

На правах рукописи

Козов Алексей Владимирович

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫХ СИСТЕМ ГРУППОВОГО
УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ**

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Волосатова Тамара Михайловна**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Чистякова Тамара Балабековна**
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой систем автоматизированного проектирования и управления, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»

Щербаков Максим Владимирович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «27» июня 2024 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1, зал Учёного совета ГУК МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1, Учёному секретарю диссертационного совета 24.2.331.19, кафедра ИУ-3.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.19
кандидат технических наук, доцент

С.А. Сакулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности. Мобильные роботы (МР) имеют практическое применение, в частности, в областях, связанных с повышенной опасностью для жизни человека. Автономные МР применяют для тушения пожаров, ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в аэрокосмической и военной областях. Автономное выполнение задачи, поставленной человеком-оператором, обеспечивает система управления МР. Объединение нескольких автономных МР для совместной работы в составе группы расширяет возможности их применения, но приводит к существенному усложнению их системы управления. Система группового управления (СГУ) обеспечивает согласование действий роботов и реагирование на изменения внешней среды для выполнения задачи с требуемой эффективностью, взаимодействует с человеком-оператором группы. СГУ МР имеет иерархическую структуру, её верхние уровни рассматриваются как дискретно-событийная система. Дискретно-событийная СГУ реализует методы группового управления, обеспечивает взаимодействие МР в группе и с человеком-оператором.

Проектирование дискретно-событийных СГУ для мобильных роботов, способных автономно действовать в недетерминированной среде, связано с проблемами обеспечения требуемого качества дискретно-событийной СГУ как объекта проектирования, многократностью и трудоёмкостью выполнения проектных процедур, а также высокой размерностью пространства состояний объекта управления (группы МР). В связи с этим актуальной является задача автоматизации проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

Исследования в области проектирования дискретно-событийных СГУ МР проводятся в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации Российской академии наук, Университете Торонто, Сианьском университете электронных наук и технологий, других исследовательских центрах.

Различным аспектам проблемы проектирования дискретно-событийных СГУ МР посвящены работы следующих исследователей: Зенкевич С.Л., Амбарцумян А.А., Потехин А.И., Соколов Б.В., Зейглер Б., Вонхем В.М., Ли Ч., Чжан Д. Отдельно следует отметить вклад в область исследований группового управления роботами следующих авторов: Дивеев А.И., Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Пшихопов В.Х.

Анализ литературы по различным аспектам проектирования дискретно-событийных СГУ МР показал следующее.

1. Формализация замысла проектировщика о требуемом поведении объекта управления является одной из ключевых задач проектирования дискретно-событийных СГУ МР, но является наименее автоматизированной.

2. Известные математические модели дискретно-событийных систем имеют высокий уровень абстракции и не учитывают важных для автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР аспектов взаимодействия

системы управления с группой МР, например, ограничений на размер данных, передаваемых в группе.

3. Применение компьютерных моделей при проектировании дискретно-событийных СГУ МР ограничено небольшим числом проектных процедур.

4. Известные методы и алгоритмы проектирования дискретно-событийных СГУ не предполагают формальной постановки задачи синтеза модели информационного взаимодействия дискретно-событийной СГУ с объектом управления и не обеспечивают автоматизацию решения этой задачи.

На основании вышеперечисленного сделано заключение об актуальности разработки методики автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР, включая формализацию постановки задачи, создание математической и компьютерной моделей объекта проектирования, а также формализацию проектных процедур автоматизированного синтеза дискретно-событийных СГУ МР.

Объектом исследования является дискретно-событийные СГУ МР.

Предметом исследования является математическое, программное и методическое обеспечение автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

Цель диссертационной работы. Цель диссертации заключается в повышении эффективности проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

Задачи диссертационной работы.

1. Анализ СГУ МР как объекта проектирования. Обзор математических и компьютерных моделей, методов и алгоритмов проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

2. Формализация постановки задачи автоматизированного проектирования дискретно-событийной СГУ МР, включая постановку задачи синтеза управления дискретно-событийной системой и задачи синтеза модели информационного взаимодействия дискретно-событийной СГУ с группой МР.

3. Разработка математической и компьютерной моделей дискретно-событийной СГУ МР.

4. Разработка методики автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР на основе разработанных математической и компьютерной моделей объекта проектирования.

5. Создание архитектуры прототипа специализированной системы автоматизированного проектирования (САПР) дискретно-событийных СГУ МР. Программная реализация прототипа САПР.

6. Исследование эффективности разработанного математического, программного и методического обеспечения при проектировании дискретно-событийной СГУ МР.

Научная новизна диссертации состоит в следующем.

1. Предложены и разработаны элементы научных основ создания комплекса средств САПР дискретно-событийных СГУ МР: методика автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР, формализация постановки

задачи автоматизированного проектирования дискретно-событийной СГУ МР, математическая и компьютерная модели объекта проектирования, проектные процедуры автоматизированного синтеза дискретно-событийных СГУ МР (п. 3 паспорта научной специальности).

2. Предложена и разработана методика автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР, отличительной особенностью которой является объединение задачи синтеза управления дискретно-событийной системой и задачи синтеза модели информационного взаимодействия с объектом управления, что позволило сократить время проектирования и повысить качество проектируемой дискретно-событийной СГУ МР (п. 1 паспорта научной специальности).

3. Предложены и разработаны математическая и компьютерная модели дискретно-событийной СГУ МР, отличающиеся от известных наличием описания информационного взаимодействия системы управления с группой МР, что позволило учитывать ограничения каналов связи группы при проектировании (п. 7, 9 паспорта научной специальности).

4. Формализованы проектные процедуры автоматизированного синтеза дискретно-событийных СГУ МР; отличительной особенностью процедур является использование единой модели дискретно-событийной СГУ МР на всех этапах проектирования, что позволило повысить эффективность работы проектировщика (п. 1 паспорта научной специальности).

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии научных основ автоматизированного проектирования дискретно-событийных систем управления, а именно предложена и разработана методика автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР. Разработанная методика позволяет сократить время проектирования и повысить качество проектируемой дискретно-событийной СГУ МР.

Практическая значимость диссертации подтверждается применением разработанной методики автоматизированного проектирования при создании дискретно-событийной СГУ МР для задач экстремальной робототехники. Использование разработанного математического, программного и методического обеспечения позволило повысить качество объекта проектирования, сократить сроки и упростить процесс проектирования. Результаты диссертации внедрены в научно-исследовательском центре «Нейроинформатика», а также в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. При разработке методики автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР использованы методы теории формальных языков, теории супервизорного управления и теории графов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методика автоматизированного проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

2. Формальная постановка задачи автоматизированного проектирования дискретно-событийной СГУ МР.

3. Математическая и компьютерная модели дискретно-событийной СГУ МР.

4. Проектные процедуры автоматизированного синтеза дискретно-событийных СГУ МР.

5. Архитектура прототипа САПР дискретно-событийных СГУ МР.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов обеспечивается строгостью и корректностью используемого математического аппарата, а также подтверждается применением разработанного математического, программного и методического обеспечения при создании дискретно-событийной СГУ МР для задач экстремальной робототехники.

Апробация. Основные результаты и положения диссертации представлены и обсуждались на: 6-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2017); 1-й Межвузовской конференции «Science, Engineering and Business» (Москва, 2019); 3-й Международной научно-практической конференции «Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем» (Елец, 2019); 31-й, 32-й, 33-й, 34-й Международных научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2020—2023); 2021 International Russian Automation Conference (Сочи, 2021); 36-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Нижний Новгород, 2023).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 научных работах, из них одна работа — в издании, индексируемом в Scopus, девять работ — в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Минобрнауки России.

Личный вклад автора. Исследования, результаты которых представлены в диссертации, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включён материал, который непосредственно принадлежит соискателю. Соискателем самостоятельно разработан прототип специализированной САПР и выполнен синтез дискретно-событийной СГУ МР с использованием предложенного и разработанного в диссертации математического, программного и методического обеспечения.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложения. Общий объём диссертации составляет 146 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 45 рисунков и одну таблицу. Список литературы включает 199 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, аргументированы достоверность, обоснованность и практическая значимость полученных

результатов, перечислены положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

Первая глава диссертации содержит анализ СГУ МР как объекта проектирования, обзор известных математических и компьютерных моделей, методов и алгоритмов проектирования дискретно-событийных СГУ МР.

СГУ МР является распределённой реконфигурируемой иерархической системой, для верхних уровней которой характерно дискретно-событийное представление. Предложено разделение СГУ МР на уровни по их функциональному назначению (Рис. 1). Предложенное разделение соответствует способу постановки задачи группе роботов, при котором человек-оператор формирует замысел *групповой задачи* на цифровой карте геоинформационной системы (ГИС). После получения сформированной таким способом задачи группа МР приступает к её автономному выполнению под контролем СГУ.

Групповая задача является упорядоченной последовательностью *групповых действий* роботов в пределах подгрупп. Каждое групповое действие состоит из *индивидуальных действий* отдельных роботов подгруппы, а индивидуальные действия представляют собой согласованную работу подсистем МР.

Введено понятие *дискретно-событийной системы группового управления* мобильными роботами (ДССГУ) для обозначения верхних иерархических уровней **А**, **Б**, **В** системы управления, рассматриваемых как дискретно-событийная система (ДСС). Предложена декомпозиция ДССГУ на *структурные элементы* — программные или программно-аппаратные модули, реализующие алгоритм выполнения отдельного действия робота или группы.

По результатам анализа процесса проектирования СГУ МР сделано заключение, что наибольшую сложность представляет проектирование ДССГУ. Это связано с высокими требованиями к качеству ДССГУ, недостаточной автоматизацией процесса проектирования и большой размерностью пространства состояний объекта управления проектируемой ДССГУ.

Выполнен обзор известных математических и компьютерных моделей реконфигурируемых ДСС, методов и алгоритмов проектирования ДССГУ, по результатам которого обоснована актуальность разработки методики автоматизированного проектирования ДССГУ.

Во **второй главе** диссертации представлена методика автоматизированного проектирования ДССГУ. Методика включает: формальную постановку задачи автоматизированного проектирования ДССГУ, объединяющую формальную постановку задачи синтеза управления ДСС и формальную постановку задачи

А Уровень групповой задачи	Дискретно-событийное представление
Б Уровень управления подгруппой	
В Уровень управления единичным роботом	
Г Уровень управления подсистемой робота	
Д Уровень управления исполнительным устройством	

Рис. 1. Иерархические уровни СГУ МР

синтеза модели информационного взаимодействия ДССГУ с объектом управления; математическую и компьютерную модели ДССГУ; проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ.

Формальная постановка задачи синтеза управления ДСС

Согласно теории супервизорного управления ДСС представляет собой детерминированный конечный автомат (далее просто автомат) G с конечным множеством состояний $Q \neq \emptyset$, начальным состоянием $q_0 \in Q$ и множеством целевых состояний $Q_m \subseteq Q$. Переход между состояниями автомата рассматривается как возникновение события e из конечного множества событий $E \neq \emptyset$. Множество E образуют два непересекающихся подмножества: E_u (множество неуправляемых событий) и E_c (множество управляемых событий), $E = E_u \cup E_c$, $E_u \cap E_c = \emptyset$.

Объект управления ДССГУ является параллельной композицией n компонентных автоматов, $G = \bigoplus_{i=1}^n G^i$. Каждый компонентный автомат G^i , $i \in [1 : n]$, где $[1 : n]$ — диапазон целых чисел от 1 до n , моделирует компонент нижележащего уровня ДССГУ. Поведение объекта управления описывается как формальный язык (далее просто язык) $L(G)$, порождаемый автоматом G .

Требуемое поведение G определяет спецификация $K \subseteq L_m(G)$, где $L_m(G) \subseteq L(G)$ — множество последовательностей событий (строк), которые переводят объект управления в целевое состояние $q_m \in Q_m$. Спецификация задаёт последовательности событий, которые обеспечивают ту функциональность, для реализации которой предназначена проектируемая ДССГУ. Для синтеза управления ДСС спецификация должна удовлетворять условию управляемости: $\overline{K}E_u \cap L(G) \subseteq \overline{K}$, где \overline{K} — префиксное замыкание языка K ; $\overline{K}E_u$ — конкатенация строки $\sigma \in \overline{K}$ и события $e \in E_u$.

Управление ДСС осуществляет супервизор (т.е. управляющий компонент ДССГУ) S , который генерирует события из E_c в ответ на последовательности событий ДСС (Рис. 2). Такая схема управления ДСС обозначается S/G , а язык, порождаемый G под управлением S , — $L(S/G)$.

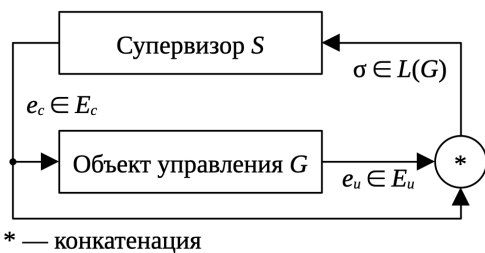


Рис. 2. Схема управления ДСС

Задача синтеза управления ДСС заключается в определении супервизора S , который обеспечивает поведение ДСС G в соответствии с удовлетворяющей условию управляемости спецификацией $K \neq \emptyset$:

$$L(S/G) = K. \quad (1)$$

Решение задачи синтеза управления ДСС определяет структурные элементы ДССГУ и алгоритм их взаимодействия, которые обеспечивают требуемое поведение объекта управления.

Формальная постановка задачи синтеза модели информационного взаимодействия ДССГУ с объектом управления

В диссертации приняты следующие допущения для формализации постановки задачи синтеза модели информационного взаимодействия ДССГУ с объектом

управления. Синтезируемая модель $\Lambda \in L_\Lambda$, где L_Λ — заданный язык проектирования с поддержкой типов, представляет информационное взаимодействие ДССГУ с объектом управления в виде взаимодействия структурных элементов иерархической ДССГУ. Требования, предъявляемые к информационному взаимодействию проектируемой ДССГУ с объектом управления, представимы в виде подмножества типов \tilde{T} языка L_Λ , которые запрещены для использования при взаимодействии структурных элементов, например, из-за ограничений канала связи на размер передаваемых данных. Каждому факту взаимодействия структурных элементов ДССГУ соответствует событие ДСС.

Любое взаимодействие ДССГУ с объектом управления G происходит посредством событий из множества E , поэтому необходимым условием синтеза модели Λ является существование однозначного отображения $\mathcal{T}_E : E \rightarrow L_E$ для представления E на языке $L_E \subset L_\Lambda$. Наблюдаемость ДССГУ обеспечивает однозначная интерпретируемость строк L_E как событий системы, т.е. однозначность отображения $L_E \rightarrow E$. Тогда условием синтеза модели Λ является существование взаимно однозначного отображения $\mathcal{T}_E : E \leftrightarrow L_E$ при $L_E \subset L_\Lambda$.

ДССГУ во время своей работы «генерирует» последовательность выходных данных $\chi^O = \chi_1^O, \chi_2^O, \dots$ (команд группе МР) в ответ на последовательность входных данных $\chi^I = \chi_1^I, \chi_2^I, \dots$ (откликов объекта управления) той же длины. Последовательности χ^I, χ^O определяют информационное взаимодействие ДССГУ с объектом управления и в модели Λ являются строками языка L_E . Элементы этих последовательностей соответствуют событиям из E .

Описанием процесса функционирования ДССГУ (обозначается $\odot \Lambda$) является χ — последовательность пар входных и полученных по ним выходных данных, расположенных в порядке возникновения соответствующих им событий, т.е. $\odot \Lambda = \chi = \chi_1^I, \chi_1^O, \chi_2^I, \chi_2^O, \dots$. Соответствие поведения объекта управления и спецификации $K \neq \emptyset$ обеспечивает условие $\mathcal{T}_E^{-1}(\odot \Lambda) \in K$. Иными словами, последовательность событий, полученная в результате отображения \mathcal{T}_E^{-1} последовательности пар входных и выходных данных $\odot \Lambda$, должна соответствовать спецификации K .

Условие (1) для функционирования проектируемой ДССГУ имеет вид

$$\mathcal{T}_E^{-1}(\mathcal{R}(\Lambda)) = K, \quad (2)$$

где $\mathcal{R}(\Lambda)$ — множество запусков процесса функционирования ДССГУ, определяемой моделью Λ , для всех возможных корректных последовательностей входных данных.

Задача синтеза модели информационного взаимодействия ДССГУ с объектом управления на языке проектирования L_Λ для S, G и K при существовании отображения $\mathcal{T}_E : E \leftrightarrow L_\Lambda$ заключается в отыскании такого отображения $\mathcal{T}(S/G) = \Lambda$, что полученная модель $\Lambda \in L_\Lambda$ удовлетворяет условию (2):

$$\begin{cases} \mathcal{T}(S/G) = \Lambda \in L_\Lambda, \\ \mathcal{T}_E^{-1}(\mathcal{R}(\Lambda)) = K. \end{cases} \quad (3)$$

Поддержка типов в языке проектирования L_Λ делает возможной декомпозицию отображения \mathcal{T} и сведение задачи к определению необходимых типов,

их значений и последовательности операций над ними. Тогда отображение \mathcal{T} есть композиция $\mathcal{T}_f \circ \mathcal{T}_V \circ \mathcal{T}_T$, которая формирует типы данных (отображение \mathcal{T}_T), их значения (отображение \mathcal{T}_V) и последовательность операций над ними (отображение \mathcal{T}_f) для синтеза модели $\Lambda \in L_\Lambda$.

Формальная постановка задачи автоматизированного проектирования ДССГУ

Предложенное в диссертации условие (3) позволяет формализовать постановку задачи автоматизированного проектирования ДССГУ в следующем виде.

Исходными данными являются: компонентные автоматы $G^i, i \in [1 : n]$; описание требуемого поведения и интерфейсов информационного взаимодействия объекта управления; язык проектирования L_Λ , поддерживающий множество типов T^{L_Λ} ; множество допустимых типов этого языка $\hat{T} = T^{L_\Lambda} \setminus \tilde{T}$.

Требуется определить модель объекта управления $G = \bigoplus_{i=1}^n G^i$, формальную спецификацию K , выполнить синтез супервизора S , определить отображения $\mathcal{T}_E, \mathcal{T}$ и модель Λ проектируемой системы управления, таких что

$$\left\{ \begin{array}{l} K \neq \emptyset, \\ \overline{K} E_u \cap L(G) \subseteq \overline{K}, \\ L(S/G) = K \subseteq L_m(G), \\ \mathcal{T}(S/G) = \Lambda \in L_\Lambda, \\ \mathcal{T}_E^{-1}(\mathcal{R}(\Lambda)) = K, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\mathcal{T} = \mathcal{T}_f \circ \mathcal{T}_V \circ \mathcal{T}_T$.

Математическая модель ДССГУ

Алгоритм взаимодействия структурных элементов ДССГУ, получаемый в результате решения задачи синтеза управления ДСС, определён в виде вычислительного графа — ориентированного мультиграфа $\langle A, C \rangle$, где A — множество вершин, C — мультимножество информационных связей между ними. Каждая вершина $a_i \in A, i \in [1 : |A|]$, где $|A|$ — мощность множества A , соответствует структурному элементу ДССГУ. Информационные связи задаёт мультимножество дуг вычислительного графа $C = \langle \hat{C}, m_C \rangle$, где $\hat{C} = A \times A$; $m_C : \hat{C} \rightarrow \mathbb{N}$ — функция, определяющая кратность дуги. Существование дуги $c_{i,j} \in C$ означает наличие информационной связи (обмена данными) между структурными элементами $a_i \in A, a_j \in A, j \in [1 : |A|]$. В ДССГУ информационная связь $c_{i,j}$ интерпретируется как возникновение события $e \in E$.

Предложенное представление ДССГУ в виде вычислительного графа дополняет абстрактные события ДСС информацией о процессах взаимодействия структурных элементов ДССГУ. В виде вычислительных графов представимы компонентные автоматы, параллельная композиция которых образует ДСС G .

Входные и выходные данные структурного элемента ДССГУ определяются согласно *контрактам* (правилам) информационного взаимодействия с другими элементами в соответствии с вычислительным графом ДССГУ. Возникновение события $e \in E$, абстрагирующего информационную связь $c_{i,j}$, означает завершение работы структурного элемента a_i , передачу его выходных данных в качестве

входных элементу a_j и запуск выполнения последнего. Данные, передаваемые между структурными элементами согласно контракту, называем *атрибутами контракта* информационного взаимодействия.

С учётом принятого допущения о поддержке типов языком проектирования L_Δ атрибуты контракта представимы как значения определённых типов из множества \hat{T} , например, целое число, строка, вектор, матрица, граф.

Контракт, соответствующий событию e , имеет N_e атрибутов, если при событии e происходит передача данных $N_e \in \mathbb{N}$ типов, необязательно разных. Кортеж типов этих данных $\langle T_1, T_2, \dots, T_{N_e} \rangle$, $T_k \in \hat{T}$, $k \in [1 : N_e]$, т.е. кортеж типов атрибутов, характеризует информационную связь $c_{i,j}$, соответствующую событию e . Тип атрибута T_k задаёт множество своих возможных значений Z_k . Множество всех возможных значений атрибутов контракта является декартовым произведением N_e множеств значений каждого атрибута: $Z = Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_{N_e}$. Элемент $z \in Z$ представляет собой кортеж значений $z = \langle z_1, z_2, \dots, z_{N_e} \rangle$, где $z_k \in Z_k$ — значение k -го атрибута. Далее называем кортеж типов *типами атрибутов*, а кортеж их значений — *значениями атрибутов*.

Одной из особенностей ДССГУ является большое число ветвлений и кратных дуг в её вычислительном графе. Это обусловлено, например, необходимостью разных действий объекта управления в зависимости от его состояния или состояния внешней среды, возможностью возникновения ошибок в работе структурных элементов ДССГУ или подсистем роботов. Для упрощения вычислительного графа и спецификации поведения группы МР в диссертации предложено абстрагировать ветвления путём введения *составных* контрактов.

Составной контракт e определён кортежем

$$e = \langle E_e, T_e, \zeta_e \rangle, \quad (5)$$

где $E_e \neq \emptyset$ — множество абстрагируемых дуг вычислительного графа (событий); T_e — типы атрибутов составного контракта; $\zeta_e : E_e \rightarrow Z_e$ — функция соответствия комбинации событий и значения атрибутов составного контракта из множества значений Z_e . Кортеж T_e соответствует типам атрибутов исходных контрактов, но может быть расширен дополнительными типами для передачи информации о комбинации событий из множества E_e . Значения атрибутов устанавливает функция ζ_e в зависимости от своего аргумента, который представляет собой множество произошедших событий в ДССГУ. Эта функция задаёт Z_e и выступает в роли функции ограничений, если множество значений атрибутов Z_e составного контракта должно быть ограничено, например, для обеспечения корректности входных данных структурного элемента ДССГУ.

Определение составного контракта (5) позволяет представить любой (не только составной) контракт информационного взаимодействия структурных элементов ДССГУ.

Математическая модель ДССГУ Θ определена как вычислительный граф ДССГУ, дополненный множеством контрактов E и функцией $\eta : E \rightarrow E$, которая ставит в соответствие каждому событию контракт:

$$\Theta = \langle A, C, E, \eta \rangle. \quad (6)$$

В предложенной математической модели ДССГУ Θ вычислительный граф, определяющий функционирование объекта управления G под управлением супервизора S , дополнен информацией о данных, передаваемых при взаимодействии структурных элементов системы управления, что необходимо для решения задачи (4), а также для упрощения модели путём замены ветвлений составными контрактами. Поскольку модель (6) основана на дискретно-событийном представлении ДССГУ, для построения этой модели применимы известные методы синтеза управления ДСС и формальные методы верификации.

Компьютерная модель ДССГУ

Математическая модель (6) лежит в основе предложенной и разработанной в диссертации компьютерной модели ДССГУ. Компьютерная модель ДССГУ отражает структуру объекта проектирования, содержит модель объекта управления и спецификацию его поведения, а также позволяет проверить функционирование проектируемой системы управления в виртуальной среде. Модель поддерживает сохранение и загрузку своих данных в виде текстового формата DOT для повторного использования.

Для реализации компьютерной модели ДССГУ предложен специализированный предметно-ориентированный язык (domain-specific language, DSL), который задаёт язык проектирования L_{Δ} . Предложенный DSL реализован на языке программирования C++ в виде библиотеки классов (Рис. 3, а). Классы DSL определяют множество типов $T^{L_{\Delta}}$ языка L_{Δ} , объекты этих классов — множество значений, а функции и методы классов — множество операций над типами этого языка.

Предложена графическая визуализация компьютерной модели ДССГУ на основе графового представления сети Петри (Рис. 3, б). Разработаны программные средства для визуализации компьютерной модели ДССГУ и моделирования процесса функционирования ДССГУ в виртуальной среде, обеспечивающие наглядность и интерпретируемость моделирования.

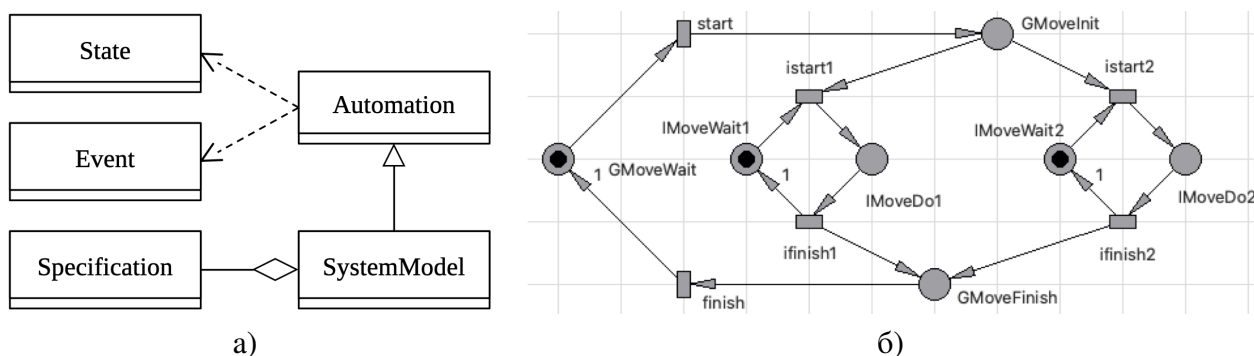


Рис. 3. Реализация компьютерной модели ДССГУ: а) диаграмма основных классов, поля и методы не показаны; б) пример графической визуализации модели

Компьютерная модель ДССГУ обеспечивает: единообразное описание ДССГУ разных иерархических уровней; иерархическую организацию компьютерных моделей ДССГУ путём их «вложения» друг в друга; расширяемость и возможность независимой модификации компонентов проектируемой ДССГУ.

Реализация составных контрактов позволяет проектировщику при работе с моделью скрывать либо, наоборот, детализировать информацию о взаимодействии структурных элементов ДССГУ. Компьютерная модель предоставляет возможность автоматической генерации программной документации и исполняемого кода проектируемой ДССГУ для целевой программно-аппаратной платформы.

Проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ

Во второй главе диссертации формализованы проектные процедуры, которые обеспечивают решение задачи (4): построение модели объекта управления G , спецификации K , синтез супервизора S и модели Λ проектируемой ДССГУ. На основе декомпозиции решаемой задачи разработаны следующие проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ:

- синтез компьютерной модели объекта управления для заданного иерархического уровня ДССГУ;
- спецификация поведения объекта управления;
- синтез управления ДСС;
- анализ ДССГУ.

Перечисленные проектные процедуры используют компьютерную модель ДССГУ для формирования и представления проектного решения — описания на языке L_Λ объекта управления, спецификации, структуры системы управления, её взаимодействия с объектом управления.

Задачей проектной процедуры *синтеза компьютерной модели объекта управления* является представление группы МР в виде элементов компьютерной модели ДССГУ, т.е. её описание на языке L_Λ . Исходными данными этой проектной процедуры являются описание надсистемы, МР, их подсистем и функциональных возможностей в виде дискретно-событийных моделей — автоматов или сетей Петри. Состояние автомата или позиция сети Петри моделирует структурный элемент проектируемой ДССГУ, отвечающий за выполнение объектом управления какого-либо действия. Для каждой исходной дискретно-событийной модели необходима информация о разделении событий на управляемые и неуправляемые, а также о входных и выходных данных структурных элементов. Выходными данными процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня ДССГУ.

Во второй главе определены четыре шага проектной процедуры синтеза компьютерной модели объекта управления, которые формируют на языке проектирования L_Λ компьютерную модель объекта управления на основе исходных данных о группе МР. В соответствии с постановкой задачи (4) происходит определение отображения \mathcal{T}_E с проверкой его взаимной однозначности и синтез модели объекта управления G .

Задачей проектной процедуры *спецификации поведения объекта управления* является представление требований к поведению группы МР в терминах языка проектирования L_Λ для последующего синтеза управления. Исходными данными этой проектной процедуры являются требования к поведению

объекта управления заданного иерархического уровня и верифицированная компьютерная модель этого объекта управления. Выходными данными процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня ДССГУ с верифицированной спецификацией.

Во второй главе определены три шага проектной процедуры спецификации поведения объекта управления, которые дополняют компьютерную модель объекта управления верифицированной спецификацией K .

Задачей проектной процедуры *синтеза управления ДСС* является синтез супервизора для формирования компьютерной модели ДССГУ. Исходными данными этой проектной процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня с верифицированной спецификацией. Выходными данными процедуры является компьютерная модель ДССГУ с супервизором S .

Выполнен сравнительный анализ применимости известных методов синтеза супервизора для синтеза управления группой МР, предложена модификация известного метода домино. Модифицированный метод обеспечивает автоматический синтез управления по исходным данным проектной процедуры и имеет минимальную вычислительную сложность.

Во второй главе определены три шага проектной процедуры синтеза управления ДСС, которые формализуют построение компьютерной модели ДССГУ. Результатом проектной процедуры является компьютерная модель ДССГУ, которая содержит описание объекта управления, спецификацию, супервизор и описание информационного взаимодействия с объектом управления, т.е. решение задачи (4).

Задачей проектной процедуры *анализа ДССГУ* является анализ технических требований спроектированной ДССГУ и получение её описания для интеграции в СГУ МР. Исходными данными этой проектной процедуры является компьютерная модель ДССГУ. Выходными данными процедуры является компьютерная модель супервизора как отдельного компонента ДССГУ, а также оценки требований ДССГУ к пропускной способности каналов связи и ресурсам вычислительной системы, которую образуют бортовые компьютеры МР и компьютеры пункта управления группой.

Во второй главе определены три шага проектной процедуры анализа ДССГУ, которые позволяют получить технические требования для интеграции с системой управления вышестоящего иерархического уровня, а также автоматически сгенерировать документацию и исполняемый код спроектированной ДССГУ.

Представленная последовательность проектных процедур автоматизированного синтеза ДССГУ формализует отображение $\mathcal{T} = \mathcal{T}_f \circ \mathcal{T}_V \circ \mathcal{T}_T$ задачи (4). Отображение \mathcal{T}_T формализуется при выборе классов языка L_A , \mathcal{T}_V — при создании конкретных объектов этих классов, таких как события, атрибуты контрактов, состояния, модель объекта управления. Связи между объектами, спецификация поведения объекта управления, синтез управления ДСС и сохранение компьютерной модели ДССГУ определяют отображение \mathcal{T}_f .

Методика автоматизированного проектирования дискретно-событийных систем группового управления мобильными роботами

Предложенная и разработанная в диссертации методика автоматизированного проектирования ДССГУ включает: формальную постановку задачи автоматизированного проектирования ДССГУ (4); математическую модель (6); реализующую её компьютерную модель; проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ. Рис. 4 представляет маршрут проектирования ДССГУ согласно этой методике.

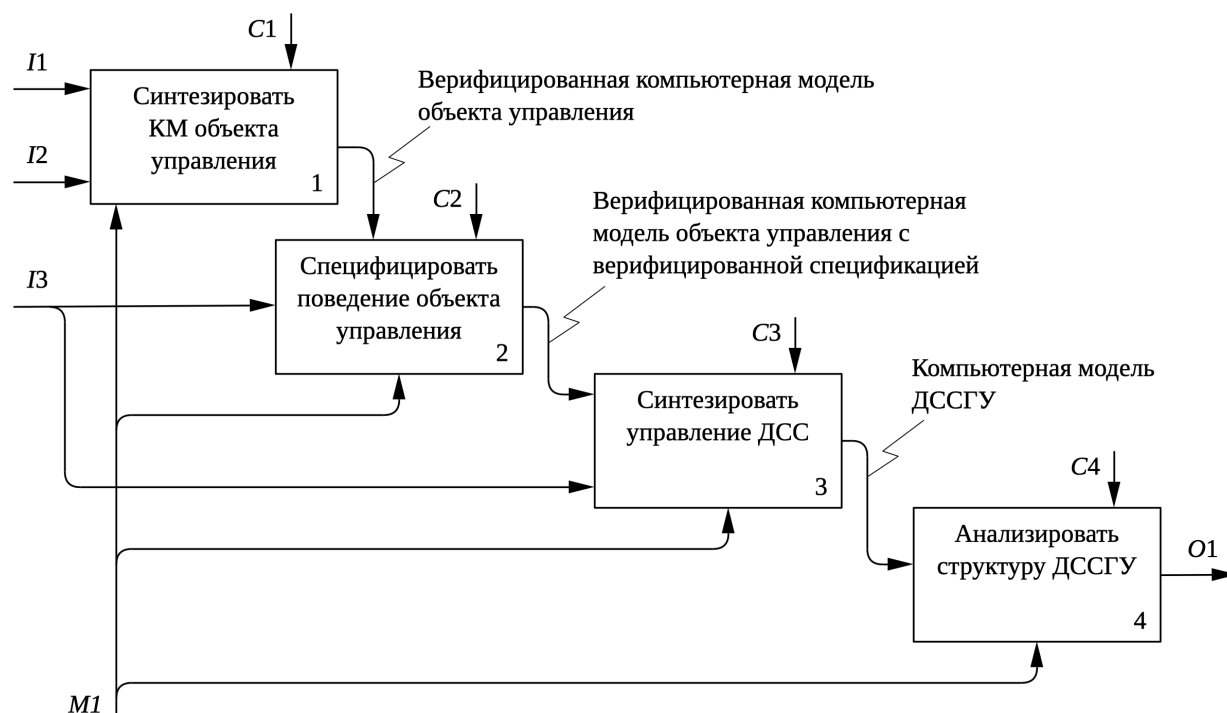


Рис. 4. Маршрут проектирования ДССГУ в нотации IDEF0: КМ — компьютерная модель; $I1$ — компонентные автоматы; $I2$ — входные и выходные данные структурных элементов; $I3$ — требования к поведению объекта управления; $C1$ — методы верификации модели объекта управления; $C2$ — методы верификации спецификации; $C3$ — методы синтеза управления ДСС; $C4$ — методы анализа ДССГУ; $O1$ — компьютерная модель супервизора и технические требования ДССГУ; $M1$ — проектировщик

Методика автоматизированного проектирования ДССГУ характеризуется следующими особенностями:

- использование компьютерной модели ДССГУ при выполнении всех проектных процедур;
- простота модификации и повторного использования проектных решений;
- ведение базы компьютерных моделей ДССГУ для отслеживания истории их изменений и связей;
- повышение качества проектируемой ДССГУ путём верификации компьютерной модели при выполнении проектных процедур;
- возможность применения компьютерной модели ДССГУ для отслеживания процесса функционирования, модификации и отладки системы управления.

Наличие базы компьютерных моделей ДССГУ, простота модификации и повторного использования проектных решений упрощают выполнение наиболее трудоёмких проектных процедур методики, а также обеспечивают расширяемость проектируемой системы управления. Автоматический синтез управления ДСС и генерация исполняемого кода позволяют применять компьютерные модели ДССГУ на стадии эксплуатации объекта проектирования и обеспечивают возможность динамической реконфигурации СГУ МР для её адаптации к конкретным условиям применения.

В третьей главе диссертации представлен программный комплекс GC-Designer (Group Control Designer), который обеспечивает практическое применение методики автоматизированного проектирования ДССГУ и является прототипом САПР ДССГУ МР.

Предложена и разработана архитектура GC-Designer, основные элементы программного, лингвистического и информационного обеспечения (Рис. 5).

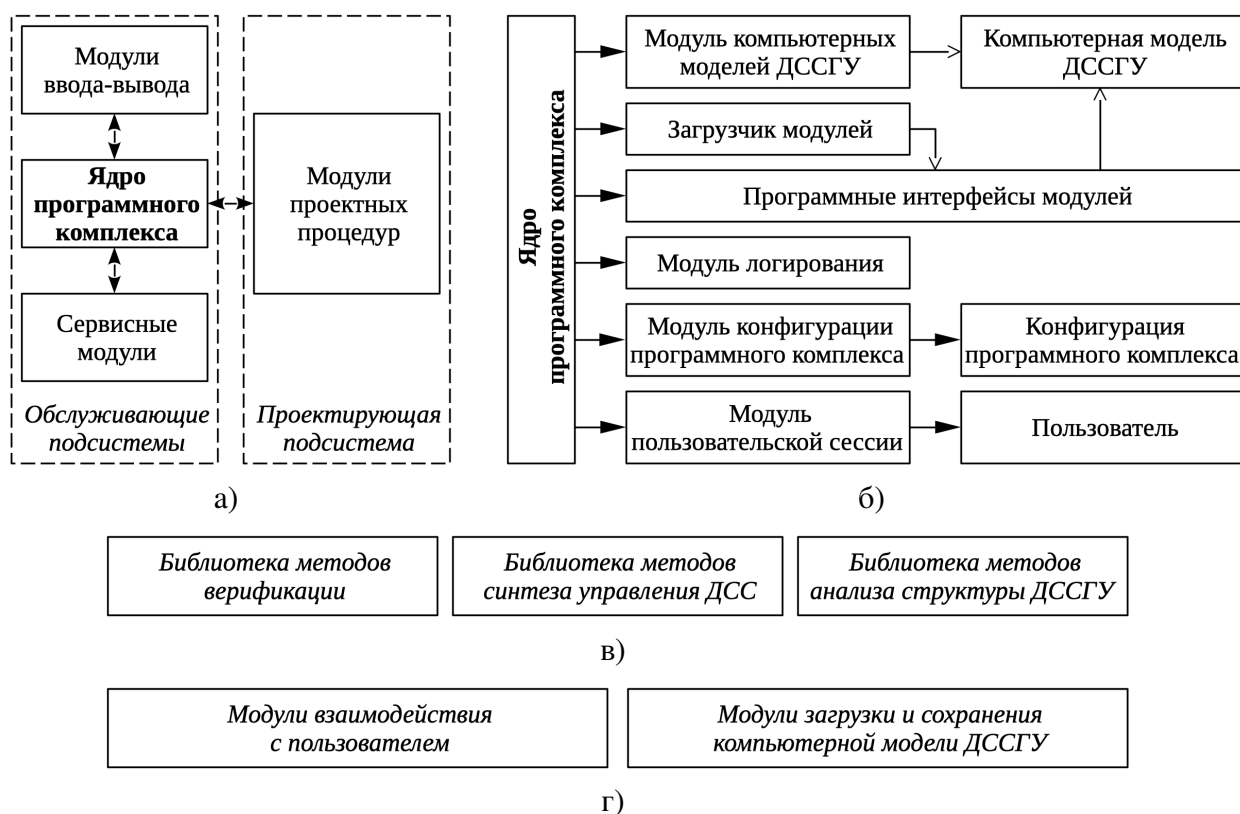


Рис. 5. Архитектура и модули программного комплекса GC-Designer: а) модульная архитектура; б) структура ядра; в) библиотеки модулей проектных процедур; г) библиотеки модулей ввода-вывода

Для GC-Designer предложен и разработан графический интерфейс пользователя (Рис. 6). Разработаны программные средства, которые обеспечивают интерактивное выполнение проектных процедур методики автоматизированного проектирования ДССГУ и упрощают формализацию замысла проектировщика о требуемом поведении группы МР.

Разработан транслятор условных знаков ГИС, который выполняет преобразование плана выполнения групповой задачи, заданного человеком-оператором

на цифровой карте местности, в спецификацию поведения группы МР для верхнего уровня ДССГУ. Транслятор применён в системе управления экспериментальными образцами МР для решения задач экстремальной робототехники (в частности, задачи автономного движения группы МР строем) в рамках выполнения прикладных научно-исследовательских работ.

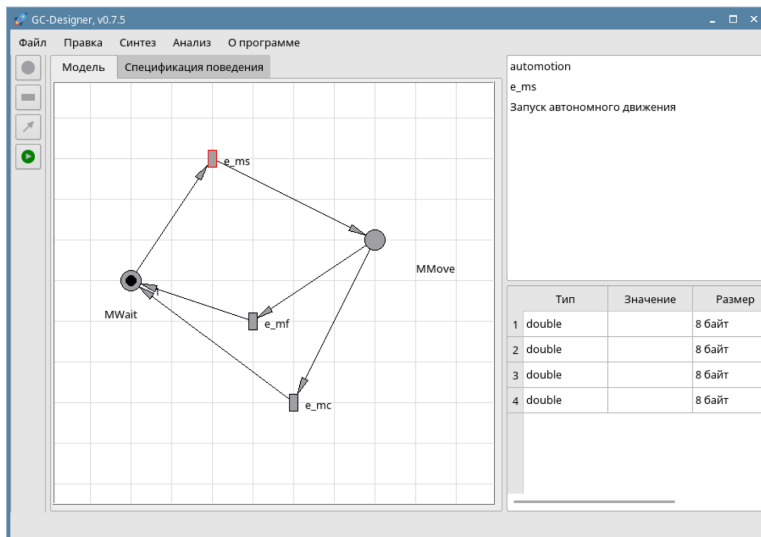


Рис. 6. Графический интерфейс пользователя программного комплекса GC-Designer

Размерность пространства состояний объекта управления $|Q|$ спроектированной ДССГУ равна 12288 и имеет экспоненциальную зависимость от числа роботов в группе, $|Q| = 3 \cdot 2^{4N}$, где N — число роботов. Симуляция работы ДССГУ подтвердила соответствие поведения группы МР требованиям к проектируемой системе управления. Разработанные в процессе проектирования компьютерные модели позволяют выполнить генерацию исполняемого кода для целевой программно-аппаратной платформы и обеспечивают возможность модификации и расширения функциональности ДССГУ.

В третьей главе исследована эффективность разработанного математического, программного и методического обеспечения. Спроектированная ДССГУ модифицирована для управления группой из 100 роботов. Возможности интерактивного графического интерфейса GC-Designer и повторное использование ранее созданных компьютерных моделей обеспечили упрощение наиболее трудоёмких проектных процедур методики автоматизированного проектирования ДССГУ — синтез компьютерной модели объекта управления и спецификацию его поведения. Валидация проектных решений обеспечила раннее выявление ошибок, что позволило повысить качество проектируемой системы управления. Применение модифицированного метода домино в проектной процедуре синтеза управления ДСС обеспечило линейную зависимость времени выполнения этой процедуры от числа МР.

Выполненный анализ подтверждает эффективность разработанного математического, программного и методического обеспечения. Продемонстрированы преимущества разработанной методики автоматизированного проектирования

Разработанное методическое, математическое, программное, лингвистическое и информационное обеспечение применено для автоматизированного проектирования ДССГУ. По представленным в третьей главе требованиям и исходным данным спроектирована ДССГУ для выполнения тремя противопожарными МР группового действия выхода на рубеж с последующим тушением очага пожара.

ДССГУ и программного комплекса GC-Designer: использование компьютерной модели ДССГУ, упрощение выполнения проектных процедур за счёт взаимодействия с визуальным представлением модели, повышение качества объекта проектирования путём верификации проектного решения, ведение базы компьютерных моделей ДССГУ.

В **заключении** диссертации представлены основные результаты работы и общие выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ СГУ как объекта проектирования. Предложена иерархическая структура СГУ, уровни которой выделены в соответствии с их функциональным назначением. Формализовано понятие ДССГУ для обозначения верхних иерархических уровней СГУ. Выполнен обзор известных математических и компьютерных моделей, методов и алгоритмов проектирования ДССГУ.

2. Формализована постановка задачи автоматизированного проектирования ДССГУ, объединяющая задачи синтеза управления ДСС и синтеза модели информационного взаимодействия ДССГУ с объектом управления.

3. Предложена и разработана математическая модель ДССГУ. Модель включает математическое описание контракта информационного взаимодействия структурных элементов системы управления. Предложена и разработана компьютерная модель ДССГУ для синтеза, анализа и графической визуализации объекта проектирования.

4. Предложена и разработана методика автоматизированного проектирования ДССГУ, которая включает: формальную постановку задачи автоматизированного проектирования ДССГУ; математическую и компьютерную модели ДССГУ; проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ. Формализованы четыре проектные процедуры: синтез компьютерной модели объекта управления; спецификация поведения объекта управления; синтез управления ДСС; анализ ДССГУ. Формализованные процедуры используют компьютерную модель ДССГУ для формирования проектного решения и обеспечивают решение задачи автоматизированного проектирования ДССГУ.

5. Предложена и разработана архитектура прототипа САПР ДССГУ МР, а также программное, лингвистическое и информационное обеспечение прототипа для работы с компьютерной моделью ДССГУ. Создан программный комплекс GC-Designer, обеспечивающий практическое применение методики автоматизированного проектирования ДССГУ.

6. Созданное методическое, математическое, программное, лингвистическое и информационное обеспечение применено при автоматизированном проектировании ДССГУ для задач экстремальной робототехники. Анализ процесса проектирования и полученного проектного решения подтверждает эффективность и высокую практическую значимость методики автоматизированного проектирования ДССГУ и программного комплекса GC-Designer.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Волосатова Т. М., Козов А. В., Рыжова Т. П. Исследование комбинированного метода управления строем наземных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 4. С. 52–56. (0,7 п.л. / 0,5 п.л.).
2. Волосатова Т. М., Козов А. В. Особенности методов распознавания образов в автоматической системе управления поворотом мобильного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 2. С. 104–110. (1,3 п.л. / 1,0 п.л.).
3. Тачков А. А., Козов А. В., Панков С. Е. Транслятор тактической задачи в сеть Петри для группы наземных робототехнических комплексов // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 4. С. 728–733. (0,9 п.л. / 0,4 п.л.).
4. Тачков А. А., Вуколов А. Ю., Козов А. В. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу семейства «Эльбрус» // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 655–664. (1,3 п.л. / 0,5 п.л.).
5. Волосатова Т. М., Козов А. В., Тачков А. А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 5. С. 274–282. (1,5 п.л. / 1,2 п.л.).
6. Козов А. В. Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами // Автоматизация процессов управления. 2021. № 1. С. 130–139. (1,3 п.л.).
7. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения / А. А. Тачков, А. В. Козов, Д. С. Яковлев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 2. С. 121–132. (1,1 п.л. / 0,2 п.л.).
8. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления / А. А. Тачков, А. В. Козов, С. Ю. Курочкин [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2022. Т. 10, № 1. С. 43–54. (1,1 п.л. / 0,4 п.л.).
9. Козов А. В., Мельникова М. В. Применение методов синтеза супервизора при проектировании дискретно-событийной системы группового управления мобильными роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11, № 2. С. 110–117. (1,1 п.л. / 0,8 п.л.).

Публикации, проиндексированные в Scopus

10. Kozov A. V., Volosatova T. M., Tachkov A. A. Method of the Dynamic Reconfiguration of a Group Control System for Mobile Robots // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, September 05–11. IEEE, 2021. P. 991–996. (1,1 п.л. / 0,9 п.л.).