в таблице 3. Разработанный способ позволяет описывать конфигурации различных типов модульных роботов вне зависимости от особенностей их кинематической структуры и конструкции мехатронных модулей.



Таблица 3. Словарь элементов описания конфигураций модульных роботов.

Элемент	Описание элемента	Атрибуты	Описание атрибута
robot	Корневой элемент XML документа, описывающий модульного робота.	name	Имя робота
		refId	Идентификатор модуля (референтного), от которого будет строиться программная модель робота.
		moduleType	Основной тип мехатронных модулей, из которых состоит робот.
		position	Координаты x, y, z, определяющие положение референтного модуля.
		rotation	Углы Эйлера, определяющие ориентацию референтного модуля.
modules	Контейнер для элементов <module>	-	-
module	Элемент описывающий мехатронный модуль.	id	Уникальный идентификатор.
		qi	Угол в i-м сочленении модуля.
		type (опционально)	Тип мехатронного модуля. Параметр необходим в том случае, когда робот состоит из разных типов мехатронных модулей.
connections	Контейнер для элементов <connection>	-	-
connection	Элемент, описывающий соединение между двумя мехатронными модулями.	from	Идентификатор 1-го модуля.
		to	Идентификатор 2-го модуля.
		surfaceFrom	Имя интерфейсной площадки 1-го модуля.
		surfaceTo	Имя интерфейсной площадки 2-го модуля.
		tilt (опционально)	Угол соединения модулей (если параметр не указан, то по умолчанию равен 0).

Кроме того, разработан алгоритм построения программных моделей на основе файла XML описания (Листинг 1). Он основан на расчете вектора положения  $P$  и кватерниона ориентации  $Q$  каждого модуля системы относительно референтного. Позиция  $(i+1)$ -го модуля относительно  $i$ -го модуля будет определяться по формуле:

$$P_{i+1} = P_i + \hat{v} \cdot (S_i + S_{i+1}) , \quad (3)$$

где  $S_i$  – расстояние от центра координат  $i$ -го модуля до интерфейсной площадки, к которой присоединен  $i+1$  модуль;

$S_{i+1}$  – расстояние от центра координат  $(i+1)$ -го модуля до интерфейсной площадки, к которой присоединен  $i$ -й модуль;

$\hat{v}$  – единичный вектор, характеризующий направление соединения двух модулей.

Ориентация  $i+1$  модуля, относительно  $i$  определяется следующим соотношением:

$$Q_{i+1} = Q_s \cdot Q_t \cdot Q_i , \quad (4)$$

где  $Q_s$  – кватернион, совмещающий направление стыковочных интерфейсных площадок,

$Q_t$  – кватернион, представляющий поворот присоединяемой площадки

$Q_i$  – кватернион, задающий ориентацию  $i$ -го модуля.

---

**Листинг 1.** Алгоритм построения программной модели МР по файлу описания.

---

**ВВОД:** XML документ

Очередь ids

modules ← <Получение элементов с тегом «module»>

connections ← <Получение элементов с тегом «connection»>

<Установка референтного модуля>

<Добавляем id референтного модуля в очередь ids>

**ПОКА** (Очередь ids не пустая)

    m ← <Извлекаем элемент из очереди ids>

**ПОКА** (Очередь connections [currentId] не пустая)

        m2 ← <Извлекаем информацию о присоединяемом модуле>

**ЕСЛИ** (m2 не установлен) **ТО**

            <Устанавливаем m2 относительно m>

            <Добавляем id модуля m2 в очередь ids>

---

Также в данной главе описана реализация метода ААУ (рис. 4.)

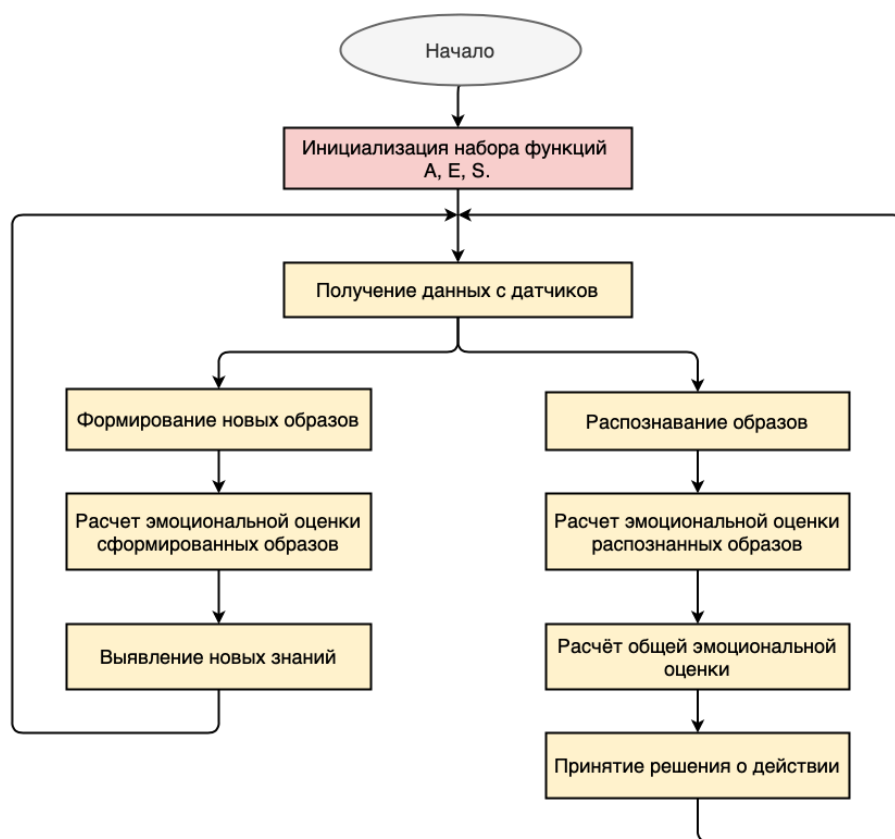


Рис. 4. Блок-схема программы, реализующей метод ААУ модульными роботами.

Контур обучения состоит из 3-х шагов:

1. Формирование новых образов;
2. Расчёт эмоциональной оценки сформированных образов;
3. Выявление новых знаний на основе распознанных и сформированных образов на текущем шаге и действия, совершенного на предыдущем шаге.

Контур управления состоит из 4-х шагов:

1. Распознавание образов;
2. Расчёт эмоциональной оценки распознанных образов;
3. Расчёт общей эмоциональной оценки, как суммы оценок распознанных образов;
4. Принятие решения о действии на основе базы знаний.

Далее в 3-й главе описан способ взаимодействия разработанного макетного образца модульного робота с предложенными средствами программного моделирования (Рис. 5).

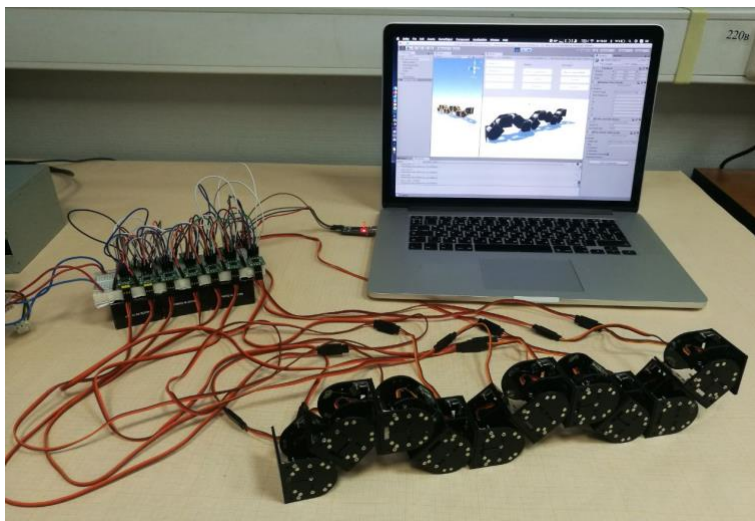


Рис. 5. Демонстрация одновременного управления программной моделью и макетным образцом модульного робота.

В четвертой главе «Экспериментальные исследования алгоритмов адаптивного управления модульными роботами» представлены результаты проведенных программных экспериментов по исследованию работоспособности и эффективности применения метода ААУ к управлению модульными роботами на разработанном программном обеспечении. Экспериментально исследованы два способа адаптивного управления, при которых модульный манипуляционный робот непосредственно в процессе управления постепенно и успешно самообучается точнее перемещать схват в заданную точку. Проведены эксперименты по работоспособности предложенного подхода в случае выхода из строя одного из модулей, включая процессы самообучения при изначально пустой Базе Знаний, и процесс переобучения при частично заполненной Базе Знаний (рис. 6). Также представлены результаты успешных экспериментов по исследованию адаптивного управления движением модульных роботов в конфигурации «шагающей платформы».

При этом конечности робота рассматривались как совокупность манипуляторов.

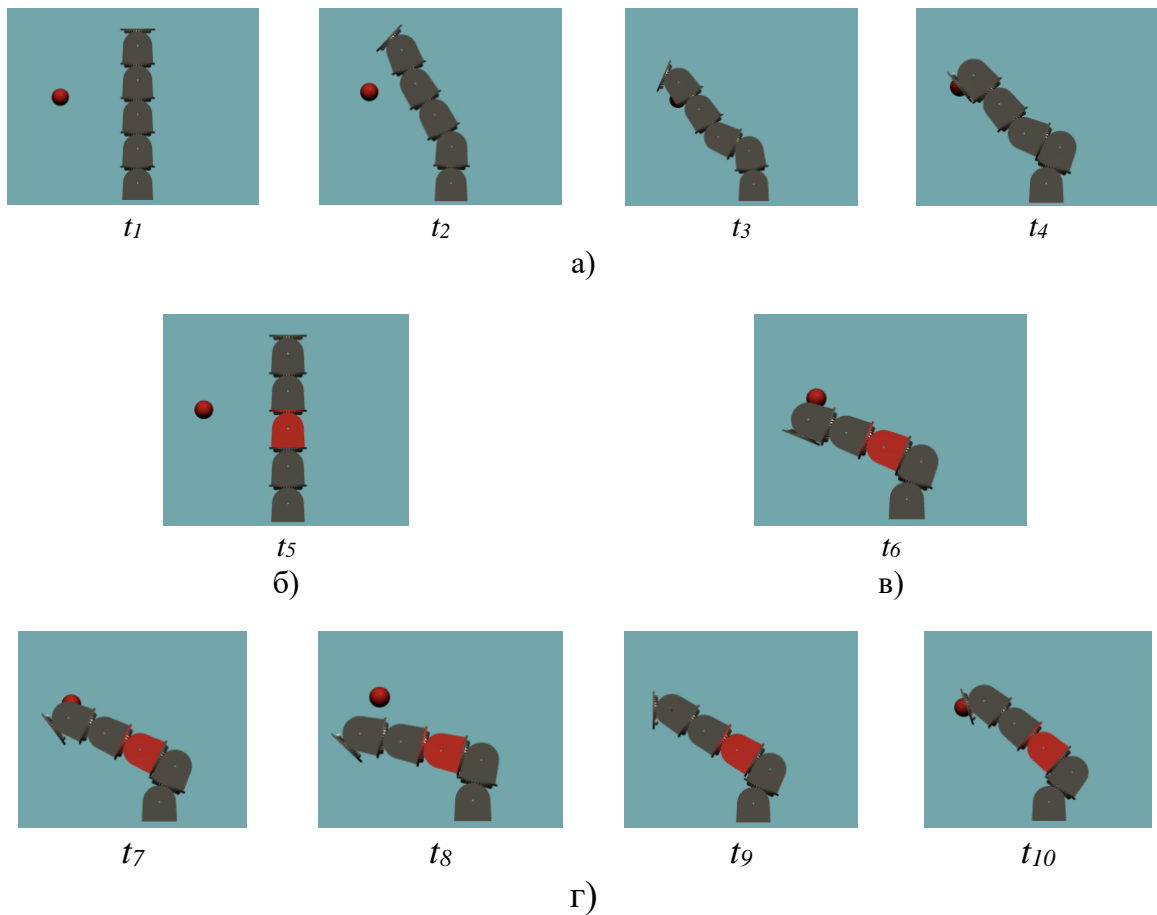


Рис. 6. Демонстрация способности переобучения модульного манипулятора (1-й способ): а) БЗ робота пустая, и робот самообучается приходить в целевую точку; б) имитируется выход из строя (заклинивание) одного из модулей; в) робот промахивается, пытаясь переместить схват в целевую точку, используя полученные знания; г) робот переобучается и в результате приходит в целевую точку, несмотря на поломку одного из модулей.

Кроме того, в 4-й главе описаны преимущества предложенных способов адаптивного управления по сравнению с существующими методами и алгоритмами управления манипуляционными и шагающими модульными роботами, которые состоят в возможности адаптации к различного рода изменениям свойств робота или окружающей среды. Контур обучения работает одновременно с контуром управления, что

позволяет самообучаться и переобучаться (например, в случае выхода из строя отдельных модулей) в режиме реального времени.

В **заключении** подведены итоги исследования и определены дальнейшие перспективы данного исследования.

### **III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработан способ построения адаптивной системы управления многозвенными объектами на примере модульных роботов.
2. Предложена математическая модель, упрощенно описывающая работу системы, построенной на основе метода Автономного Адаптивного Управления.
3. Разработан способ построения программных средств моделирования модульных роботов.
4. Разработано программное обеспечение для моделирования модульных роботов.
5. Предложен способ описания конфигураций модульных роботов и алгоритм автоматического построения программных моделей по файлу описания.
6. Разработан способ взаимодействия средств программного моделирования с разработанным макетным образцом модульного робота.
7. Разработано и экспериментально проверено алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы управления модульными роботами в конфигурациях «манипулятор» и «шагающая платформа».

### **IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Manko S., Shestakov E. Automatic Synthesis Gait Scenarios for Reconfigurable Modular Robots Walking Platform Configuration // In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative

- Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11097. Springer, Cham
2. Romanov A.M., Romanov M.P., Shestakov E.I. A novel architecture for control systems of modular reconfigurable robots // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2017 2. 2017. pp. 131-134.
  3. Романов А.М., Манько С.В., Шестаков Е.И., Малько А.Н., Чиу В.-Ю. Способы описания и средства моделирования мехатронно-модульных реконфигурируемых роботов // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. – 2019. – No. 2
  4. Шестаков Е.И., Жданов А.А. Адаптивное управление модульным реконфигурируемым манипуляционным роботом // XXII Международная научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2020": Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020 – с.18-26.
  5. Шестаков Е.И., Жданов А.А. Управление манипуляционным роботом на основе метода автономного адаптивного управления // Нейронаука для медицины и психологии: XVI Международный междисциплинарный конгресс. Судак, Крым, Россия; 6–16 октября 2020 г.: Труды Конгресса / Под ред. Е.В. Лосевой, А.В. Крючковой, Н.А. Логиновой. – Москва: МАКС Пресс, 2020. – с. 527-529. ISBN 978-5-317-06406-8
  6. Манько С.В., Шестаков Е.И. Автоматический синтез сценариев походки реконфигурируемых мехатронно- модульных роботов в модификации шагающей платформы // Российский технологический журнал. 2018 т.6 No4, с. 26-41
  7. Лохин В.М., Манько С.В., Диане С.А.К., Шестаков Е.И. Использование аппарата конечных автоматов в задачах группового управления автономными роботами. В книге: Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов. Материалы отчетного

- мероприятия РФФИ по конкурсу "офи-м" (тема 604) в рамках международной научно-практической конференции. 2018. С. 24-25.
8. Лохин В.М., Манько С.В., Шестаков Е.И., Диане С.А.К. Комплексное применение аппарата теории конечных автоматов в задачах группового управления автономными роботами. В книге: ДЕСЯТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2017). Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. 2017. С. 297-299.
  9. Шестаков Е.И., Манько С.В., Лохин В.М. Автоматическое формирование моделей управляемого движения автономных реконфигурируемых роботов // В книге: Десятая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления (МКПУ-2017) Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции в 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. 2017. С. 128-131.
  10. Шестаков Е.И. Построение распределенной системы управления мехатронно-модульным манипуляционным роботом // Современные технологии в задачах управления, автоматизации, и обработки информации: Труды XXIV Международной научно-технической конференции, 14-20 сентября 2015 г., Алушта. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – с. 115-116
  11. Лохин В.М., Манько С.В., Шестаков Е.И., Малько А.Н. Автоматический синтез сценариев походки мехатронно-модульных роботов в конфигурации шагающей платформы. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2018619700



*Шестаков Евгений Игоревич*

Алгоритмическое и программное обеспечение адаптивной системы  
управления модульными роботами

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать \_\_. \_\_.2021. Заказ №

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография