Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

На правах рукописи



Галин Ринат Романович

МЕТОД И АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Специальность 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук, профессор
Мещеряков Роман Валерьевич

Москва 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1. КОЛЛАБОРАТИВНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 14
1.1. Общее описание технических систем типа человек-робот 14
1.2. Анализ подходов к решению проблем группового управления в робототехнических системах 30
1.3. Коллаборативная многоагентная робототехническая система 41
1.4. Принципы коллективного управления в команде КРТС 45
1.5. Постановка задачи исследования 48
1.6. Выводы по Главе 1 48
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КРТС 50
2.1. Система управления КРТС 50
2.2. Метод распределения работ в смешанной неоднородной команде КРТС 61
2.3. Выводы по Главе 2 72
ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕКОЙ СИСТЕМЕ 74
3.1. Алгоритм распределения работ в КРТС с минимизацией затрат 74
3.2. Сравнение предложенного метода и алгоритма распределения работ с минимизацией затрат с существующими решениями 76
3.3. Алгоритм распределения работ в КРТС с минимизацией их времени выполнения 90
3.4. Сравнительный анализ алгоритмов распределения работ с минимизацией их времени выполнения 99
3.5. Выводы по Главе 3 113
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ 115

4.1. Распределение работ в КРТС с минимизацией затрат 116
4.2. Распределение работ в КРТС в рамках технологического процесса для минимизации времени его выполнения..... 120
4.3. Натурный эксперимент 123
4.4. Выводы по Главе 4 129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 131
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ 135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... 155
ПРИЛОЖЕНИЕ В 157
ПРИЛОЖЕНИЕ Г..... 159
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 161
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж..... 163

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одним из основных направлений реализации так называемой Четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) являются активно осуществляемая автоматизация и роботизация производств, а также интенсивное внедрение робототехнических решений в повседневную деятельность человека. Роботизированные решения позволяют совершенствовать имеющиеся технологические процессы, освобождая человека от трудоемкой, рутинной и опасной работы. Монотонный рабочий процесс, требующий постоянного внимания или тяжелого физического труда, заменяется работой роботов, что позволяет снижать влияние человеческого фактора на принятие решений и выполнений работ на предприятиях. Вместе с тем увеличение функциональных возможностей роботов позволяет применять их в различных сферах повседневной деятельности человека, автоматизируя некоторые действий в быту и сокращая время их выполнения.

Наибольшее распространение и развитие в индустриальном секторе получили роботы-манипуляторы (т.н. функциональные роботы). На протяжении последних десятилетий основными направлениями развития функциональной робототехники являлись:

- добавление нового функционала и повышение гибкости в принятии решений и выполнении технологических операций;
- уменьшение габаритов для интеграции роботов данного типа в различные технологические;
- развитие проактивности и автономности деятельности, связанных с целеполаганием и планированием действий, средствами коммуникации на различных уровнях и системами поддержки принятия решения.

В настоящее время перспективными направлениями развития роботов манипуляторного типа является их интеллектуализация и добавление поддержки

интерактивных действий для взаимодействия с человеком. Интеллектуализация робототехнических систем выражается в наличии широкого ассортимента искусственных органов чувств и эффекторов. Это позволяет увеличивать эффективность принятия роботами комплексных решений и повышать безопасность их действий для человека в процессе взаимодействия. Интерактивность действий предполагает взаимодействие роботов с людьми для выполнения общей задачи в рамках единого рабочего пространства и рабочего процесса. Необходимость наличия интерактивных способностей робота обусловлено тем, что в некоторых случаях добиться полной автоматизации на производстве в настоящее время невозможно, и роль человека в производственном процессе не может быть исключена полностью.

Примером подобных интерактивных роботов, обладающих набором датчиков и непосредственно предназначенных для решения производственных задач совместно с человеком, являются коллаборативные роботы (коботы). Системы, в которых коботы и люди выполняют совместно общие задачи, называют коллаборативными робототехническими системами (КРТС). Коботы способны работать в коллаборации с человеком в едином рабочем пространстве без риска нанесения вреда человеку и обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными промышленными или функциональными роботами в том числе меньшими габаритами, возможностью быстрой перенастройки для выполнения различных производственных операций, а также наличием возможности обучения выполнению действий человеком. Дополнительным преимуществом коллаборативных роботов является встроенные силомоментные датчики для предотвращения возможности нанесения вреда здоровью человека в ходе коллаборации.

Для решения вопроса повышения эффективности взаимодействия человека и робота и управления коллаборативными робототехническими системами широко применяется теория многоагентных систем, при этом коботы рассматриваются в качестве интеллектуальных роботов. Преимуществом многоагентного подхода к управлению КРТС является повышение вероятности успешного выполнения

общей задачи людьми и коботами, так как работы распределяется и перераспределяются между агентами в зависимости от текущего состояния системы и его изменений. Кроме того, существует большое количество исследований, посвященных анализу управления командами людей как организационными системами и построению соответствующих систем управления.

В открытых источниках отсутствуют упоминания об анализе коллаборативных робототехнических систем с точки зрения смешанной команды, в состав которой входят два разнородных типа участников – люди и коботы. В этом случае КРТС приобретает свойства организационно-технической системой, а актуальными вопросами становятся рассмотрение задачи формирования подобных команд, построение эффективной системой управления, а также разработка новых методов и алгоритмов для повышения эффективности распределения работ в подобных смешанных неоднородных командах, производительности труда и сокращения времени выполнения задач людьми и коботами при их коллаборации.

Среди ученых, которые внесли неоценимый вклад в развитие направления коллаборативной робототехники, необходимо отметить Ющенко А.С., Ронжина А.Л., Южакова А.А., Подураева Ю.В., Магида Е.А., иностранных ученых Деккера К., Коэна Ф., Велосо М., Халил В., Хоффман Г. и др. Вместе с тем в направлении многоагентного и группового управления работают Андрианов Ю.Д., Попов Е.П., Юревич Е.И., Макаров И.М., Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р., Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Ермолов И.Л., Манько С.В. и др.

Объектом исследования является взаимодействие людей и коллаборативных роботов в коллаборативной робототехнической системе.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы.

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования коллаборативной робототехнической системы за счет

разработки и внедрения авторских методов и алгоритмов распределения работ среди ее участников.

Для достижения сформулированной цели требуется выполнить следующие **задачи диссертации**:

1. Провести анализ существующих способов, методов и алгоритмов распределения работ в робототехнических системах, в том числе коллаборативных, а также существующих систем управления и их структур.

2. Разработать структуру гибридной системы управления коллаборативной робототехнической системы с целью эффективного распределения работ в смешанной неоднородной команде в случае применения централизованной и децентрализованной стратегий управления.

3. Разработать метод и реализующие его алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, обеспечивающие повышение эффективности коллаборации участников КРТС за счет минимизации временных, финансовых и/или энергетических затрат и сокращения времени выполнения операций технологического процесса.

4. Провести численные и натурный эксперименты с апробацией разработанных метода и алгоритмов распределения работ в рамках коллаборативного взаимодействия участников КРТС.

Методы исследования

При проведении исследований были использованы: методы теории автоматического управления, методы оптимального управления, методы линейного программирования и элементы теории множеств и теории дискретных систем, методы имитационного моделирования, методы оптимизации. Теоретические исследования подтверждены апробацией разработанных метода и алгоритмов в численных (моделирование) и натурном (на базе роботизированной ячейки реального производственного объекта) экспериментах.

Научная новизна полученных результатов заключается в разработке:

1. Новой структуры системы управления модульного типа для коллаборативной робототехнической системы, учитывающей неоднородность

участников коллаборативной робототехнической системы и применимой для случаев использования централизованной и децентрализованной стратегий управления.

2. Метода распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы, отличающегося возможностью учета различных функций затрат участников неоднородной команды, взаимной зависимости данных функций, а также ограниченности активности участников КРТС.

3. Алгоритма распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, отличающегося возможностью учета различий в виде функций затрат разнородных типов участников, и обеспечивающего повышение эффективности ее функционирования за счет минимизации временных, финансовых и/или энергетических затрат.

4. Алгоритма распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы, отличающегося возможностью задания минимально и максимально возможного состава исполнителей для каждой конкретной операции, а также одновременного построения и обновления сетевой модели технологического процесса (в виде ориентированного графа) и временной последовательности выполнения операций.

Практическая значимость диссертационной работы

Диссертационная работа имеет практическую значимость на производственных предприятиях в условиях частичной роботизации для повышения эффективности производственных процессов.

Разработанная структура системы управления позволяет рассматривать КРТС в качестве неоднородной смешанной командой с двумя типами участников как централизованным, так и с децентрализованным управлением. Основное преимущество предложенной системы управления заключается в ее модульности, т.е. в возможности оперативно изменять состав участников, добавляя в КРТС или удаляя из нее роботов и людей, за счет наличия единых для всех элементов системы стандартов обработки и передачи данных.

Предложенные метод и алгоритмы распределения работ в неоднородной смешанной команде КРТС позволяют обеспечить эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы, учитывая разнородность функций затрат людей и роботов, а также различия в эффективности выполнения участниками различных видов работ. Использование разработанных метода и алгоритмов позволяет назначать на выполнение работ тех участников, для которых эффективность выполнения данных работ будет максимальной, а затраты, рассчитываемые по задаваемым функциям – минимальными.

Новый алгоритм распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, представленных в виде сетевой модели технологического процесса, позволяет сократить как время выполнения отдельных операций, предполагающих коллаборацию людей и роботов, так и всего технологического процесса, в том числе в условиях необходимости параллельного выполнения нескольких операций, наличия ограничений максимально возможного количества задействуемых для конкретной операции работников и коботов, состояний занятости участников смешанной неоднородной команды, а также необходимости сокращения времени выполнения отдельной операции при увеличении состава исполнителей.

Результаты, выдвигаемые для защиты:

1. Структура системы управления модульного типа для смешанных неоднородных команд КРТС с поддержкой централизованных и децентрализованных стратегий управления.
2. Метод распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы, обеспечивающий минимизацию затрат (денежные средства, ресурсы и др.).
3. Алгоритм распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы для повышения эффективность ее функционирования за счет минимизации затрат.
4. Алгоритм распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы для минимизации времени выполнения технологического процесса, представленного в виде сетевой модели.

Положения, выдвигаемые для защиты:

1. Повышение эффективности управления участниками неоднородных коллаборативных команд возможно за счет внедрения и использования системы управления модульного типа с поддержкой централизованных и децентрализованных стратегий управления.

2. Минимизация финансовых и/или энергетических затрат при выполнении работ (операций) в смешанной неоднородной команде возможно за счет применения метода и алгоритма распределения работ в КРТС на основе модифицированных производственных функций затрат Кобба-Дугласа, учитывающих разнородность функций затрат для гетерогенных исполнителей, ограниченную активность участников команды и зависимость затрат одного типа от числа исполнителей другого типа.

3. Минимизация времени выполнения технологического процесса, представленного в виде сетевой модели, возможна за счет применения алгоритма минимизации времени выполнения его отдельных операций за счет построения временной последовательности операций. Алгоритм должен учитывать минимально и максимально возможный состав исполнителей, зависимость времени выполнения операции от числа назначенных на нее исполнителей, различия в эффективности выполнения операций исполнителями, а также случаи параллельного выполнения нескольких операций (последовательностей операций) одновременно.

Апробация работы

Диссертационная работа и ее основные результаты обсуждались и докладывались на следующих научных международных, всероссийских конференциях и семинарах:

1. 13-е Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва, 2019 г.);

2. Международная конференция MIP: Engineering (Красноярск, 2019, 2020 гг.);

3. Международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения» (Санкт-Петербург, 2019, 2020, 2021 гг.);

4. Международная научно-практическая конференция молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (Тольятти, 2019 г.);

5. Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника» (Санкт-Петербург, 2019 г.);

6. Международная конференция по интерактивной коллаборативной робототехнике «ICR-2020» (Санкт-Петербург, 2020 г.);

7. Международная научная конференция «FarEastCon» (Владивосток, 2020 г.);

8. Международная конференция «Futuristic Trends in Network and Communication Technologies» (Таганрог, 2020 г.);

9. Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (Сочи, 2020 г.);

10. Международная научно-практическая конференция «Поповские чтения» (Москва, 2019, 2021 гг.);

11. Международная научная конференция «Вычислительные методы в системах и программном обеспечении (The Computational Methods in Systems and Software 2021)» (Всетин, Чехия, 2021 г.);

12. Мультиконференция по проблемам управления (Дивноморское, Геленджик, 2021 г.).

13. Международная конференция по интерактивной коллаборативной робототехнике «ICR-2022» (Фучжоу, Китай, 2022 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа выполнена в рамках специальности 2.5.4 – Роботы, мехатроника и робототехнические системы (п. 1. Развитие теоретических основ и методов анализа, структурного и параметрического синтеза и автоматизированного проектирования роботов и робототехнических систем; п. 4. Математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая

взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования; п. 5. Методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление; п. 10. Интерфейсы и методы взаимодействия человека с роботами. Методы эффективной и безопасной совместной работы человека и роботов. Коллаборативные роботы; п. 11. Методы и средства автоматизированного проектирования, анализа и оптимизации роботизированных систем, комплексов, ячеек и линий. Исследование, повышение эффективности и безопасности эксплуатации автоматизированных технологических процессов, создаваемых на базе робототехнических и мехатронных систем).

Публикации по теме диссертационной работы

Результаты диссертационной работы отражены в 20 научных статьях, в том числе в 3 публикациях в изданиях из перечня ВАК РФ, 12 статей из перечня научных изданий, индексируемых в международных наукометрических базах данных Web of Science и/или Scopus. По результатам работы получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад

Основные научные результаты получены лично автором. Постановка задачи исследования осуществлялась совместно с научным руководителем профессором Мещеряковым Р. В. Разработка метода повышения эффективности функционирования неоднородной смешанной команды осуществлялась совместно со старшим научным сотрудником ИПУ РАН Широким А. А.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работ составляет 163 печатных страниц, 47 рисунков, 17 таблиц. Список литературы содержит 153 наименования.

В **Главе 1** рассматривается общее описание технической системы комплексной структуры, в состав которой входит человек и коллаборативный робот, формируя смешанную неоднородную команду робототехнической системы.

Описываются коллаборативные роботы и техническая система типа человек-робот, а также обосновывается актуальность задачи повышения эффективности распределения работ в коллаборативной робототехнической системе. Исследованы области рабочего пространства различных коллаборативных роботов манипуляторного типа, дана классификация принципов и аспектов безопасности взаимодействия в коллаборативном пространстве. Проведен анализ подходов к решению проблем группового управления в робототехнических системах для выбора и использования при управлении смешанной неоднородной команды в КРТС.

В **Главе 2** на основе проведенного анализа предлагается структура системы управления модульного типа для коллаборативной робототехнической системы, учитывающей неоднородность участников КРТС. Описывается разработанный метод распределения работ в смешанной неоднородной команде КРТС, в том числе для случаев различных функций затрат у коботов и людей, ограниченной активности участников команды и зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот же вид работ участников другого типа.

В **Главе 3** представлены алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе. Алгоритм распределения работ на основе производственных функций участников предназначен для минимизации затрат, а другой представленный алгоритм позволяет минимизировать время выполнения технологического процесса, представленного в качестве сетевой модели, и его отдельных операций.

В **Главе 4** приведены результаты численных и натурного экспериментов с использованием согласно разработанных метода и алгоритмов распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы.

В **заключении** подведены итоги выполненной исследовательской работы.

ГЛАВА 1. КОЛЛАБОРАТИВНАЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

1.1. Общее описание технических систем типа человек-робот

При описании любой технической системы следует, в первую очередь, вести понятие этой системы по отношению к конкретному рассматриваемому объекту исследования. В диссертации рассматривается техническая система, элементами которой являются роботы, оснащенные манипуляторами. Само понятие «система» [1] представляет собой множество взаимосвязанных элементов, обладающих общим (системным) свойством, не сводящимся к свойствам этих элементов. В свою очередь, «техническая система», по определению Ю. П. Саламатова [2] – это совокупность упорядоченно взаимодействующих элементов, обладающих свойствами, не сводящимися к свойствам отдельных элементов, и предназначенных для выполнения определенных полезных действий (функций).

Робот представляет собой техническую систему, способную выполнять полезные действия, однако для полноты в составе подобной системы необходимо также рассматривать человека, обладающего когнитивными способностями для передачи команд роботу. Таким образом, можно сделать вывод, что человек и робот представляют собой комплексную работоспособную техническую систему типа человек-робот (Рис. 1.1.).

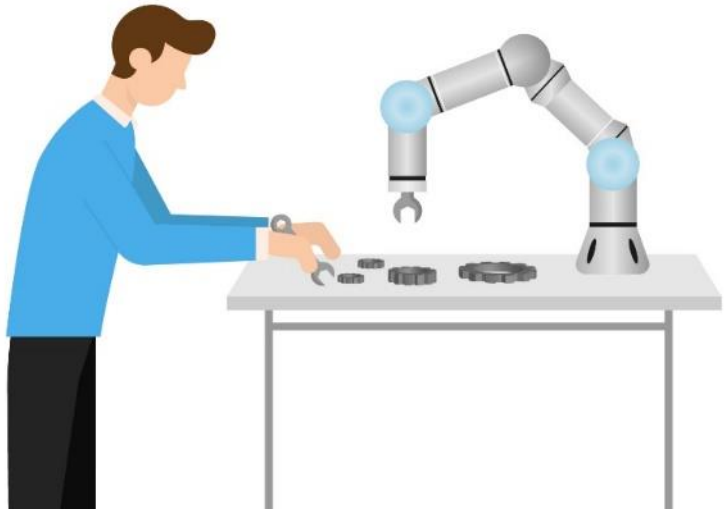


Рис. 1.1. Комплексная техническая система типа человек-робот

Для понимания комплексности рассматриваемой технической системы необходимо учитывать следующие составляющие этой системы:

- технологический процесс, представленный в виде совокупности действий с четко определенным порядком и условиями их выполнения;
- материальные технические объекты и подсистемы разного уровня;
- операторы, оказывающие воздействие на систему в целом и/или на одну или несколько из ее подсистем;
- объекты управления, на которые оказывают воздействие элементы системы;
- среда, необходимая для функционирования системы.

Представленный состав рассматриваемой технической системы позволяет рассматривать ее с точки зрения работоспособности и комплексности. Иными словами, можно сказать, что техническая система – это взаимосвязь разнородных частей системы, ресурсов для ее функционирования и команд, обеспечивающих взаимодействие элементов между собой и с окружающей средой. На Рис. 1.2 представлена упрощенная схема комплексной технической системы, элементами которой являются человек и робот.

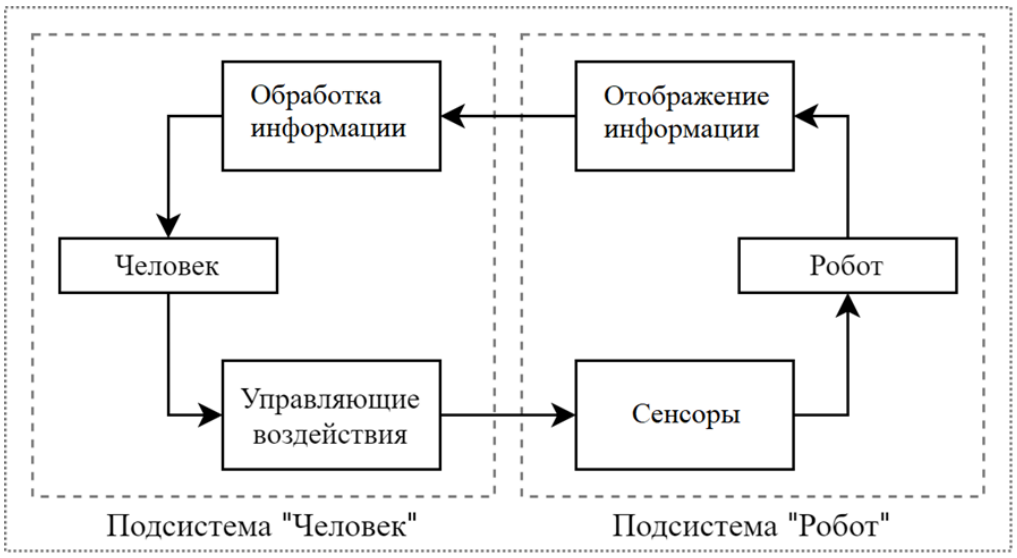


Рис.1.2. Схематичное представление комплексной системы типа человек-робот

В подобных системах подсистема «Человек» включает в себя не только самого работника, но и блок обработки информации от робота о ходе выполнения задач, а также блок управляющих воздействий, направляемых коботу как в явном (в виде передачи команд), так и в неявном виде (например, за счет подстраивания работы кобота под действия человека). В свою очередь, подсистема «Робот» состоит из самого кобота, блока управления, осуществляющего прием и обработку управляющих воздействия от человека и выдачу команд для актуаторов и манипулятора, а также блока отображения информации для подготовки и передачи человеку необходимых данных о текущем состоянии робота и ходе выполнения работы [3, 4]. Присутствие человека в контуре системы позволяет рассматривать такую систему в качестве эргатической робототехнической системы. В дальнейшем подобные системы будем обозначать в качестве коллаборативных робототехнических систем (КРТС).

1.1.1. Взаимодействие человека и коллаборативного робота

В настоящее время передача всех производственных функций роботу и создание полностью автономных автоматических роботизированных предприятий невозможно. Это, в первую очередь, связано с различными свойствами обрабатываемых материалов и деталей и сложностью их обработки. Таким образом, задача полной автоматизации процессов сборки и обработки произвольного количества деталей с разными свойствами, остается нерешенной [5]. В настоящее время подобные операции чаще всего до сих пор осуществляются работниками вручную, а в качестве временного и компромиссного решения осуществляют частичную автоматизацию подобных технологических процессов. При этом возникла необходимость использования для этих целей таких роботов, совместная и целенаправленная деятельность которых в едином рабочем пространстве с людьми была бы заведомо безопасной.

В связи с этим возникло понятие «коллаборативное взаимодействие», обозначающее процесс безопасного производственного «сотрудничества» человека и робота, а роботов, предназначенных для коллаборации с человеком, называют коллаборативными (или коботами) [6, 7]. В дальнейшем значение термина «коллаборативный робот» претерпело изменения в литературе, связанные с понятием «копирующего» движения робота до программируемого робота манипуляционного типа. Первоначально термин «коллаборативный робот» использовался для обозначения промышленного манипулятора, который в рамках исследовательского проекта означал «робота, работающего с человеком, рука об руку» [8].

Коллаборативные роботы позволяют обеспечить сокращение временных, финансовых и других затрат для производственного и технологического процессов, работая вместе с людьми, а не заменяя их [9]. На Рис. 1.3 представлены примеры коллаборативных роботов манипуляторного типа, их технические характеристики описаны в Таблицах 1.1, 1.2 и 1.3 соответственно.







а) Кобот Fanuc CR-7iA/L б) Кобот Universal Robots UR5e в) Кобот Rethink Robotics

Рис. 1.3. Коллаборативные роботы манипуляторного типа

Таблица 1.1. Характеристики кобота Fanuc CR-7iA/L [10]

Параметр (характеристика), единица измерения	**Значение**
Максимальная грузоподъемность, кг.	7
Максимальный охват, мм.	911
Количество степеней свободы	6
Отклонения при повторении, мм.	± 0,01
Подвижность элементов	J1 – 340; J2 – 166; J3 – 384; J4 – 380; J5 – 240; J6 – 720
Максимальная угловая скорость элементов, °/с.	J1–J6 – 500
Момент силы J4, Н·м.	16,6
Момент инерции J4, кг·м^2.	0,47
Момент силы J5, Н·м.	16,6
Момент инерции J5, кг·м^2.	0,47
Момент силы J6, Н·м.	9,4
Момент инерции J6, кг·м^2.	0,15
Масса, кг.	55
Средняя потребляемая мощность, кВ.	0,5
Уровень защиты	IP67

Таблица 1.2. Характеристики кобота Universal Robots UR5e [11]

Параметр (характеристика), единица измерения	**Значение**
Максимальная грузоподъемность, кг.	5
Максимальный охват, мм.	850
Количество степеней свободы	6
Отклонения при повторении, мм.	± 0,1
Подвижность элементов	J1– J6 – 360
Максимальная угловая скорость элементов, °/с.	J1– J6 – 180
Уровень шума, дБ.	72
Диаметр у основания, мм.	149
Температура эксплуатации, °С.	0–50
Масса, кг.	18,4
Средняя потребляемая мощность, кВ.	0,15
Уровень защиты	IP54

Таблица 1.3. Характеристики кобота Rethink Robotics [12]

Параметр (характеристика), единица измерения	**Значение**
Максимальная грузоподъемность, кг.	4
Максимальный охват, мм.	1260
Количество степеней свободы	7
Отклонения при повторении, мм.	± 0,01
Подвижность элементов, °.	J1–J4 – 350; J5– J6 – 340; J7 – 540
Температура эксплуатации, °С.	5–40
Средняя потребляемая мощность, кВ.	0,5
Уровень защиты	IP54

Применение коботов при выполнении работ совместно с человеком способствует снижению рисков нанесения ущерба здоровью человека за счет ограничения мощности и силовых возможностей данных роботов до безопасных уровней. Такие роботы применяют обратную связь по усилию, малоинерционные серводвигатели, упругие исполнительные механизмы и технологию обнаружения и исключения потенциальных столкновений [13].

Рабочее пространство для безопасного взаимодействия с коллаборативным роботом должно проектироваться с точки зрения эргономики рабочего места. Наличие технических объектов и дополнительного оборудования в рабочем пространстве не должно создавать угрозу безопасности человека. Для КРТС определены различные области рабочего пространства, которые представлены на Рис. 1.4.

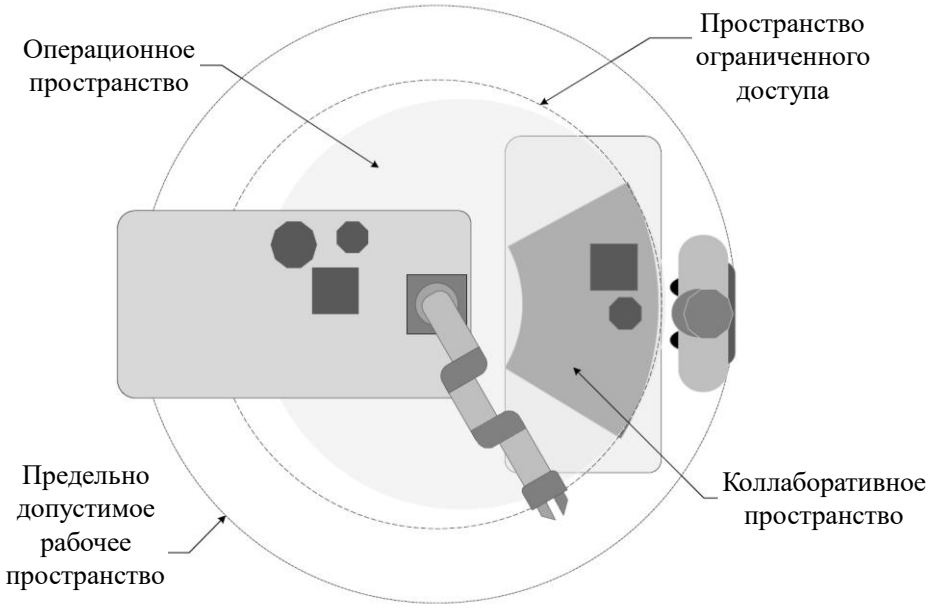


Рис. 1.4. Области рабочего пространства коллаборативной робототехнической системы

Выделенные области рабочего пространства можно описать следующим образом [14]:

- предельно допустимое рабочее пространство – пространство, которое определяется максимальным значением радиуса коллаборативного робота, т.е. зона досягаемости с учетом элементов захвата, установленных на фланце кобота;
- пространство ограниченного доступа – зона рабочей области в рамках предельно допустимого рабочего пространства, обусловленная наличием элементов робототехнической системы. В рабочее пространство, помимо коботов и оператора, также могут включаться инструменты, кабели, рабочее место и пр. [15];

- операционное пространство – рабочая область, в которой коллаборативный робот производит действия;
- коллаборативное пространство – рабочая зона совместных одновременных/параллельных операций коллаборативного робота и человека.

В процесс проектирования КРТС в обязательном порядке учитываются следующие четыре ключевых принципа взаимодействия человека и кобота (HRC – Human-Robot Collaboration):

- операции, выполняемые коботом, должны быть безопасны по отношению к другим участникам, расположенным в области рабочего пространства (в первую очередь, к человеку-оператору), а также к объектам внешней среды;
- робот должен приспосабливаться к человеку, а не наоборот. В случае, если КРТС функционирует недостаточно эффективно, необходимо вносить изменения в рабочий процесс робота;
- должны создаваться такие условия, при которых любой человек–оператор в области рабочего пространства мог бы максимально использовать возможности кобота;
- следует добиваться повышения производительности труда и снижения вероятности возникновения ошибок за счет эргономического дизайна и/или упрощения конструкции робота.

Простейшая КРТС – это роботизированная ячейка, которую можно рассматривать в качестве отдельной производственной единицы на предприятии, обладает уникальными свойствами, в первую очередь, связанными с гетерогенностью двух типов входящих в ее состав участников – людей и коботов. Эти разнородные члены команды могут использовать различные подходы к выполнению производственных операций: коботы действуют на основании имеющейся программы, и их действия повторяются для одинаковых операций, в то время как люди могут использовать креативность и нестандартные подходы к выполнению работ. Второй значимой особенностью КРТС является необходимость

соблюдения мер безопасности и вытекающие из этого особенности размещения рабочего пространства людей и технические спецификации коботов (наличие силомоментных датчиков, контроль скорости движения и т.д.). Рассмотрим подробнее вопрос обеспечения безопасности взаимодействия коботов и людей в составе КРТС.

1.1.2. Безопасность взаимодействия человека и коллаборативного робота

Основные нормативные документы в области безопасного взаимодействия людей и коботов, включая классификацию роботов и сферы их применения, а также критерии отнесения роботов к источникам повышенной опасности, описаны в [16, 17].

В настоящее время существует более 700 различных стандартов и правил, которые распространяются на роботов и робототехнические устройства, в том числе на мехатронные и коллаборативные робототехнических систем. В Таблице 1.4 представлены обзор и классификация основных стандартов безопасности, определяющих базовые правовые основы безопасности взаимодействия человека и робота в едином рабочем пространстве для роботизированных решений [18].

Таблица 1.4. Классификация основных стандартов безопасности взаимодействия человека и робота

Класс	**Стандарт**	**Описание**
A	ISO 12100:2010 [19]	В представленных стандартах описываются основные требования и понятия по безопасности эксплуатации, принципы конструирования робототехнических систем и общие положения, которые могут быть применимы к техническим системам.
	IEC 61508–1 [20]	

Продолжение Таблицы 1.4

B1	ISO 13849–1:2015 [21]	В категорию B1 включены стандарты по конкретным аспектам безопасности (например, безопасное расстояние, уровень шумов, безопасная температура поверхности и т.п.).
	IEC 62061:2021 [22]	
B2	ISO 13850:2015 [23]	К данной категории относятся стандарты, регламентирующие требования по защитным устройствам (например, средства управления, устройства блокировки, датчики давления, защитные ограждения и т.п.).
	ISO 13851:2019 [24]	
C	ISO 10218–1,2:2011 [16]	Нормативные документы распространяются на роботов и робототехнические устройства, а также пространство, где они установлены. Направлены на повышение функциональной совместимости роботов и относящихся к ним компонентов.
	ISO TS 15066:2016 [15]	

Обеспечение безопасного взаимодействия в коллаборативных робототехнических системах включает в себя следующие аспекты [25]:

- безопасность при столкновении должна быть обеспечена таким образом, чтобы столкновения между роботами, людьми и препятствиями были «безопасными», то есть контролируемыми. Главной задачей является ограничение сил/воздействий, оказываемых на людей.
- активная безопасность для своевременного обнаружения неизбежных столкновений между людьми и роботами и контролируемого прекращения эксплуатации. Для этого могут быть использованы датчики приближения, системы наблюдения и датчики силы/контакта.
- адаптивная безопасность для вмешательства в работу аппаратной части и применения корректирующих воздействий, приводящих к предотвращению столкновений без остановки работы робота.

– В настоящее время все коллаборативные роботы обладают следующим обязательным набором функций безопасности [26] (Рис. 1.5):
– «Безопасная контролируемая остановка» – робот останавливается, когда человек-оператор появляется в совместном рабочем пространстве, и продолжает работу, когда рабочее пространство становится свободным (при непосредственном взаимодействии оператора с роботизированной системой);
– «Ручное управление» – движения робота контролируются человеком-оператором (оператор использует ручное устройство для передачи команд);
– «Контроль скорости и разделения» – обеспечение возможности одновременного перемещения в совместном рабочем пространстве оператора и роботизированной системы;
– «Ограничение мощности и силы» – сила столкновения человека-оператора и движущегося робота ограничена безопасным уровнем (физический контакт между роботом и человеком может происходить как намеренно, так и непреднамеренно).

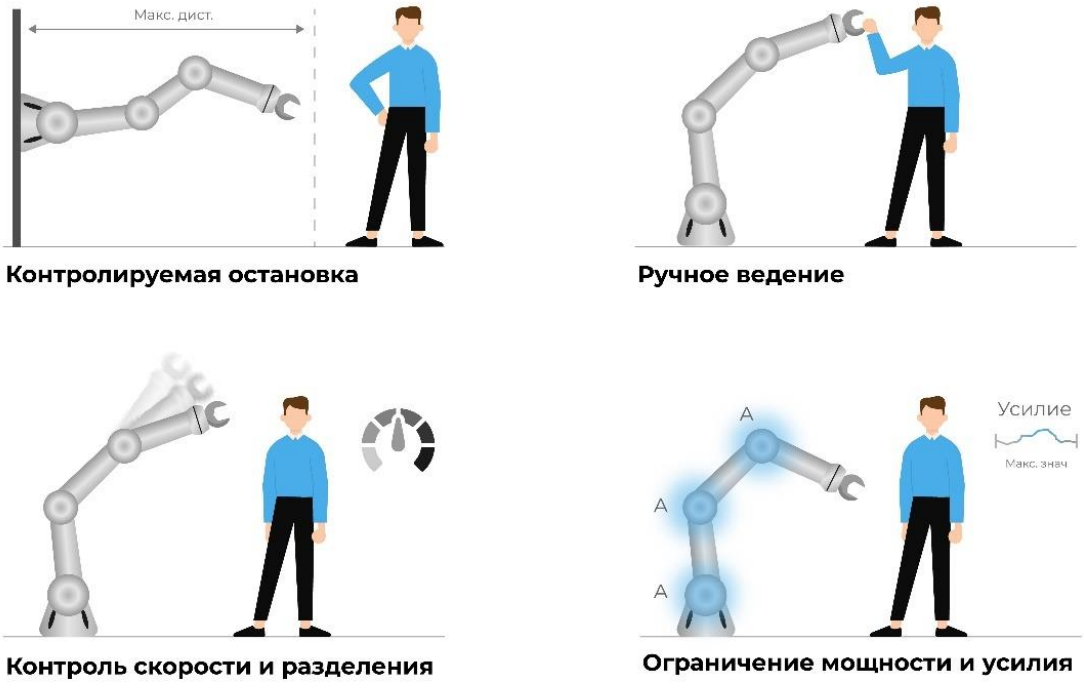


Рис. 1.5. Обязательные функции коллаборативных роботов, направленные на обеспечение безопасности человека

Несмотря на наличие регламентированных стандартных ISO, вопрос повышения безопасности взаимодействия человека и кобота в рамках КРТС, в том числе с учетом используемых методов и систем управления, а также человеческого фактора в рабочем процессе, продолжает оставаться актуальной. В частности, в работе [27] рассматриваются группы методов управления в технических системах, обеспечивающие требуемый уровень безопасности за счет реализации дополнительных функций по управлению движением, планированию и прогнозированию движений робота.

Кроме того, разрабатываются также дополнительные методы организационного управления. Так, в работе [28] предлагается проводить анализ психологических характеристик операторов, в том числе с помощью психологических вопросников и анализа поведенческих показателей. Отмечается, что для предотвращения возможного вреда человеку важно выявлять его психофизиологическое состояние человека в ходе взаимодействия с роботом и соответствующие психологические аспекты и факторы, например боязнь работы с роботом, наличие и уровень усталость, имеющийся неудачный опыт работы с робототехническими решениями и т.д.

1.1.3. Различия промышленных и коллаборативных роботов

Промышленные роботы также используются в производстве, но их эксплуатация не подразумевает совместную работу с человеком. Они, по существу, являются автоматически управляемыми, перепрограммируемыми универсальными манипуляторами [29]. В свою очередь, коллаборативный робот предполагает интерактивную совместную деятельность с человеком, а сфера его применения значительно шире. Однако по сравнению с промышленными роботами коботы менее точны, их движения более медленные из-за ограничений требований безопасности, а совокупное рабочее пространство меньше, чем у промышленных

роботов [30, 31]. В Таблице 1.5 представлено качественное сравнение промышленных и коллаборативных роботов манипуляторного типа.

Таблица 1.5. Качественное сравнение коботов и промышленных роботов манипуляторного типа

Характеристики	**Промышленные роботы**	**Коллаборативные роботы**
Тип установки	Фиксированный	Мобильный
Тип выполняемых задач	Только повторяющиеся	Повторяющиеся и неповторяющиеся
Смена выполняемых задач	Редко	Часто
Взаимодействие с оператором	Только во время программирования	Часто и безопасно
Мелкосерийное и штучное производство	Не выгодно	Выгодно
Доступные габаритные размеры	Маленькие или большие	Только маленькие
Скорость работы	От медленной до высокой	Медленная (ограничена в соответствии с требованиями стандартов безопасности)
Цена	Сравнительно низкая	Сравнительно высокая
Грузоподъемность	Сравнительно высокая	Сравнительно низкая
Сложность и скорость программирования	Высокая сложность, низкая скорость	Низкая сложность, высокая скорость
Обслуживание (время и стоимость)	Больше	Меньше
Вес робота	Больше	Меньше
Датчики безопасности и внешних сил	Обычно отсутствуют	Входят в состав робота
Доступное рабочее пространство	Больше	Меньше

Таким образом, для реализации принципов коллаборативности робот в технической системе типа человек-робот должен быть безопасным, удобным в использовании, адаптивным и легко программируемым. Безопасность означает защиту людей от возможных травм при контакте с роботами во время совместной работы. Под удобством понимается то, что действия робота должны соответствовать когнитивным привычкам людей для распознавания намерений. Адаптивность означает возможность робота понимать намерения людей и точно подстраиваться под движения операторов. Простота программирования означает

то, что людям должно быть легко задавать программу действий робота, изучать его работу и способы управления им [7].

1.1.4. Классификация взаимодействия человека и коллаборативного робота

Концептуально взаимодействие человека и робота, а также рабочий процесс в КРТС можно разбить на следующие классы [28, 32]:

1) сосуществование;
2) кооперация;
3) коллаборация.

Класс непосредственно самого взаимодействия определяется четырьмя атрибутами:

1) рабочее время;
2) рабочее пространство;
3) общая цель;
4) физический контакт.

Соотношение классов и атрибутов класса взаимодействия показано на Рис. 1.6.



Рис. 1.6. Классификация взаимодействия человека и робота по классам взаимодействия

В представленной классификации взаимодействия человека и робота рабочее время отображает длительность совершения совместных действий в рамках единого рабочего пространства. Если человек и робот находятся в едином рабочем пространстве, то данное взаимодействие представляет собой их сосуществование. При наличии единой цели взаимодействия человек и робот кооперируются для выполнения поставленных задач, а если происходит контакт с объектом воздействия или, например, используется речевое управление роботом, то такое взаимодействие может быть обозначено как коллаборация человека и робота.

Другие основания классификации взаимодействий человека и робота представлены в Таблице 1.6 [33].

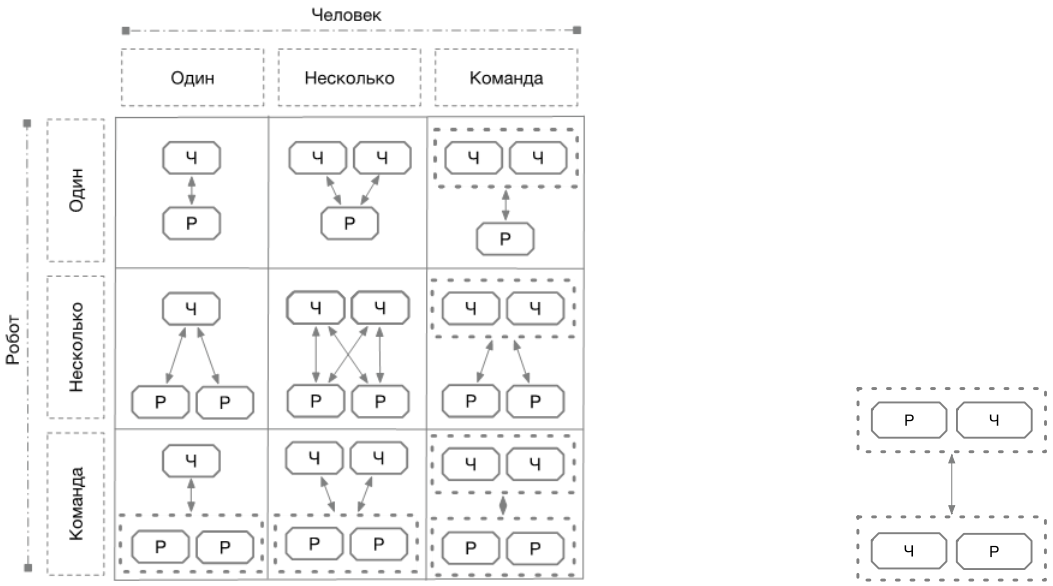
Таблица 1.6. Основания классификации взаимодействий человека и робота

Категория	**Описание**
По типу задач	Проектирование и использование системы осуществляется в зависимости от поставленной задачи. Таким образом, задача должна быть идентифицирована, как часть классификации системы. Тип задачи позволяет неявно представить среду робота.
По уровню критичности задачи	Критичность задачи измеряет важность правильного выполнения задачи с точки зрения ее негативных последствий в случае возникновения проблем. Ошибки в работе коллаборативного робота могут привести к летальному исходу при взаимодействии человека и робота. Поэтому, критичность задачи определяется мерой субъективной в рамках коллаборативной робототехники.
Морфология робота	Внешний вид роботов может быть различен, в зависимости от задачи, для которой робот был создан или среды его применения. Форма и структура робота способствуют установки социальных ожиданий.
Отношение людей к роботу	Отношение людей оказывает влияние на процесс взаимодействия человека и робота в системе в целом. Влияние отношения человека к роботу связано с проявлением человеческих факторов, которые могут сказаться на эффективности процесса в целом.
Состав команды	Состав команды может быть однородным или разнородным по типу роботов, а также в рамках исследования представляется смешанная неоднородная команда.
По уровню совместного взаимодействия между участниками технической системы	В зависимости от состава команды, возможны различные сценарии взаимодействия.

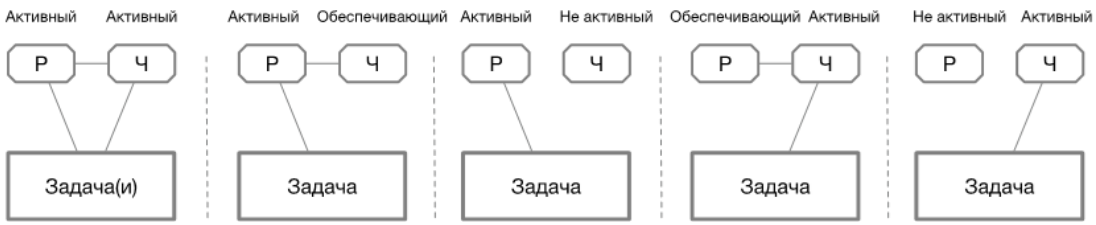
Продолжение Таблицы 1.6

Роль взаимодействия	Согласно [34], человек при взаимодействии с роботом может выполнять следующие роли: супервайзер, оператор, член команды, программист и наблюдатель.
По типу физического взаимодействия человека и робота	Согласно [35], рассматривают пять типов физического взаимодействия человека и робота: избегание, прохождение, следование, приближение и прикосновение.
Принятие решений	При проектировании интерфейса для взаимодействия человека и робота важным значением является информация о наличии типов датчиков на роботе и обработки информации, получаемой с датчиков.

В работах [37, 38] предложено дополнительное основание классификации взаимодействий – автономность участников КРТС. Выстроенные отношения «лидер – последователь» выражают, насколько действия робота непосредственно человеком, или какой участник берет на себя ведущую роль в данной задаче. Классификация взаимодействия человека и кобота по составу и типу активности участников в КРТС с учетом их гетерогенности представлена на Рис. 1.7.



а) с учетом множественности участников б) с учетом гетерогенности участников



в) с учетом инициативности участников

Рис. 1.7. Классификация взаимодействия человека и робота по составу и типу активности участников в КРТС с учетом их гетерогенности

1.2. Анализ подходов к решению проблем группового управления в робототехнических системах

Распределение ролей назначается до выполнения работ. В некоторых случаях могут рассматриваться адаптивные агенты, отвечающие за назначение активных или обеспечивающих участников системы [39].

Коллаборативная робототехническая система, элементами которой являются коботы и люди, взаимодействие которых должно быть согласованным с целью достижения эффективности процесса, может рассматриваться как объект группового управления. Согласованность и скоординированность каждого участника КРТС формирует одну из основных проблем группового управления. Решение данной проблемы усложняется тем, что действия участников технической системы не всегда остаются последовательными в случае детерминированной среды. В случае недетерминированной, динамической среды последовательность действий участников системы может определяться с помощью системы группового управления для достижения цели.

Решение задач в области группового управления началось с момента появления роботов. Так, среди отечественных ученых этими вопросами занимались Попов Е. П., Юревич Е. И. и Андрианов Ю. Д. [40, 41]. Групповое управление на примере промышленных манипуляторов исследовал Макаров И. М. [42]. Среди ученых, которые занимались групповым управлением мобильных роботов, можно выделить Гайдука А. С., Каляева И. А. и Капустяна С. Г. [43]. Среди зарубежных ученых следует отметить Фукуда Т. и Каваучи Ё., исследовавших вопросы разработки самоорганизующихся робототехнических систем. В своей работе [44] они представили динамически реконфигурируемую роботизированную систему – CEBOT. На основе разработанной распределенной интеллектуальной системы, состоящей из множества малоразмерных роботов, были проверены ряд подходов к решению задачи координации группового управления.

Одним из первых успешно реализованных исследовательских проектов в области организации взаимодействия автономных мобильных роботов считается работа исследовательской лаборатории анализа системных архитектур – MARTHA. Группа ученых во главе с Алами Р. разработали метод организации взаимодействия роботов для транспортировки складских грузов. Метод основан на планировании действий роботов с использованием централизованной системы управления [45] для управления и координации действий группы осуществляется центральной системой управления, при этом для взаимодействия использовались беспроводные каналы связи. При возникновении нештатной ситуация при движении к цели возможен переход на ручное управление роботом оператором [46].

В рамках другого проекта [47] была разработана схема группового взаимодействия мобильных роботов с применением парадигмы совмещения планов. Ее суть заключается в сверке декомпозированных задач робота с задачами других агентов в группе с целью предотвращения конфликтов и нештатных ситуаций. В результате реализации проекта были также разработаны алгоритмы распределения задач M+NTA (M+Negotiation for Task Achievement) и коллективного решения поставленной задачи M+CTA (M+Cooperative Task Achievement). Алгоритм распределения задач M+NTA позволяет поэтапно назначать участникам робототехнической системы задачу для выполнения. Каждый робот получает одно и тоже описание задания в виде набора декомпозированных задач. Задача считается выполненной, если на момент выбора назначения она уже выполнена или выполняется другим роботом. Роботы получают информацию о выполнении и завершении задач. Критерием выбора задачи для выполнения является значение функции стоимости планов, сформированных различными роботами, в зависимости от их возможностей и текущей ситуации [48]. На Рис. 1.8 показана схема распределения задач с применением данного алгоритма на основе состояний агентов.

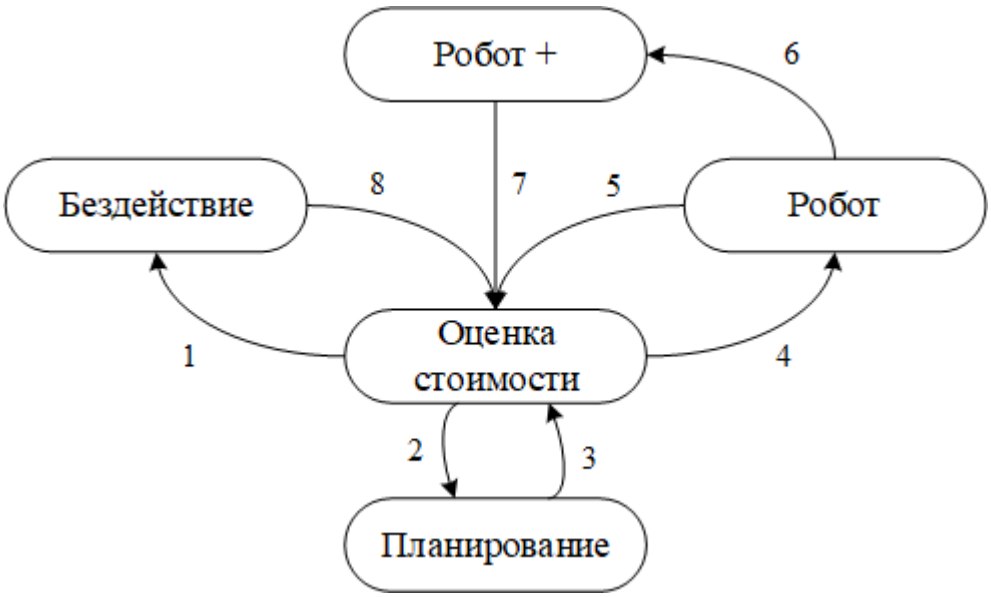


Рис. 1.8. Схема распределения задач на основе состояний агентов

Робот переходит в состояние оценки величины функции стоимости, затем осуществляет планирование и расчет затрат на выполнение задач с учетом их значений функции стоимости. Задача выбирается на основе лучшего значения функции стоимости среди всех роботов в группе. В случае если задача уже выполняется или лучшее решение не предложено, робот переходит в состояние бездействия. В случае выигрыша робот переходит в состояние кандидата на выполнение задачи и предлагает свою стоимость кандидату с лучшей стоимостью. При положительном исходе робот переходит в состояние «робот +» и приступает к расчетам для последующей задачи. В случае если более выгодного предложения не поступило, робот переходит из состояния лучшего кандидата к выполнению задачи.

В алгоритме M+CTA уровень выполнения задачи основан на процессе поэтапной проверки плана выполнения работ. Робот планирует собственную последовательность действий, называемую индивидуальным планом. Этот план составляется без учета планов действий других роботов. После окончания планирования робот ведет «переговоры» с другими роботами для того, чтобы адаптировать свой план к действиям других роботов.

Другие примеры, посвященные групповому управлению, реализовывались в рамках и при поддержке исследовательских программ Управления перспективных

исследовательских проектов Министерства обороны США (DARPA). Так, в проекте «Scout» разработано программное обеспечение для централизованного управления группой малоразмерных роботов в супервизорном режиме. [49], а в проектах MARS (Mobile Autonomous Robot Software) и TMR (Tactical Mobile Robots) реализовано управление робототехнической группой в нестационарных средах, что, по сути, является расширением иерархической распределенной системы управления в супервизорном режиме [50, 51].

Групповое управление в исследованиях также рассматривалось на примере кооперации автономных роботов с использованием математических моделей взаимодействия участников в рамках многоагентной системы [52, 53]. В частности, в работе [54] предложена математическая модель сотрудничества (кооперации) агентов в различных условиях динамически меняющейся обстановки. В статье [55] многоагентный подход реализован на основе критериев полезности агентов. В модели рассматриваются особенности поведения людей в малых социальных группах и принципы их функционирования. Примером аналогичной модели поведения для группы роботов является модель кооперативной игры роботов в футбол, где учитываются различные аспекты командного поведения агентов.

Для кооперативных игр используются алгоритмы образования коалиций. Под коалиционными играми понимаются игры для группы агентов с присущими им интересами. Выигрышем в такой игре считается количественно измеримое достижение поставленной цели [56]. В случае если решение требует рассмотрения поведения группы агентов в коалиции с использованием теории социального выбора, то применяются другие методы, например, агентного и имитационного моделирования и др. [57, 58].

Согласно модели социального поведения, при построении искусственных коллективов с элементами социальной структуры агенты должны использовать ряд механизмов, необходимых для формирования и эффективного функционирования социума, что возможно свести к решению задачи образования коалиций. [59]. Иными словами, роботы могут образовывать коалиции в рамках многоагентной робототехнической системы, соблюдая механизмы социального поведения.

Формирование и задействование коалиции характеризуется тем, что ее члены выполняют некоторую согласованную работу и имеют некую общую цель.

Кроме того, к робототехническим системам, в состав которых входят группы однородных роботов-агентов с возможностью обмениваться информацией при решении поставленной цели, применимы мультиагентные метаэвристические алгоритмы, основанные на методах, имитирующих стайное поведение [60].

Другим подходом к реализации группового управления является использованием методов и алгоритмов оптимизации для одного или нескольких параметров самой робототехнической системы и/или ее функционирования. В такой постановке задачи оптимизации чаще всего осуществляется минимизация затрат. В практических задачах оптимизации используются нелинейные целевые функции с большим числом переменных. Применение методов оптимизации для поиска экстремумов дают результаты, близкие к оптимальным, с минимальными вычислительными затратами. В частности, в работе [61] приводятся примеры решения оптимизационных задач с применением методов «роевого» интеллекта.

Вопросы повышения эффективности группового управления в робототехнических системах на сегодняшний день продолжают оставаться актуальными, что обусловлено появлением новых видов робототехнических решений с расширенным функционалом и возможностями, высокой эффективностью при эксплуатации и увеличенным спектром выполняемых работ. В области группового управления на примере КРТС также активно продолжаются исследования. В частности, с 2016 года DARPA реализует проект Agile Teams (A-Teams), целью которого является разработка, проверка и моделирование прогностических и обобщенных математических методов для оптимизации гибких неоднородных коллаборативных команд [62]. Проект A-Teams нацелен на разработку новой парадигмы проектирования человеко-машинных интеллектуальных робототехнических систем с использованием интегрированной структуры и системы управления для решения коллективных (командных) задач.

Учитывая тенденции развития робототехники, направленные на интерактивность и интеллектуализацию робототехнических комплексов,

постоянно существует необходимость в разработке новых, более совершенных методов и алгоритмов, обеспечивающих эффективное взаимодействие как самих роботов в группе, так и коботов и людей.

1.2.1. Управление группой в робототехнической системе

Вопрос эффективного функционирования робототехнической системы прежде всего зависит от выбранной стратегии управления, а также принципов и способов управления. Выделяют четыре основные задачи, которые требуется решить для обеспечения эффективного управления участниками робототехнической системы (в том числе КРТС):

- определение стратегии управления, общего принципа и структуры управления участниками робототехнической системы;
- глобальное планирование – декомпозиция глобальной задачи на простые и распределение работ между участниками робототехнической системы;
- локальное планирование выполнения агентами назначенных работ;
- обработка информации, получаемой от участников робототехнической системы в процессе выполнения работ.

Прежде чем приступить к разработке системы управления участниками КРТС, необходимо выбрать стратегию управления и общие принципы ее организации [63, 64]. Среди стратегий выделяют централизованное, децентрализованное и смешанное (гибридное) управление. Выбор стратегии управления напрямую определяет структурную организацию участников КРТС [65, 66]. При выборе стратегии управления следует учитывать количество участников робототехнической системы и поставленную глобальную цель. Применение централизованной стратегии управления при небольшом количестве участников является наиболее эффективным, однако с ростом числа элементов робототехнической системы время для нахождения решения задачи управления

растет линейно [67, 68]. В децентрализованной стратегии распределение работ и обработка информации происходит в процессе взаимодействия участников КРТС. Смешанные (гибридные) стратегии управления обладают преимуществами двух вышеуказанных стратегий. Проведенный сравнительный анализ, представленный в Таблице 1.7, показал, что в случае рассмотрения функционирования участников неоднородных команды КРТС в динамической недетерминированной среде наиболее эффективно применять именно гибридные стратегии управления [67–69].

Таблица 1.7. Сравнительный обзор стратегий управления в КРТС

Характеристика	**Стратегия управления**		
	Централизованная	Децентрализованная	Гибридная
Время принятия решения (быстродействие)	-	-	+
Надежность и «живучесть» системы	-	+	+
Простота организации и алгоритмизации группового управления	-	-	+
Эффективное распределение работ	+	-	+-
Требования вычислительных ресурсов (расход)	+	-	+

Рассмотрим детальное описание стратегий управления и базовых архитектур таких систем управления, которые используются в робототехнических системах:

1. *Централизованное управление.* Выделяют два следующих класса:

– единоначальное управление (наличие в системе центрального устройства управления (ЦУУ), на которое возлагаются задачи планирования и управления участниками робототехнической системы). Преимуществом такого управления является простота организации и алгоритмизации. К недостаткам следует отнести длительное время принятия решения из-за решения задачи оптимизации для всех участников, а также низкую способность системы управления сохранять или быстро восстанавливать

способность к выполнению своих функций для достижения групповой цели;

– иерархическое управление (как и в предыдущем классе, в системе имеется ЦУУ, однако при этом имеется иерархия управления с подгруппами и ЦУУ нижних уровней). По сравнению с единоначальным управлением существенно снижается трудоемкость оптимизационной задачи, решаемой отдельными ЦУУ, однако усложнение структуры управления может приводить к задержкам или сбоям при передаче команд от верхнего уровня иерархии к нижним.

Централизованное управление представлено на Рис. 1.9, которое обладает специализацией функций участников группы, что позволяет генерировать быстроту решения через поиск последовательности действий группы.

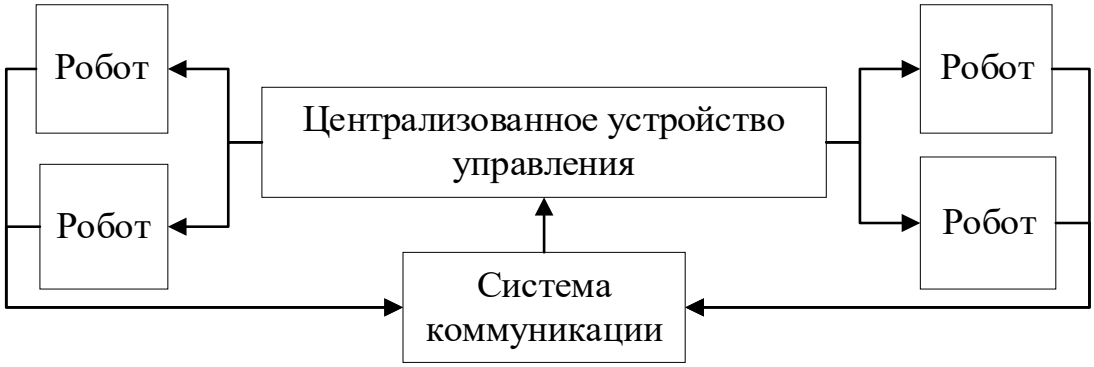


Рис. 1.9. Структура системы управления с централизованной стратегией управления

2. *Децентрализованное управление.* Возможно выделить следующие классы:

– коллективное управление (в системе отсутствуют ЦУУ, все ее участники равноценны и самостоятельны в принятии решений для обеспечения максимально возможного вклада в достижение групповой цели, процесс обмена информацией о своих действиях также осуществляется децентрализованным способом). Каждый участник КРТС решает задачу оптимизации только для себя, а не пытается оптимизировать действия всей системы или группы. Таким образом система управления

существенно упрощается, что позволяет решать планировать действия практически в режиме реального времени. Однако, следует отметить, что использование децентрализованного управления существенно усложняет алгоритмизацию задачи управления и предъявляет к участникам КРТС/группы определенные требования к уровню интеллектуальности – четкое понимание общей задачи и умение выбирать такие действия, которые обеспечивают наилучшее решение в интересах группы;

– стайное (роевое) управление. По аналогии с коллективным управлением в КРТС отсутствуют ЦУУ, и все участники равноценны и самостоятельны в принятии решений. Отличием является то, что обмена информации между участниками группы фактически нет, и каждый участник группы «подстраивает» свои действия на основании получаемой косвенной информации о действии других агентов КРТС/группы. Особенностью такой структуры управления считается возможность масштабирования вычислительных ресурсов, быстродействие при решении задачи управления и возможность использования энергоэффективных устройств приема и передачи информации. К недостаткам относится необходимость высокого уровня интеллектуальности уровня роботов.

На Рис. 1.10 представлена обобщенная структура децентрализованного управления в КРТС.

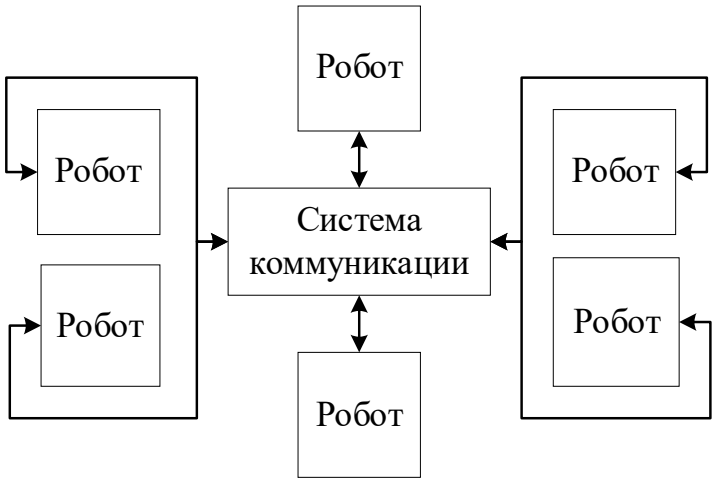


Рис. 1.10. Структура системы управления КРТС с децентрализованной стратегией управления

3. *Гибридное управление.* Включает в себя взаимосвязанные центральное и локальные устройства управления, подобная стратегия управления считается смешанной. Стратегические задачи планируются на уровне ЦУУ, а тактические – на уровне подгрупп с использованием стратегии децентрализованного управления. Такой подход к управлению обладает большой гибкостью, робастностью и устойчивостью в неблагоприятных условиях, в том числе в случае выхода из строя ЦУУ и одного или несколько устройство локального управления на различных уровнях.

На Рис. 1.11 представлена гибридная структура управления, обеспечивающая достижение общей цели с возможностью применения как централизованного, так и децентрализованного подхода к управлению.

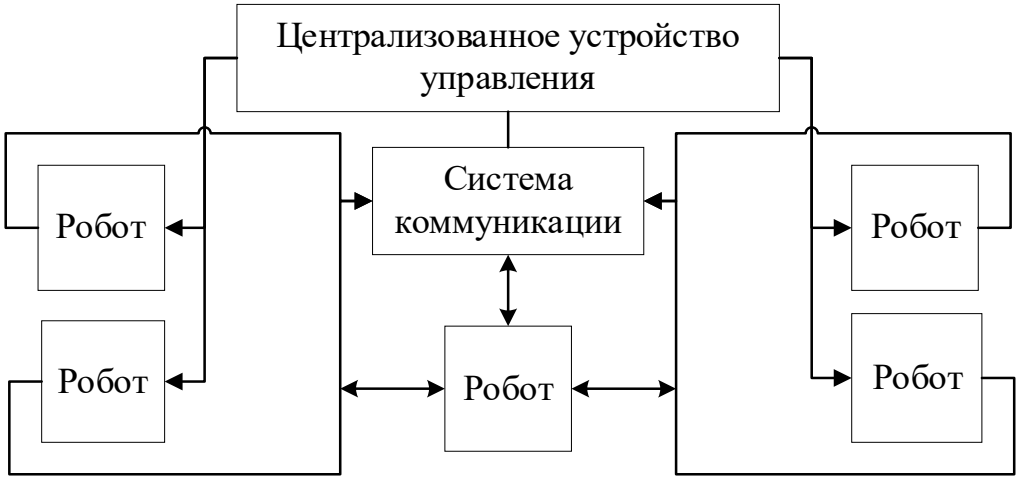


Рис. 1.11. Структура системы управления с гибридной стратегией управления

1.2.2. Способы организации систем группового управления

В соответствии с проведенным анализом стратегий управления можно рассмотреть классификацию систем управления участниками робототехнической системы. Системы группового управления могут быть основаны на принятой стратегии управления, таким образом, принцип организации может быть

централизованным, распределенным (децентрализованным) или комбинированным (гибридным).

В случае коллаборативной робототехнической системы принципы организации управления имеют свою специфику, связанную с участием в системе человека и заключающуюся в пространственных и временных ограничениях участников в коллаборативном пространстве с учетом мер безопасного взаимодействия. Простейшим примером группового управления участников КРТС является управление несколькими агентами в автономном режиме в едином рабочем пространстве.

К сложной задаче группового управления коллаборативной робототехнической системы относится согласованное выполнение участниками КРТС действий, требующих взаимной координации в коллаборативном пространстве. Примером подобной задачи может являться сборка изделия участниками коллаборативной робототехнической системы. В такой задаче возможны несколько режимов совместной работы коллаборативных роботов: квазиавтономное, иерархическое подчинение и равноправное взаимодействие [41].

Классификация систем группового управления КРТС, учитывающая различные режимы управления и взаимодействия участников, представлена на Рис. 1.12. Следует отметить, что наиболее высокоорганизованным режимом совместной работы коллаборативных роботов является режим равноправного взаимодействия. Такой режим предполагает при управлении каждым роботом в отдельности оперативный учет действий других роботов, обеспечивая согласованные во времени и пространстве действия всех участников КРТС.

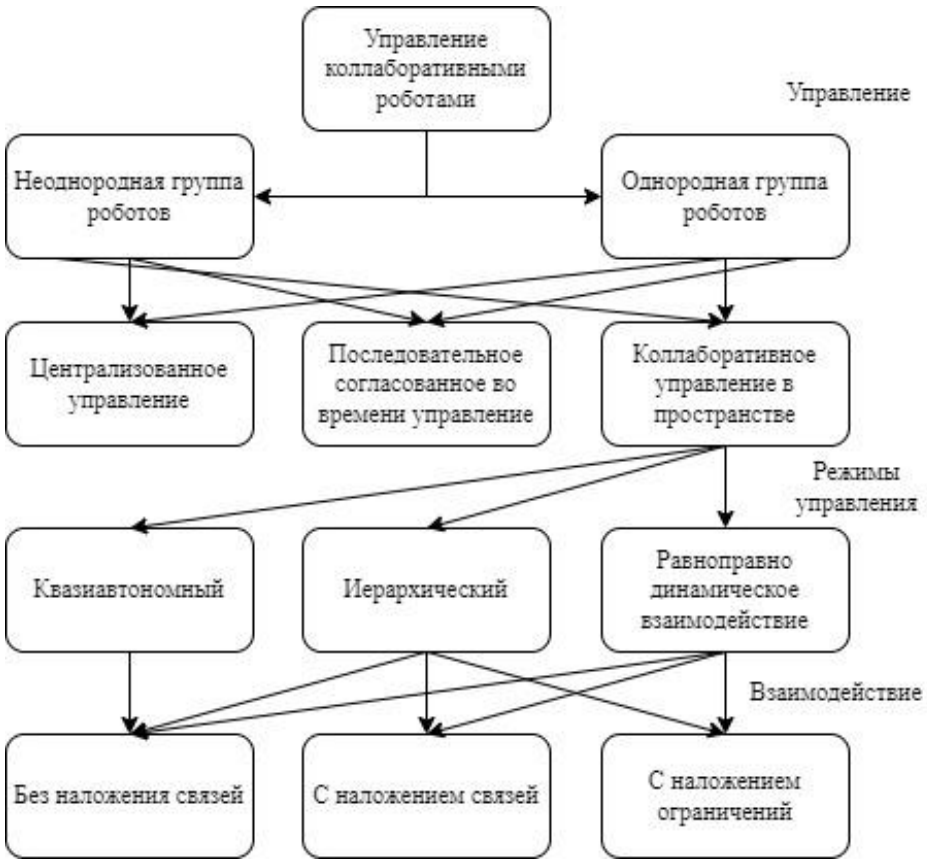


Рис. 1.12. Классификация систем группового управления КРТС

1.3. Коллаборативная многоагентная робототехническая система

Задачи по достижению группой участников КРТС единой цели, действуя с определенной степенью автономности, может быть решена с применением технологий многоагентных систем [70]. Многоагентные системы представляют собой некоторое множество взаимодействующих друг с другом интеллектуальных агентов с учетом влияния внешней среды. Изначально данное понятие было связано с программными системами и моделями, которые описывают процесс их работы и поведения. В подобных системах и моделях в качестве агента выступает программный агент (исполняемая программа) или абстрактный интеллектуальный агент, например, экономический агент (т.е., модель, представляющая формализованное описание участника реальной системы) [71].

В КТРС в качестве агентов выступают роботы. Концепция построения коллаборативных робототехнических систем на основе многоагентного подхода строится на следующих принципах:

- обеспечение единства цели функционирования участников КРТС (за счет выбора соответствующих методов и алгоритмов взаимодействия человека и робота, при этом определяется единая стратегия группового управления, включая планирование действий и распределение заданий среди участников с учетом имеющихся у них ресурсов);
- обеспечение совместимости интеллектуальных и функциональных возможностей участников КРТС для наиболее эффективного решения поставленной задачи;
- обеспечение единства в информационном пространстве системы (организация взаимного обмена необходимыми данными);
- обеспечение гибкой конфигурации сетевой архитектуры (возможность перестроения в соответствии с выбранной стратегией управления – централизованной, децентрализованной или гибридной) [72].

Среди общего множества агентов следует отдельно выделить класс интеллектуальных агентов в силу особенностей их свойств и функционирования. Основными аспектами интеллектуальных агентов являются целенаправленность и автономность, которая связанна с действиями на основе проблемно-ориентированных целенаправленных рассуждений. Такие интеллектуальные агенты делятся на два типа: натуральные и искусственные. К первым могут относиться люди и животные, а ко вторым – робот, коллектив роботов, компьютерная программа и т.д. Комплексное определение интеллектуального агента представлено в работах [64, 67, 73, 74], где для него определены следующие характеристики:

- способность решения задач, поставленных людьми или другими агентами;
- активность, т.е. способность инициировать решение задачи;
- способность самоорганизации;

- полуавтономность (у оператора есть возможность управлять уровнем автономности агента);
- антиципация, т.е. способность предвидеть запросы оператора;
- надежность;
- способность сотрудничать с людьми или другими агентами в интересах решения задачи;
- способность работать с неоднородными агентами и удаленными информационными ресурсами;
- адаптивность, в том числе способность оперативно приспосабливаться к изменению потребностей оператора и окружающей среды.

Противоположностью интеллектуальных агентов являются агенты реактивные, не имеющие представлений о внешней среде и не обладающие функциями когнитивного анализа. Такие агенты не могут прогнозировать изменения внешней среды и планировать действия в отношении других агентов и с учетом их действий [75]. Следует отметить, что использование реактивных агентов характеризуется относительно простой системой управления, но при этом агенты зависят от определенных условий внешней среды и не способны адаптироваться к ее изменениям.

На Рис. 1.13 представлен сравнительный качественный анализ интеллектуальных и реактивных агентов.

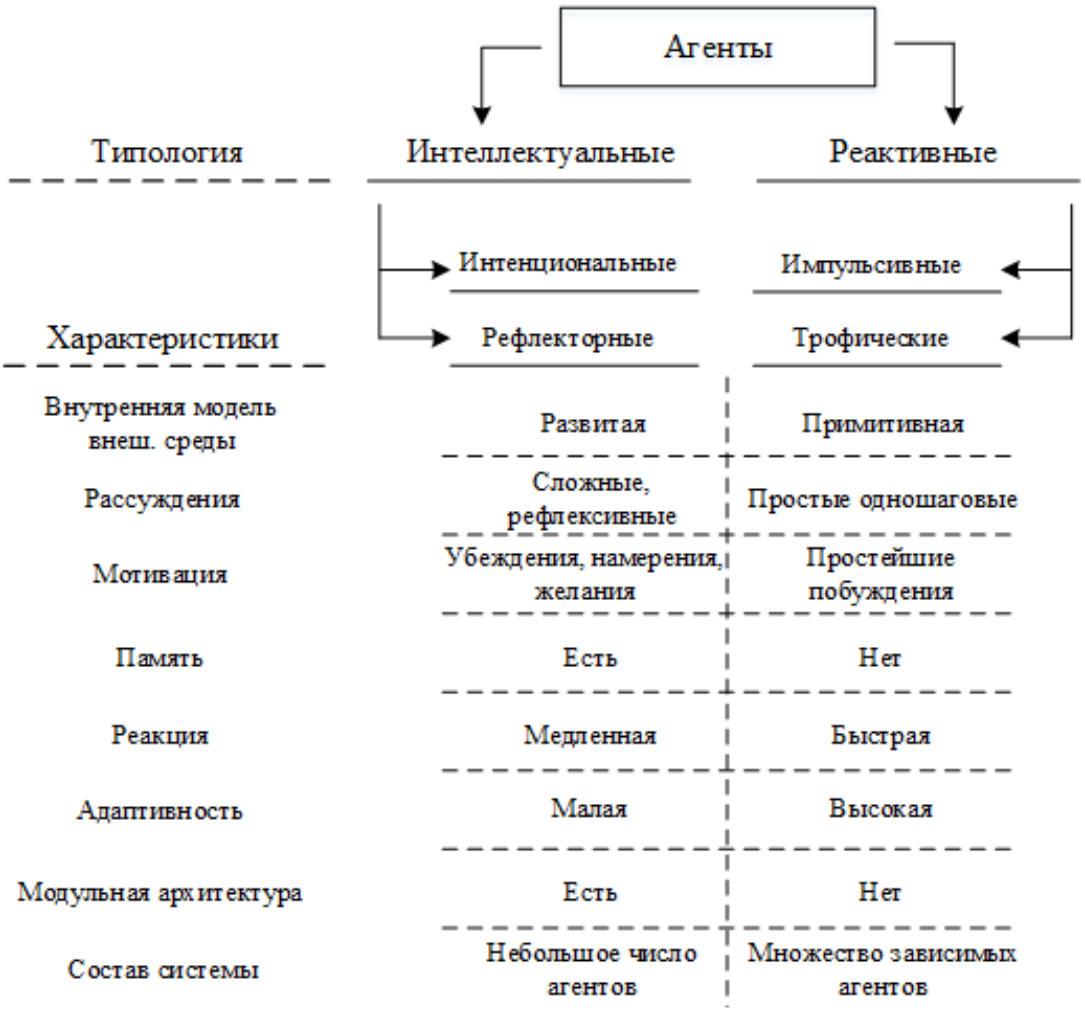


Рис. 1.13. Качественное сравнение интеллектуальных и реактивных агентов

Автономность интеллектуальных агентов позволяет планировать их действия с учетом изменений внешней среды и поведением других агентов в многоагентной системе для достижения общей поставленной цели. При рассмотрении КРТС в качестве многоагентной системы коллаборативных роботов следует относить именно к интеллектуальным агентам. Использование свойства взаимной адаптации интеллектуальных агентов для коботов позволяет решать более сложные задачи, например проведение работ группой роботов манипуляторного типа на конвейере [76, 77].

1.4. Принципы коллективного управления в команде КРТС

При рассмотрении КРТС с точки зрения многоагентной системы коботы являются интеллектуальными агентами, выполняющими набор задач для достижения единой цели и адаптирующимися к внешним условиям (в том числе к действиям человека). С другой стороны, множество коботов в КРТС также обладает характеристиками, свойственными понятию «команда» [79]:

- единство цели;
- совместная деятельность;
- непротиворечивость интересов;
- автономность при выполнении работ;
- специализация и взаимодополняемость ролей.

Согласно [78–80], следует рассматривать два периода жизненного цикла команды, которые отдельно отражают этап ее формирования и этап функционирования. Жизненный цикл команды показан на Рис. 1.14.

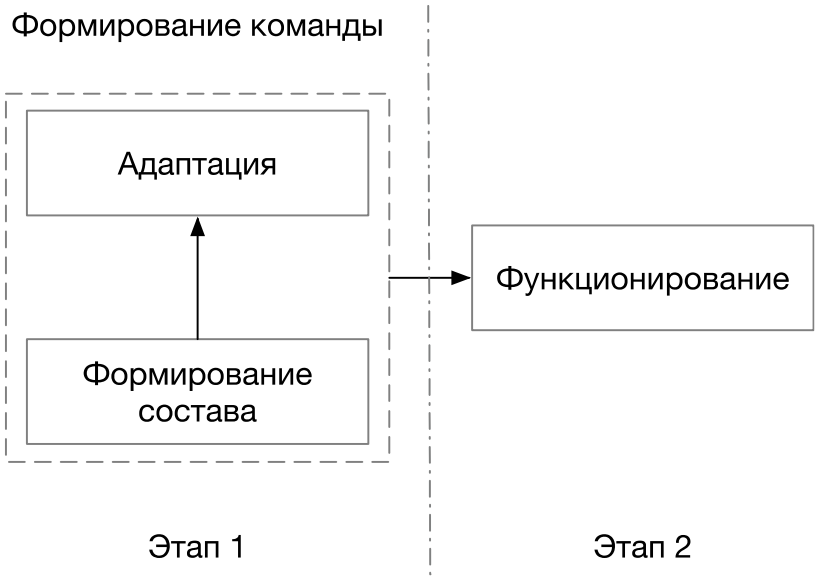


Рис. 1.14. Жизненный цикл смешанной неоднородной команды

В рассматриваемой КРТС этап формирования разделен на определение состава участников смешанной неоднородной команды и адаптацию в соответствии с решаемой задачей. Этап функционирования рассматривается в рамках коллаборативного пространства и в условиях стационарности роботов.

Отметим, что большинство исследований в области коллаборативной робототехники сосредоточены на изучении последнего этапа. В то же время на практике часто возникают задачи, относящиеся к этапу формирования команды.

Специфика смешанных неоднородных команд требует рассмотрения постановок таких задач, где учитываются дополнительные факторы и ограничения, которые не свойственны человеческим командам. Перечислим некоторые из них:

- зависимость значений функций затрат коллаборативных роботов от числа коботов, назначенных на выполнение одного и того же объема работ;
- зависимость эффективности коллаборативного робота от того, с каким человеком (оператором) он взаимодействует;
- неаддитивность затрат по видам работ (например, появление дополнительных затрат при переходе от одного вида работ к другому).

В работе [39] предложен подход к повышению эффективности функционирования коллаборативных робототехнических систем за счет перераспределения выполняемых ими функций и объемов работ. Для этого обоснована возможность использования термина «команда» для участников КРТС. В неоднородной команде каждый ее участник действует в соответствии со следующими принципами коллективного управления:

- самостоятельность каждого участника в своих действиях, исходя из текущей ситуации;
- определение и выбор действий на основе полученной информации о глобальной задаче для команды;
- обеспечение максимально возможного приращения целевого значения функции на всем протяжении перехода состояния системы от начального к конечному;
- выбор альтернативного действия, если оно окажет наименьшее негативное (или наибольшее положительное) влияние на эффективность выполнения задачи всей командой.

Вышеизложенные принципы характеризуют коллективное управление, при этом управление смешанной неоднородной командой основывается на методе (методах) коллективного распределения задач. Согласно [81], методы коллективного управления ориентированы на распределенные и иерархические распределенные системы, к которым относится смешанная неоднородная команда КРТС.

Очевидно, что смешанной неоднородной команде будут присущи аспекты команды, в том числе:

- целеполагание (достижение конечного результата является главной целью деятельности команды, в т.ч. смешанной);
- автономность и согласованность действий (поведение каждого члена команды должно быть наиболее выгодным для команды в конкретных условиях).

На практике согласованность действий редко появляется «автоматически», но достигается с помощью управления. При этом команды, состоящие только из людей, рассматривают в качестве организационных систем и используют обширный набор существующих методов, способов и подходов управления подобными системами. Команды, состоящие только из роботов, можно рассматривать в качестве многоагентных систем [82, 83] или групп [84], способы и методы управления, которыми также хорошо известны [85–88]. Спецификой же смешанных неоднородных команд является необходимость объединения в контуре методов, способов и подходов управления, присущих как организационным, так и техническим системам.

1.5. Постановка задачи исследования

Для достижения цели исследования требуется выполнить следующие задачи:

1. Провести обзор и сравнительный анализ существующих систем управления робототехническими системами.
2. Разработать новую структуру системы управления коллаборативной робототехнической системы на основе принципов модульности и распределенной иерархии.
3. Провести анализ существующих методов и алгоритмов распределения работ в робототехнических системах, в том числе коллаборативных.
4. Разработать метод и алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе для повышения эффективности ее функционирования по критериям производительности труда, а также временных и других затрат.
5. Провести численные и натурный эксперименты функционирования КРТС с использованием, разработанных метода и алгоритмов распределения работ.
6. Разработать программное обеспечение для решения оптимизационной задачи распределения объемов работ в смешанной неоднородной команде в рамках численного эксперимента.
7. Апробировать алгоритмы и метод распределения работ в КРТС на базе производственной роботизированной ячейки.

1.6. Выводы по Главе 1

На основе проведенного обзора научных исследований в области автоматизации производства с применением робототехнических решений, в том числе коллаборативных роботов, было установлено, что повсеместная и полная

замена роботами людей-операторов (реализация т. н. безлюдных производств, вне зависимости от специфики используемых технологических процессов и сложности выполняемых действий) на сегодняшний день невозможна. Работа на промышленных сборочных линиях по-прежнему требует труда большого количества людей, а вопрос полной автоматизации ручной сборки многокомпонентных деталей или обработки сложных изделий с различными свойствами и составом материалов продолжает оставаться нерешенным. Одним из промежуточных этапов на пути решения данной проблемы является использование интеллектуальных робототехнических систем и отдельных роботов, обладающих функциями частичной автономности действий.

Одним из направлений развития интеллектуальной робототехники является переход от использования функциональных роботов, предназначенных для выполнения одной или нескольких конкретных функций (работ), к интерактивным, особенностью которых является способность безопасного взаимодействия с человеком. Одним из примеров интерактивного робота является кобот (коллаборативный робот). Коботы предназначены для работы в едином рабочем пространстве с человеком без риска нанесения вреда последнему (т. н. коллаборативное взаимодействие), которое обладает рядом преимуществ по сравнению с промышленными роботами манипуляторного типа. В последние годы активность интеграции коботов в различных отраслях производства продолжает расти.

Несмотря на актуальность исследований в области коллаборативной робототехники, недостаточно проработанным остается вопрос формирования (подбора по составу) смешанных неоднородных команд из числа людей и коботов, а также эффективного распределения работ с учетом специфики гетерогенных агентов и требований к безопасности их совместной деятельности.

Результаты Главы 1 опубликованы в работах [7, 20, 53, 89–96].

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КРТС

2.1. Система управления КРТС

Наличие в контуре управления робота и человека при проектировании сложных систем управления предполагает, что реализация полного автоматического управления может быть невозможна на базе современной техники или невыгодна по сравнению с управлением только человеком. Степень участия человека в таком управлении разнится в зависимости от сложности технических операций и объектов управления. В случае использования КРТС на производстве к подобным операциям можно отнести ковку, сварку, сборочные операции, а к сложным объектам – манипуляторы и роботы, функционирующие в недетерминированной среде. КРТС может быть реализована в виде роботизированных ячеек, в состав которых входят коботы и люди, также формируя при этом смешанные неоднородные команды. Следует отметить, что некоторые операции предпочтительнее назначать для выполнения человеком, например, для ускорения времени ее выполнения или невозможности задействования робота в силу конструктивных и иных ограничений.

Централизованная система управления КРТС имеет ряд преимуществ, заключающихся в возможности учета центра управления всех особенностей выполняемых операций и отсутствия необходимости использовать одного из участников смешанной команды для формирования и отправки управляющих воздействий и отслеживания общего хода выполнения работ. С другой стороны, в ряде случаев требуется вмешательство человека в процесс функционирования кобота (например, для уточнения траектории движения и оптимизации производимых элементарных операций для сокращения общего затрачиваемого времени), о чем управляющий центр может не иметь информации в силу

недостаточного уровня детализации информации о ходе выполнения работ. Таким образом, наиболее эффективным полагается рассмотрение комбинированной (гибридной) системы управления сложными техническими системами [89, 97].

Рассмотрим управление в коллаборативных робототехнических системах, предполагающее задействование человека для передачи управляющих воздействий роботу (роботам) на нижнем уровне управления. КРТС с гибридной системой управления представляет собой систему, в которой роботы различной специализации взаимодействуют с людьми с целью совместного решения задач, поставленных управляющим центром [98]. Коллаборативное взаимодействие рассматривается в формате сотрудничества коботов и людей в недетерминированной среде, где роботы и операторы используют единое рабочее пространство и объекты для выполнения совместных задач [99].

2.1.1. Состав коллаборативной робототехнической системы

В состав системы управления КРТС могут входить управляющий центр, группу коллаборативных роботов и вспомогательное оборудование, а также команду людей.

В зависимости от входных параметров системы, решаемых задач или показателей эффективности по выполнению конкретных операций участники КРТС объединяются в одну или несколько смешанных неоднородных команд. После получения задания от управляющего центра осуществляется распределение работ среди участников, удовлетворяющее некоторому заданному критерию оптимальности (временные, ресурсные или другие виды затрат).

В управляющий центр входят блоки коммуникационной системы, формирования команд, обработки команд, а также используемые при этом методы и алгоритмы обработки информации. На нижних уровнях система разделяется на две составляющие – группа коллаборативных роботов манипуляторного типа и

команда людей. В случае децентрализованного управления функции управляющего центра возлагаются на одного из участников КРТС.

2.1.1.1. Команда людей в коллаборативной робототехнической системе

Коллектив людей, входящий в состав коллаборативной робототехнической системы, функционирует в едином рабочем пространстве с коллаборативными роботами. Согласно приведенным определениям в работе [78], коллектив, способный достигать цели автономно, можно определить как команда. Следовательно, справедливо считать команду в качестве коллектива, но не наоборот. Таким образом, команда людей в КРТС с точки зрения управления будет характеризоваться коллективным управлением в организационно-технической системе.

Команды людей как организационные системы в составе КРТС будут иметь следующие характеристики [100]:

- формирование команды осуществляется для выполнения совместных задач [82];
- участники команды взаимозависимы;
- количественный состав команд ограничен, но при этом неизменен во времени;
- члены команды способны управлять своей работой и осуществлять взаимодействие друг с другом;
- команды людей функционируют в рамках общей рассматриваемой коллаборативной робототехнической системы, которую в этом случае возможно рассматривать в качестве эргатической.

Переход к смешанным неоднородным командам обусловлен наличием в КРТС роботов, совокупность которых представляет собой одну или несколько технических систем. Таким образом, КРТС, по своей сути, является

организационно-технической системой, представляющей собой набор участников различного типа, т.е. в ее состав входят гетерогенные (разнородные) участники с различными характеристиками (эффективность, способность выполнять конкретные задачи, скорость перемещения), в том числе разные по виду функции затрат, обусловленные в основном снижением эффективности работы человека во времени и повышением его затрат на выполнение операций и отсутствием снижения эффективности и увеличения затрат во времени – у коботов.

Таким образом, эффективность функционирования КРТС возможно определить за счет формирования набора характеристик, описывающих эффективность самих участников смешанных неоднородных команд:

- квалифицированность;
- ответственность;
- нацеленность на решение поставленных задач.

Непременный атрибут смешанной неоднородной команды КРТС является синергетичность взаимодействия ее участников. Синергетический эффект такой команды – несепарабельность результата совместной деятельности по усилиям членов команды, роль информации и другие аспекты команд на качественном уровне. Подробнее о синергетическом эффекте представлено в работе [101].

Согласно классификации команд по различным основаниям [102, 103], для функционирования однородных команд в КРТС требуется решение задачи распределения работ, а для неоднородных – выполнение адаптации команды с последующим распределением работ. В рамках диссертационной работы адаптация смешанной неоднородной команды понимается как формирование смешанной неоднородной команды, в состав которой входят люди и коботы манипуляторного типа.

2.1.1.2. Коллаборативные роботы манипуляторного типа

Согласно международным стандартам ISO 10218–1,2:2011, ISO TS 15066:2016 [15, 16], различают четыре типа коллаборативных роботов [13, 104]:

1. С защитным механизмом остановки. Подобные коботы работают преимущественно автономно, при этом человек имеет доступ к его рабочему максимальному пространству. При приближении человека срабатывает механизм, основанный на использовании датчиков движения и останавливающий функционирование кобота или замедляющий перемещение его составных частей с возможностью корректировки движения. Когда человек покидает общее рабочее пространство, работа кобота возобновляется.

2. С ручным управлением. Данный тип коботов обладает функцией «ручного обучения» выполнения определенной роботы. Гибкая и легко программируемая манипуляция человека движениями кобота, в том числе в режиме непосредственного управления вручную движением частей робота человеком, позволяет задавать требуемую траекторию перемещения кобота.

3. С дополнительными сенсорными системами. Коботы, оснащенные техническим зрением, способны отслеживать перемещения и действия работников-людей. Подобные коботы могут наблюдать за рабочей зоной совместного пространства и реагировать на происходящие в ней изменения: как только человек попадает в рабочую зону робота, тот замедляется до безопасной скорости, а если работник подходит слишком близко – останавливается.

4. С ограничениями мощности и силы столкновения. Такой кобот может измерять и оценивать сопротивление собственным движениям с помощью силомоментных датчиков и останавливаться, если оно превышает некое пороговое значение. Это позволяет снизить вероятность нанесения вреда человеку при возможном столкновении. Из соображений безопасности на подобных коботах чаще имеются детали закругленной формы и актуаторные установки закрытого

типа. Коботы с ограничениями мощности и силы столкновения могут безопасно функционировать в непосредственной близости от человека.

Классификация коботов может также осуществляться по множеству других оснований, представленных на Рис. 2.1.

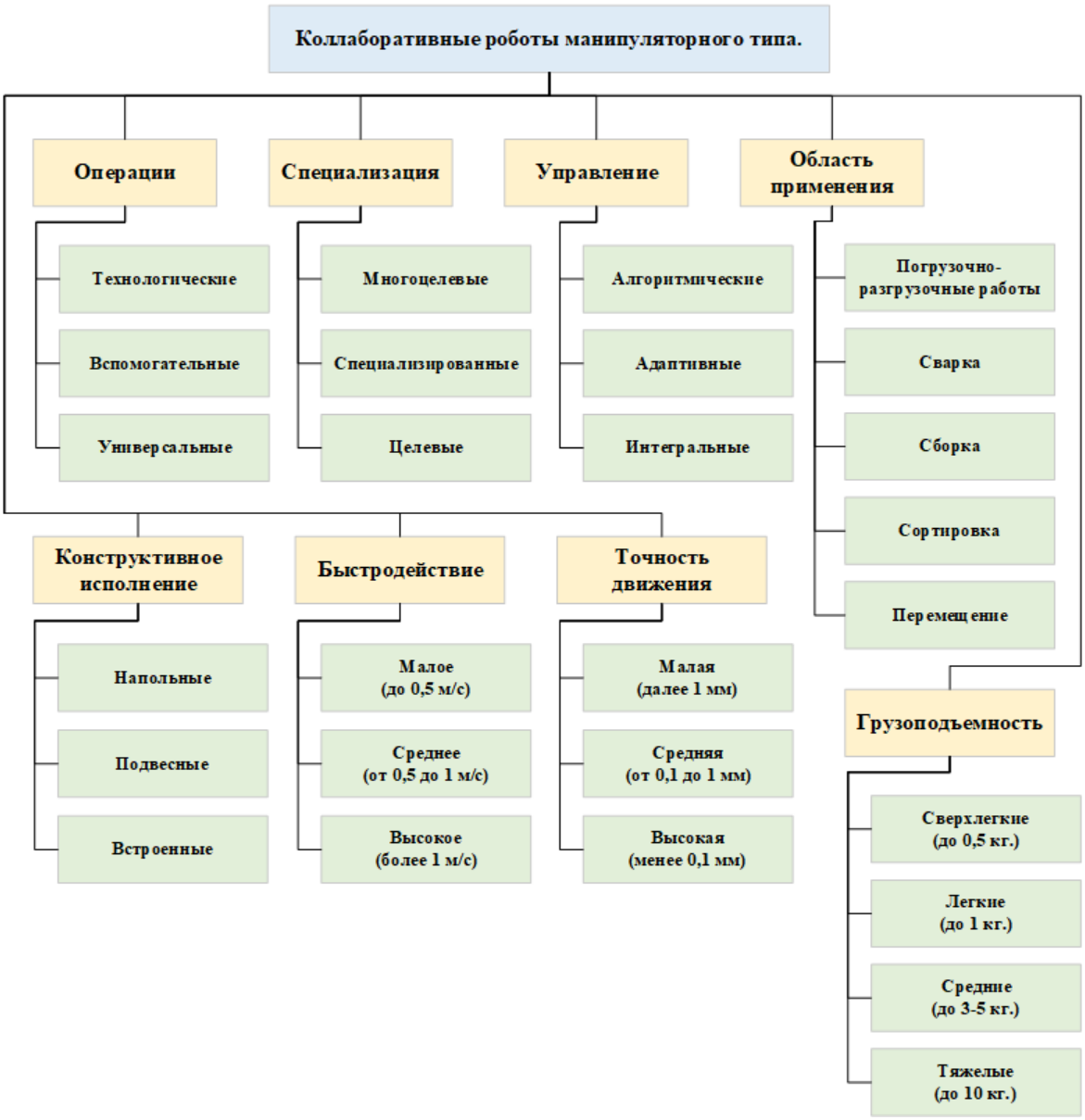


Рис. 2.1. Классификация коллаборативных роботов (основные показатели)

К основным техническим характеристикам коллаборативных роботов относятся: количество степеней свободы, грузоподъемность, радиус рабочей зоны, повторяемость, собственный вес, безопасность и легкость программирования [105].

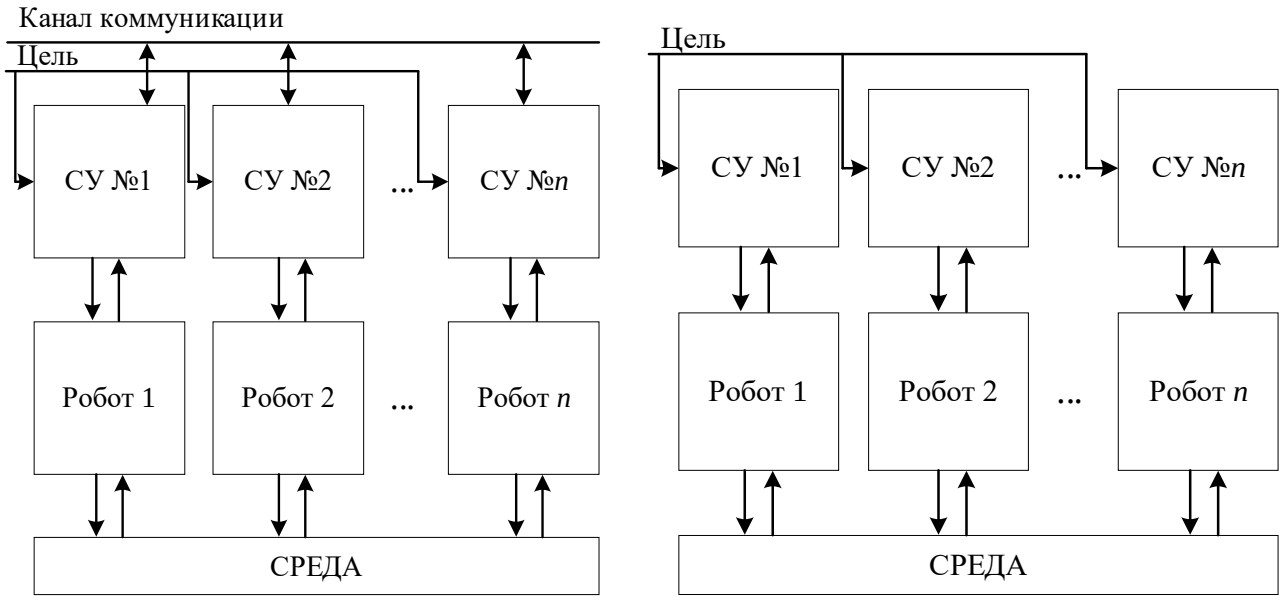
2.1.2. Анализ способов организации распределенных систем управления

Прежде, чем приступить к разработке структуры системы управления коллаборативной робототехнической системы, рассмотрим результаты проведенного анализа способов организации систем управления участниками робототехнических систем, в том числе сложных организационно-технических систем.

Согласно проведенному анализу стратегий группового управления в работах [63, 67–69], для рассматриваемой задачи управления в динамической и недетерминированной среде следует применять гибридный подход к организации распределенной системы управления [67]. Сложность решаемой задачи управления группой роботов заключается в следующем:

- определение количества и функционального состава группы роботов;
- решение задачи распределения целей (задач/работ) в группе роботов;
- осуществление согласованных коммуникации для группы роботов;
- обеспечение надежного управления по принципу распределенных систем.

К примерам реализации распределенной системы управления группой роботов относятся децентрализованные структуры коллективного и стайного управления, которые рассмотрены в работе [63]. На Рис. 2.2 (а) и (б) продемонстрированы распределенные системы коллективного и стайного управления роботами соответственно.



а. Коллективное управление б. Стайное управление

Рис. 2.2. Распределенные системы коллективного (а) и стайного (б) управления роботами

В первом случае управление группой осуществляется роботами с применением общего канала связи для координации действий роботов. Для стайного управления подобный канал обмена информации не применяется, а действия координируются на основе анализа окружающей среды.

Для группы роботов общая целевая задача может быть декомпозирована на уровне подгрупп, отвечающих за выполнение конкретных назначенных задач (в зависимости от их функциональных возможностей). В таком случае применяется распределенная система управления, построенная по иерархическому принципу и с использованием децентрализованной стратегией управления. Подобная СУ ориентирована на гетерогенную группу роботов, где каждый робот может выполнять свою задачу без учета координации своих действий по отношению к другим роботам [63, 106, 107]. На Рис. 2.3 представлен фрагмент структуры распределенной иерархической системы управления группой роботов.

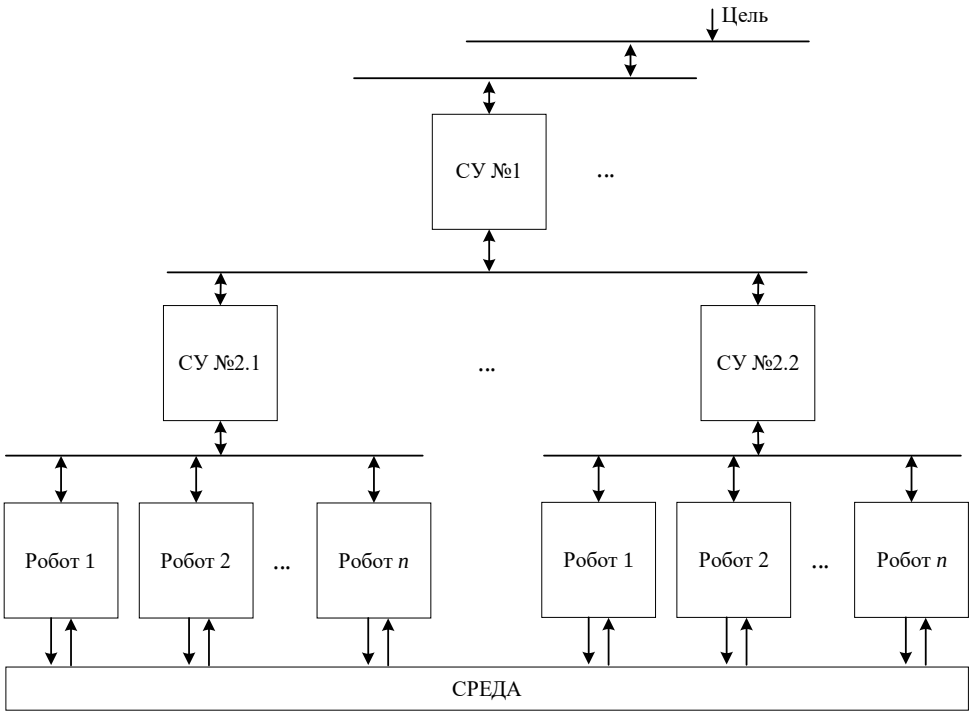


Рис. 2.3. Фрагмент структуры распределенной иерархической системы управления группой роботов

Применение той или иной системы управления группой роботов зависит от решаемой задачи, количества роботов и их функциональных возможностей, а также сложности решаемых задач (технологического процесса).

Вопросам коллективного управления роботами отведено множество исследований, которые описывают различные подходы к организации управления сложными интеллектуальными робототехническими системами [108–110]. В частности, в работе [111] описаны системы, которые основаны на реальных примерах коллективного взаимодействия роботов. Подчеркнуты важнейшие особенности таких сложных систем:

- повышение надежности – выход из строя участника коллектива не должен критически влиять на работоспособность всей системы;
- гибкость – обеспечение возможности быстрой реконфигурации системы;
- возможность масштабирования структуры и состава КРТС для решения сложных задач.

Классические методы решения задач группового управления основаны на сетевых моделях или решении оптимизационных задач [107]. В задачах

планирования движения с одновременными взаимодействием, прогнозированием и навигацией чаще всего используются мультиагентные системы [112]. Методам роевого интеллекта на основе коллективного поведения в децентрализованных системах посвящены работы [114–116].

В работе [117] рассматривается метод самоорганизации в распределенных технических системах на основе сетевой модели. Задача группового управления заключается в поиске решения изменения состояния (от начального до конечного) каждого робота из подгруппы, формируя таким образом некий кластер активных роботов для наиболее эффективного решения поставленной задачи в распределенной системе. При этом следует отметить, что в рассматриваемом подходе целью роботов кластера является совершение перехода из исходного в целевое состояние за минимальное время с оптимизацией траекторий движения роботов. В решении целевой задачи могут быть задействованы не все роботы системы, а только сформированный кластер активных роботов для решения конкретной задачи, среди которых реализовано оптимальное (или близкое к нему) распределение функций между роботами.

2.1.3. Структура системы управления КРТС

Создание сложных эргатических систем связано с обеспечением наибольшей эффективности в процессе взаимодействия и взаимодополнения функциональных возможностей участников этих систем [96, 118].

В диссертационной работе предлагается модульная структура системы управления КРТС, построенная по иерархическому принципу распределенной системы. Модульность такой системы позволяет осуществлять модификацию отдельных ее частей (перегруппировку состава смешанной неоднородной команды). Гибридная стратегия управления предполагает возможность использования как централизованного, так и децентрализованного управления

системой. На Рис. 2.4 приведена структура предлагаемой системы управления коллаборативной робототехнической системы.

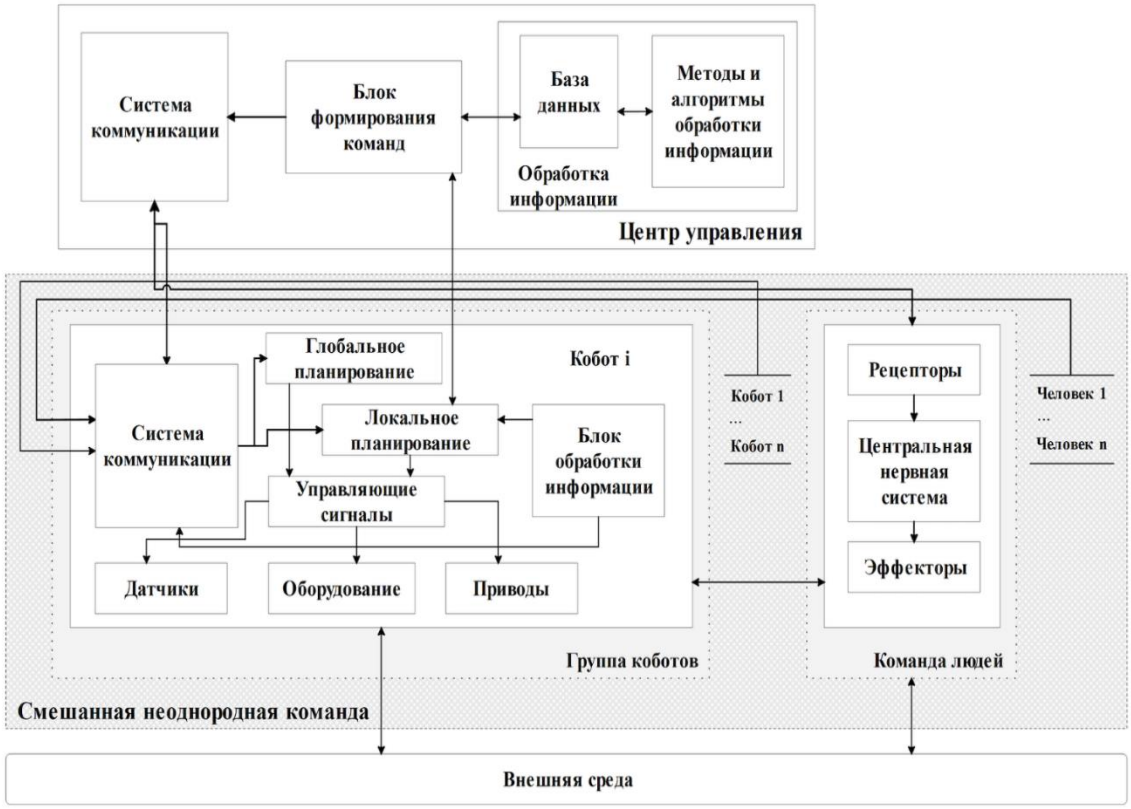


Рис. 2.4. Предлагаемая структура системы управления КРТС

Система управления состоит из двух уровней, обеспечивающих эффективное формирование и функционирование смешанной неоднородной команды. На верхнем уровне, в управляющем центре и блоке обработки данных содержится информация, получаемая от роботов; выполняется мониторинг исполнения задач, формализуются и передаются на нижний уровень новые задачи, где осуществляется их декомпозиция и распределение среди участников КРТС.

Для коботов в КРТС свойственно ситуационное взаимодействие с человеком, требующее, в частности, планирования скоординированных действий участников (исходя из поставленной прикладной задачи и имеющихся ресурсов), коммуникации и информационного взаимодействия [119]. Эффективное распределение работ предполагает наличие адаптивных свойств коллаборативных роботов [120].

Обеспечение информационного и физического взаимодействия участников КРТС сопряжено с необходимостью обобщения и формализации разнородных данных, получаемых в процессе функционирования с сенсорных систем робота и дополнительного оборудования в рабочей зоне [121].

2.2. Метод распределения работ в смешанной неоднородной команде КРТС

Рассмотрим смешанную неоднородную команду, членами которой являются множество людей (H) и множество коллаборативных роботов (B). Определим, что успешная деятельность команды требует выполнения множества различных видов работ (U).

$$\begin{cases} H = \{h_i\}_{i=1}^{n}, \\ B = \{b_j\}_{j=1}^{m}, \\ U = \{u_k\}_{k=1}^{q}. \end{cases} \quad (1)$$

где:

n – количество людей в команде,

m – количество коботов в команде,

q – количество видов заданных работ.

Допустим, что любой агент в составе смешанной команды КРТС обладает некоторой характеристикой с набором значений, отражающим эффективность выполнения определенных видов работ. Для человека эта характеристика может отражать его квалификацию (производительность труда [73]), для кобота – предназначенность для выполнения этих работ с точки зрения технических возможностей и характеристик (например, точность позиционирования актуаторов, наличие определенных манипуляторов (захватов) и/или степеней свободы и т.д.). Эффективность выполнения k-ого вида работ i-м человеком и j-м коллаборативным роботом обозначим через $r_{h_i}^k \geq 0$ и $r_{b_j}^k \geq 0$ соответственно.

Характеристики $r_{h_i}^k$ и $r_{b_j}^k$ являются безразмерными, а их величины можно представить в виде неотрицательных вещественных чисел ($r_{h_i}^k, r_{b_j}^k \epsilon \mathbb{R}_{\geq 0}$).

Предположим, что требуемый к выполнению полный объём работ задан вектором $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$.

Далее введем дополнительную характеристику участников команды – затраты на выполнение определенного вида работ, зависящие от объема этих работ x и эффективности конкретного члена команды r, т.е. определяемые функцией затрат с двумя переменными для людей и роботов соответственно $c_i\left(x_{h_i}, r_{h_i}\right)$ и $c_j\left(x_{b_j}, r_{b_j}\right)$, при этом $x_{h_i} = \left(x_{h_i}^1, x_{h_i}^2, \dots, x_{h_i}^q\right), x_{b_j} = \left(x_{b_j}^1, x_{b_j}^2, \dots, x_{b_j}^q\right)$.

В общем случае функции затрат относятся к производственным функциям, однако для определения конкретного вида функции отдельно для людей и коботов выявим суть самих затрат, которые понесут участники команды при выполнении определенного объема работ конкретного вида.

Примем за затраты для людей выплачиваемую им заработную плату, а для роботов – затраты на эксплуатацию и обслуживание (амортизационные расходы для упрощения не учитываем). В этом случае при увеличении объема работ для человека потребуется не только увеличивать его заработную плату, но и выплачивать дополнительные денежные средства для удержания в команде, отдельно оплачивать его работу в нерабочие дни, после окончания рабочего времени в рабочие дни и т.д.

Кроме того, при увеличении объема работ, назначаемого человеку, его эффективность неизбежно начнет снижаться, в том числе до значения, близкого к нулю, например, в случае перенапряжения. Вместе с тем, затраты на кобота будут расти пропорционально количеству работ определенного вида или общего количества всех назначенных работ всех видов (в случае ненулевой эффективности для всех указываемых видов работ, без учета сценариев поломки робота и оплаты стоимости его ремонта).

С другой стороны, затраты в общем виде могут отражать и время, необходимое для выполнения работ. По аналогии с первым случаем при

перенапряжении, отсутствии или недостатке полноценного отдыха человек будет терять эффективность с течением времени (в конечном счете – до около нулевого значения). Кобот же может функционировать круглосуточно, а время на выполнение определенной работы не зависит от продолжительности его непрерывного функционирования.

Таким образом, в случае увеличения объема работ для человека его затраты будут увеличиваться нелинейно, а для кобота – линейно. В связи с этим возьмем линейную функцию для определения затрат кобота, а в качестве функции затрат людей для упрощения создаваемой модели будем использовать квадратичную производственную функцию Кобба-Дугласа, которая для i-го агента, выполняющего k-ый вид работ с эффективностью r_{h_i}, примет следующий вид:

$$c_i\left(x_{h_i}, r_{h_i}\right) = \sum_{k=1}^{q}\left(\frac{(x_{h_i}^k)^2}{2r_{h_i}^k}\right) \quad (2)$$

Выпуклость функции затрат для человека будет означать убывающую отдачу от него при наращивании объема назначаемой ему работы k-го вида и неизменности значения эффективности выполнения им этого вида работ. В этих же условиях отдача от действий кобота будет пропорционально возрастать [73].

Для всех участников в команде считаем, что $c_i(\cdot,\cdot)$ и $c_j(\cdot,\cdot)$ неотрицательны, монотонно возрастают и невогнуты по первому аргументу, монотонно убывают по второму, а также $c_i(0,\cdot) = c_j(0,\cdot) = 0$. Содержательно монотонность отражает рост затрат при увеличении объёма выполняемых работ (первый аргумент). При этом, чем выше эффективность (второй аргумент), тем ниже затраты. Невогнутость отражает тот факт, что затраты возрастают как минимум линейно (для роботов), а в случае выпуклой функции затрат – тем быстрее, чем больший объём работ назначен члену команды (эффект уставания для человека).

Зададим следующие условия:

– любой член команды может выполнить любой неотрицательный объём работ каждого вида;

– функции затрат аддитивны (т.е. не учитывается дополнительность затрат по различным видам работ).

При выполнении данных условий субоптимальное распределение работ между членами команды можно найти, решив следующую задачу:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} c_i\left(x_{h_i}, r_{h_i}\right) + \sum_{j=1}^{m} c_j\left(x_{b_j}, r_{b_j}\right) \to \min\limits_{\left\{\left\{x_{h_i}^k \geq 0\right\}, \left\{x_{b_j}^k \geq 0\right\}, k=\overline{1,q}\right\}}, \\ \sum_{i=1}^{n} x_{h_i}^k + \sum_{j=1}^{m} x_{b_j}^k = V^k, k \in [1, q]. \end{cases} \quad (3)$$

Если функции затрат членов команды являются функциями Кобба-Дугласа, то затраты по людям и коботам примут следующий вид:

$$c_i\left(x_{h_i}, r_{h_i}\right) = \sum_{k=1}^{q} r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right), \quad (4)$$

$$c_j\left(x_{b_j}, r_{b_j}\right) = \sum_{k=1}^{q} r_{b_j}^k \varphi\left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}\right), i \in [1, n], j \in [1, m], \quad (5)$$

где:

$\varphi(\cdot)$ – возрастающая выпуклая гладкая функция,

$\varphi(0) = 0$), то решение задачи (1) будет соответствовать решению задачи оптимального распределения работ между членами однородной команды, представленной в [73]. В то же время, специфика смешанной команды, включающей два вида участников различной природы, требует рассмотрения постановок задач со следующими расширениями и ограничениями:

1. Разные функции затрат для разных видов членов команды – людей и коботов.

2. Ограниченная активность роботов в команде (данное условие соответствует принципам взаимодействия человека и коллаборативного робота в рамках КРТС).

3. Зависимость затрат роботов на выполнение некоторого вида работ от количества людей, назначенных на выполнение того же вида работ.

Рассмотрим ниже несколько постановок таких задач с различными ограничениями и приведём ряд примеров решения задачи оптимизации.

2.2.1. Случай 1. Разнородность функций затрат участников

Пусть функции затрат членов команды – коботов и людей соответственно – имеют вид:

$$c_j\left(x_{b_j}, r_{b_j}\right) = \sum_{k=1}^{q} \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k},\ j \in [1, m], \tag{6}$$

$$c_i\left(x_{h_i}, r_{h_i}\right) = \sum_{k=1}^{q} r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right), i \in [1, n], \tag{7}$$

где:

$\varphi(\cdot)$ – возрастающая выпуклая гладкая функция,

$\varphi(0) = 0$.

Предположим, что функции затрат аддитивны. Рассмотрим последовательно несколько случаев задачи формирования команды, при которых:

1. Некоторый объём работ единственного вида распределяется между двумя участниками команды, один из которых является человеком, а другой – коллаборативным роботом ($q = 1,\ n = 1,\ m = 1$);

2. Объёмы работ различных q видов распределяются между участниками команды с составом, аналогичным п. 1 ($q \in \mathbb{N},\ 1 < q < +\infty, n = 1,\ m = 1$).

3. Объём работ единственного вида распределяется между n людьми и m коботами ($q = 1, n, m \in \mathbb{N}, n > 1, m > 1$).

4. Объёмы работ различных видов в количестве q распределяются между n людьми и m коботами ($q, n, m \in \mathbb{N}, q < \infty, n < \infty, m < \infty$).

Рассмотрим вначале случай 1 и решим эту задачу в дискретном виде. Предположим, что объём работ включает в себя V идентичных атомарных

операций, т.е. $x = \sum_{l=1}^{V} v_l$. Тогда общие затраты системы на выполнение объёма работ *x* могут записываться как:

$$c_c(x_h, r_h, x_b, r_b) = c_h(x_h, r_h) + c_b(x_b, r_b), \text{ либо} \quad (8)$$

$$c_t(x_h, r_h, x_b, r_b) = \max\{c_h(x_h, r_h), c_b(x_b, r_b)\}, \quad (9)$$

$$x_h = \sum_{h \in H} v_h \, , x_b = \sum_{b \in B} v_b \, , x = x_h + x_b, \quad (10)$$

где:

$c_h(\cdot,\cdot)$ – функция затрат человека,

$c_b(\cdot,\cdot)$ – функция затрат кобота,

x_h, x_b – объёмы работы, выполняемые человеком и коботом соответственно,

H и B – некоторые множества индексов такие, что $H \cup B = \{1, 2, \dots, V\}$.

Функцию общих затрат $c_c(x_h, r_h, x_b, r_b)$ следует использовать, когда затраты сепарабельны (например, издержки на оплату труда людей и содержание коботов). Если же требуется, например, проводить оптимизацию по времени выполнения всего пула работ, тогда следует пользоваться функцией $c_t(x_h, r_h, x_b, r_b)$. Далее в тех случаях, когда вид функции затрат неважен, будем пользоваться записью функции $c(x_h, r_h, x_b, r_b)$.

Задача оптимального распределения работ заключается в нахождении значений $x_h = x_h^* \geq 0$, $x_b = x_b^* \geq 0$, минимизирующих значение функции общих затрат, то есть:

$$c^*(x_h^*, r_h, x_b^*, r_b) = \underset{\substack{x_h \geq 0, x_b \geq 0, \\ x = x_h + x_b}}{\text{Argmin}} \; c(x_h, r_h, x_b, r_b) \quad (11)$$

Для решения этой задачи можно использовать следующий алгоритм. Предположим, что для объёма работ $x^{V-1} = \sum_{l=1}^{V-1} v_l$ известны минимизирующие затраты, которые представлены следующим выражением $x_h^{V-1} = \sum_{h \in H} v_h$, $x_b^{V-1} = = \sum_{b \in B} v_b$, $x^{V-1} = x_h^{V-1} + x_b^{V-1}, H \cup B = \{1, 2, \dots, V-1\}$, тогда величина минимальных затрат равна – в зависимости от типа затрат:

$$c_c^{V-1} = c_c(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) = c_h(x_h^{V-1}, r_h) + c_b(x_b^{V-1}, r_b), \text{ либо} \quad (12)$$

$$c_t^{V-1} = c_t(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) = \max\{c_h(x_h^{V-1}, r_h), c_b(x_b^{V-1}, r_b)\}. \quad (13)$$

Величину минимальных общих затрат для объёма работ $x^V = x^{V-1} + v_V$ можно определить следующим образом:

$$c_c^V = c_c(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = c_c^{V-1}(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) + \\ + \min\begin{Bmatrix} c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h) - c_h(x_h^{V-1}, r_h), \\ c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b) - c_b(x_b^{V-1}, r_b) \end{Bmatrix}, \text{ либо} \quad (14)$$

$$c_t^V = c_t(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = \min\begin{Bmatrix} \max\{c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h), c_b(x_b^{V-1}, r_b)\}, \\ \max\{c_h(x_h^{V-1}, r_h), c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b)\} \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

Так как для выбранных функций затрат значения объемов работ должны быть больше нуля (в силу того, что $c_h(0, r_h) = c_b(0, r_b) = 0$), то с помощью метода математической индукции можно убедиться, что значения минимальных общих затрат c_c^V и c_t^V могут быть найдены для любого $V > 0$. Отметим, что предложенный алгоритм применим на случай произвольного ограниченного числа участников смешанной команды, т.е. применим также для решения задачи случая 3.

Далее рассмотрим задачу случая 2. Если функции затрат коботов и людей имеют вид (2) и (3) соответственно, то задачу можно решить следующим образом.

Пусть распределяемые объёмы работ заданы вектором $V = (V^1, \dots, V^q)$, $V^k \geq 0, k \in [1, q]$, т.е. k-й вид работ состоит из $V^k \geq 0$ идентичных атомарных операций. При этом операции, составляющие различные виды работ, попарно различны и выполняются участниками команды в общем случае с разной эффективностью. Для каждого $k = \overline{1, q}$ будем вычислять значения минимальных затрат системы на выполнение объёма работ V_k.

$$c_c^{V^k} = c_c\left(x_h^k, r_h^k, x_b^k, r_b^k\right) = c_h\left(x_h^k, r_h^k\right) + c_b\left(x_b^k, r_b^k\right), x_h^k + x_b^k = V^k. \quad (16)$$

Для этого необходимо вычислять значения x_h^k и x_b^k, что можно в соответствии с решением задачи 1. Тогда минимальные затраты на выполнение всего объёма работ V будут равны:

$$c_c^V = \sum_{k=1}^{q} c_c^{V^k}. \quad (17)$$

Задача случая 4 решается аналогично.

2.2.2. Случай 2. Ограниченная активность членов команды

Предположим, что функции затрат членов команды имеют вид (6) и (7) для коботов и людей соответственно. Введём следующее ограничение: каждый из заданных вектором $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$ объёмов работ должен выполняться как минимум двумя членами команды, один из которых обязательно является человеком.

Будем решать задачу (3) в непрерывном виде. Рассмотрим следующие частные случаи:

1. Один вид работ, один человек, m коботов.
2. Один вид работ, n людей, m коботов.
3. q видов работ, один человек, m коботов.
4. q видов работ, n людей, m коботов.

Рассмотрим случай 1. Пусть x_h – часть объёма работ, который необходимо распределить для выполнения человеком. Итоговое распределение всего объёма работ V между членами команды должно минимизировать затраты на его выполнение, при этом сам объём работ заранее неизвестен. Добиться этого можно, минимизируя приращение затрат при приращении объёма работ. Поскольку функции затрат коботов $c_j\left(x, r_{b_j}\right)$ линейны, то для обеспечения минимума затрат

требуется выбрать кобота j, выполняющего данный вид работ с максимальной эффективностью, и назначить ему часть объёма работ в размере $V - x_h$.

Теперь найдем x_h. Заметим, что поскольку $c_i(x, r_h)$ – выпуклая функция, то $\forall j \in [1, m]\ \exists x_j^0 : \forall x > x_j^0\ c_i(x, r_h) > c_j\left(x, r_{b_j}\right)$. В силу непрерывной дифференцируемости функции $c_i(x, r_h)$, если выполняется следующее условие $\exists x_E > 0 : c_i(x, r_h) = c_j\left(x, r_{b_j}\right)$ то $\exists x_h \in (0, x_E) : c_i'(x_h, r_h) = c_j'\left(x_h, r_{b_j}\right) = \frac{1}{r_{b_j}}$, получаем искомую часть объёма работ.

В случае, когда учитывается условие, что функция затрат человека больше значения функции затрат коллаборативного робота на один распределяемый ненулевой объем работ $c_i(x, r_h) > c_j\left(x, r_{b_j}\right)\ \forall x > 0$, то оптимального решения не существует.

Предложенное решение применимо на случай произвольного ограниченного числа участников смешанной команды, т.е. решает также и задачу случая 3.

Рассмотрим задачу случая 2. Алгоритм решения тот же, но теперь необходимо искать такой вектор, при котором выполняется условие $\{x_{h_1}, \dots, x_{h_n}\} : \forall i \in [1, n]\ c_i'(x_{h_i}, r_{h_i}) \le \frac{1}{r_{b_j}}$.

Если $\sum_{i=1}^{n} x_{h_i} \le V$, то решение для каждого из членов команды – людей можно найти в соответствии с решением для задачи случая 1. Если же $\sum_{i=1}^{n} x_{h_i} > V$, то распределение работ должно удовлетворять следующему условию $c_1'(x_{h_1}, r_{h_1}) = c_2'(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c_n'(x_{h_n}, r_{h_n}) \le c_j'\left(x_h, r_{b_j}\right) = \frac{1}{r_{b_j}}$.

Задача случая 4 решается аналогично.

2.2.3. Случай 3. Зависимость функций затрат участников одного типа от числа участников другого типа

Рассмотрим задачу о формировании смешанной неоднородной команды для случая, когда эффективность коботов зависят от числа людей, выполняющих этот же вид работ. Действующие требования к безопасности коллаборативных робототехнических систем требуют выбора траекторий движения, исключающих причинение травм человеку. В связи с этим разумным является предположение о том, что чем больше в рабочей зоне людей, тем более сложные траектории движения придётся выбирать роботу – таким образом, его эффективность будет снижаться. Кроме того, в этом случае функция затрат для коботов будет зависеть еще и от количества людей с ненулевой эффективностью выполнения работ:

$$c_{b_j} = f\left(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k\right) \tag{18}$$

Рассмотрим случай с линейным падением эффективности. Пусть функции затрат членов команды – коботов имеют вид:

$$c_{b_j}\left(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k\right) = \sum_{k=1}^{q} (1 + N_k)\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k},\ j \in [1, m]. \tag{19}$$

В рамках заданной функции затрат N_k – число людей, которым распределён ненулевой объём работ вида k. Функции затрат людей имеют вид (5). Как и ранее, все затраты считаем аддитивными по видам работ.

Будем решать задачу (3) в непрерывном виде. Рассмотрим следующие частные случаи:

1. Один вид работ, n людей, один кобот.
2. q видов работ, n людей, один кобот.

Отметим, что при подобной постановке задачи достаточно рассмотреть решение для единственного коллаборативного робота, так как функции затрат его линейны.

Рассмотрим случай, когда требуется распределить между участниками команды объёмы работ одного вида. Вначале заметим, что при $V \to +\infty$ нет никакого смысла включать в команду более одного человека. Очевидно, что при увеличении N_k увеличивается и производная функции затрат (19) – следовательно, при достаточно большом значении объема работ V более быстрый рост затрат перекроет выгоду от распределения части объёма работ на людей, чьи функции затрат выпуклы и растут при небольших значениях x_{h_i} медленнее, чем у кобота.

С другой стороны, при фиксированном объёме работ и достаточном количестве людей может получиться так, что $\exists\{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\}: \sum_{i=1}^{n} x_{h_i} = V$, то функция затрат примет следующий вид:

$$c_{h_1}^{'}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c_{h_2}^{'}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c_{h_n}^{'}(x_{h_n}, r_{h_n}) \le c_b^{'}(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}. \quad (20)$$

В этом случае очевидно, что включать в команду кобота нецелесообразно, и весь объём работ следует поделить между людьми.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда $V = const < +\infty$, а количество людей n имеет такое значение, что $\forall\{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\}: \sum_{i=1}^{n} x_{h_i} = V$, тогда функция затрат примет следующий вид:

$$c_{h_1}^{'}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c_{h_2}^{'}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c_{h_n}^{'}(x_{h_n}, r_{h_n}) > c_b^{'}(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}. \quad (21)$$

Вначале посчитаем издержки для смешанной команды из одного человека и одного кобота. В общем случае выберем условную нумерацию людей таким образом, чтобы их эффективность не росла с увеличением номера, т.е. соблюдалось следующее условие $r_{h_1} \ge r_{h_2} \ge \dots \ge r_{h_n}$.Также будем считать, что $\forall i \in \{1, \dots, n\}\ \exists x^{(i)} > 0: \forall 0 \le x \le x^{(i)}\ c_{h_i}(x, r_{h_i}) \le c_b\left(x, r_{b_j}, i\right)$. Тогда производная функции затрат примет следующий вид (23):

$$c_{h_1}^{'}\left(x_{h_1}^{(1)}, r_{h_1}\right) = c_b^{'}(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}, \quad (22)$$

$$c^{(1)} = r_{h_1}\varphi\left(\frac{x_{h_1}^{(1)}}{r_{h_1}}\right) + 2\frac{V - x_{h_1}^{(1)}}{r_b}. \quad (23)$$

При добавлении в команду ещё одного человека возможны два варианта:

В первом случае, когда распределяемый объем работ на второго участника команды будет составлять в сумме с первым полный объем рассматриваемой работы ($\exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)}: x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} = V$), тогда функция затрат примет следующий вид:

$$c_{h_1}^{'}\left(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}\right) = c_{h_2}^{'}\left(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}\right) \leq c_b^{'}\ \left(r_{b_j}, 2\right) = \frac{3}{r_{b_j}}, \tag{24}$$

$$c^{(1)} = r_{h_1}\varphi\left(\frac{x_{h_1}^{(1)}}{r_{h_1}}\right) + 2\frac{V - x_{h_1}^{(1)}}{r_b}. \tag{25}$$

Во втором случае, если объем работ меньше общего объема рассматриваемой работы ($\exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)}: x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} < V$), то функция затрат примет следующий вид:

$$c_{h_1}^{'}\left(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}\right) = c_{h_2}^{'}\left(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}\right) = c_b^{'}\ \left(r_{b_j}, 2\right) = \frac{3}{r_{b_j}}. \tag{26}$$

Первый вариант соответствует случаю, когда минимум затрат достигается при распределении всего объёма работы среди людей, без задействования кобота. Рассмотрим второй вариант. Заметим, что в силу выпуклости функции затрат $c_1\left(x, r_{h_1}\right)$, $x_{h_1}^{(2)} > x_{h_1}^{(1)}$. Обозначим $\Delta^{(1)} = x_{h_1}^{(2)} - x_{h_1}^{(1)}$. Теперь рассчитаем затраты для этого случая по формуле (27):

$$c^{(2)} = r_{h_1}\varphi\left(\frac{x_{h_1}^{(1)} + \Delta^{(1)}}{r_{h_1}}\right) + r_{h_2}\varphi\left(\frac{x_{h_2}^{(2)}}{r_{h_2}}\right) + 3\frac{V - x_{h_1}^{(1)} - \Delta^{(1)} - x_{h_2}^{(2)}}{r_b}. \tag{27}$$

В общем случае о том, в каком отношении находятся $c^{(1)}$ и $c^{(2)}$, ничего сказать нельзя. Точное решение этой задачи даже для случая $r_{h_1} = r_{h_2} = r_h$, когда все люди выполняют работу с одинаковой эффективностью, в проанализированных источниках литературы отсутствует.

2.3. Выводы по Главе 2

Предложенная структура системы управления КРТС разработана по принципу модульности для обеспечения эффективного формирования и функционирования

смешанной неоднородной команды коботов и людей. В такой системе управление предполагает распределение работ в команде на нижнем уровне управления и возможность для человека тактического управления действиями кобота.

Управление в КРТС предполагает распределение работ человеку и коботу на нижнем уровне системы управления и использование человека для тактического управления действиями кобота. Гибридная стратегия управления в КРТС ориентирована на оптимизацию общей производительности и эффективное решение задач, поставленных отдельным управляющим центром (в случае централизованной схемы управления) или одним из участников смешанной неоднородной команды (для децентрализованного управления). Коллаборативное взаимодействие рассматривается в качестве совершения целенаправленных и совместных действий детерминированными коллаборативными роботами и людьми с недетерминированным поведением в едином рабочем пространстве при выполнении совместных задач.

Разработан метод распределения работ в КРТС, обеспечивающий повышение эффективности функционирования смешанных неоднородных команд за счет минимизации затрат на выполнение производственных операций. В свою очередь алгоритм с минимизацией затрат на основе разработанного метода обеспечивает формирование смешанной неоднородной команды с гетерогенными участниками, позволяющий учитывать специфику разнородности членов команды.

В рамках исследовательской работы рассмотрена общая постановка задачи для минимизации обобщенных производственных функций затрат (например, Кобба-Дугласа) для участников гетерогенных смешанных команд, а также частные случаи со следующими условиями:

1. Разные виды функций затрат для разных типов участников команды – людей и коботов.
2. Ограниченная активность коботов в команде.
3. Наличие зависимости затрат коботов на выполнение некоторого вида работ от количества людей, назначенных на выполнение того же вида работ.

Результаты данной главы опубликованы в работах [39, 92, 94, 96, 106, 113, 122, 123].

ГЛАВА 3. АЛГОРИТМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕКОЙ СИСТЕМЕ

В Главе 3 описан предложенные алгоритмы распределения работ среди участников смешанной неоднородной команды КРТС по критериям производительности (минимизации затрат) и снижения временных издержек.

3.1. Алгоритм распределения работ в КРТС с минимизацией затрат

Алгоритм распределения работ в коллаборативной робототехнической системе для минимизации затрат, требуемых на выполнение операций, включает следующие шесть этапов:

Этап 1. Определение максимально возможного состава команды: определение количества людей $n \geq 1$ и коллаборативных роботов $m \geq 1$, функционирующих в составе КРТС.

Этап 2. Определение количества выполняемых работ путем задания количества требуемых к выполнению $q > 1$ типов работ (функций).

Этап 3. Определение общего объема работ в виде полного вектора (для всей КРТС) неотрицательных объемов работ по q видам работ (функциям) с общим значением, равным их сумме $V = (V^1, \dots, V^q), V = \sum_{k=1}^{q} V^k, V^k \geq 0, k \in [1, q]$, либо в виде двух векторов объемов работ по q видам работ (функциям) – отдельно для людей: $V_h = \left(V_h^1, V_h^2 \dots, V_h^q\right), V_h = \sum_{k=1}^{q} V_h^k,\ V_h^k > 0, k \in [1, q]$ и коботов: $V_b = \left(V_b^1, V_b^2 \dots, V_b^q\right), V_b = \sum_{k=1}^{q} V_b^k, \forall k\colon V_b^k > 0,\ k \in [1, q]$.

Во втором случае сумма объемов работ для коботов и людей для любого k вида работ (функции) должна быть равна общему объему работ для этой функции для всей КРТС $\forall k \in [1, q]\colon V_h^k + V_b^k = V^k$, а сумма объемов работ для коботов и

людей для всех q видов работ (функций) – равна общему объему работ: $\sum_{k=1}^{q} V_h^k + \sum_{k=1}^{q} V_b^k = V$.

Этап 4. Задание значений эффективности каждого участника КРТС для всех q видов работ. Любой кобот и человек в команде способен выполнять все q видов работ, но с разной эффективностью, задаваемой матрицами эффективности разной размерности для людей: $r_h = (r_{h\,i}^k)_{q\times n}, k \in [1,q], i \in [1,n]$ и коботов: $r_b = (r_{b\,j}^k)_{q\times m}, k \in [1,q], j \in [1,m]$ соответственно. Значение эффективности любого кобота или человека по выполнению любого вида работ (функции) должна быть неотрицательна и может быть нулевой $\forall k,i,j: r_{h_k\,i} \geq 0, r_{b_k\,j} \geq 0$.

Этап 5. Определение вида производственной функции для каждого типа участников КРТС. Согласно разработанному методу распределения работ, в качестве функций затрат может быть использована обобщенная функция Кобба-Дугласа: $c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^{q} \varphi_1\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right)$, $c_j\left(x_{b_j}, r_{b_j}\right) = \sum_{k=1}^{q} \varphi_2\left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}\right)$, где $i \in [1,n], j \in [1,m]$, $\varphi(0) = 0$.

Этап 6. На основании математической модели, представленной в разработанном методе (см. Главу 2), осуществляется распределение работ среди участников КРТС. Для указанных видов функций затрат разнородных участников в смешанной неоднородной команде КРТС данные функции являются одновременно обобщёнными функциями Кобба-Дугласа и возрастающими гладкими функциями, а значит решение задачи распределения работ возможно за счет решения оптимизационной задачи (3) предложенного метода.

Блок-схема алгоритма распределения работ с минимизацией затрат для участников КРТС представлена на Рис. 3.1.

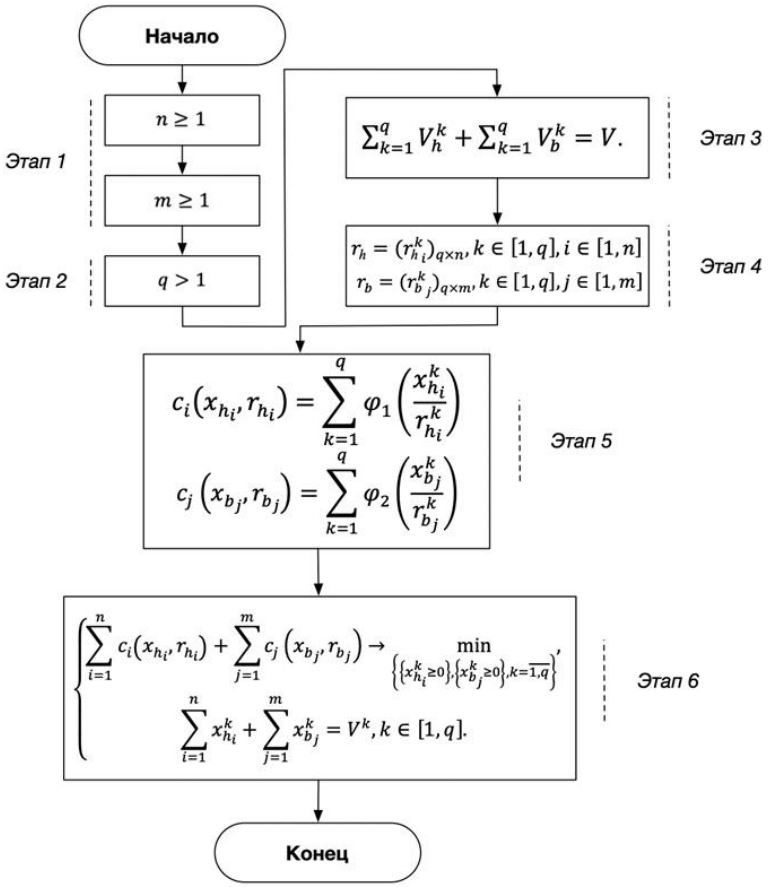


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритма распределения работ с минимизацией затрат в КРТС

3.2. Сравнение предложенного метода и алгоритма распределения работ с минимизацией затрат с существующими решениями

Ниже представлены описания существующих методов, подходов и алгоритмов распределения работ в робототехнических системах, в том числе коллаборативных, учитывающих необходимость минимизации затрат их участников.

В работе [124] представлен метод распределения работ в КРТС на основе формирования модели окружающей среды и моделей состояния других агентов (роботов и людей). Основой метода является представленный в работе планировщик заданий, формирующий подзадачи для каждого агента с учетом

информации об окружающей среде и состоянии других участников КРТС, при этом передача заданий людям осуществляется с использованием человеко-машинных интерфейсов, а роботам – за счет использования радиочастотных меток RFID (Radio Frequency IDentification). Модель состояния агента и окружающей среды обновляется после выполнения им каждой из назначенных задач. При распределении задач предлагаемый метод позволяет учитывать рабочую нагрузку агентов, их опыт выполнения конкретных задач (эффективность выполнения определенных операций), другие ограничения и параметры, которые задаются в весовой функции. Достоинствами предложенного метода являются возможность задания произвольного количества людей и роботов в КРТС, разбиение общей задачи на подзадачи, а также наличие глобального планировщика задач. Совместно с методом распределения работ в КРТС на основе формирования модели окружающей среды и моделей состояния других агентов в работе [124] представлен также соответствующий алгоритм. В алгоритме учитывается возможность назначения работ людям, выбора другого типа работы для людей и их взаимодействия с коботами при распределении задач с использованием человеко-машинного интерфейса. Схема назначения работ в рамках предложенного метода и блок-схема соответствующего алгоритма представлены на Рис. 3.2. и Рис. 3.3. соответственно.

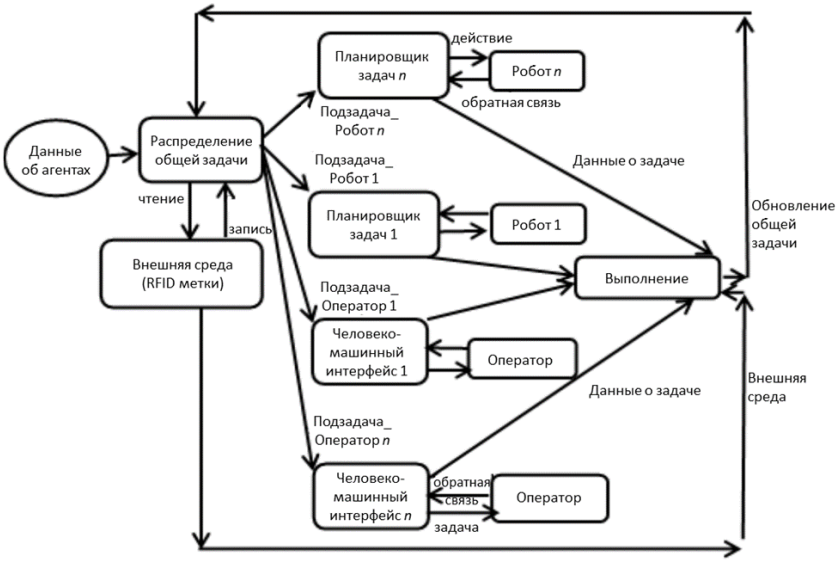


Рис. 3.2. Схема назначения работ с помощью предложенного алгоритма [124] (перевод на русский язык)

Достоинствами предложенных метода и алгоритма являются учет произвольного количества людей и роботов, разделение рабочего процесса на подзадачи, наличие глобального планировщика задач. В качестве недостатков следует отметить возможное отсутствие коллаборации (когда люди и роботы выполняют непересекающиеся наборы задач), отсутствие явного описания зависимости работ и возможные задержки между выполнением операций.

Алгоритм. Процедура распределения общей задачи

Входные данные:
1: *L_T*: список операций в общей задаче
2: *Ag*: список агентов
3: *Ct*: список ограничений
4: *Pr*: список предпочтений
5: *Wl*: список объемов работ
6: *sub_M*: список подзадач
7: *Exp*: список опыта агентов
8: *Na*: количество агентов
9: *Nc*: количество ограничений
10: *ta*: операция
11: *agent*: агент
12: *G_S*: глобальная оценка
13: *w1...3*: функции взвешивания
14: *PA*: Список возможных агентов, соблюдающих ограничения.
15: SC1...3: перечень оценок
15: **пока** (*L_T.hasNext*()) **выполнять**
16: *ta* ← *L_T.getFirstFreeTask*();
17: *Filter*(*Ag*, *ta*, *Ct*, *Na*, *Nc*,*PA*);
18: **если** (*PA*[].*isEmpty*), **тогда**
19: *Sub_M*[*PA*[]]= ∅
20: **иначе, если** (*PA*[].*size*==1)
21: *Sub_M*[*PA*[0]].*add*(t);
22: **иначе**
23: *SC1*[] = getscore (*ta*, *PA*[], *Pr*);
24: *SC2*[] = getscore (*ta*, *PA*[], *Exp*);
25: *SC3*[] = getscore (*ta*, *PA*[], *Wl*);
26: *G_S*[]=*Global_Score* (*PA*[], *SC1*[], *SC2*[],
27: *SC3*[], *w1*,*w2*,*w3*)
28: *agent*= selectAgent(PA[],*G_S*)
29: *Sub_M*[*agent*].*add*(*ta*)
30 **конец если**
31: **конец пока**
32: **Выходные данные:** *SubM*

Рис. 3.3. Алгоритм назначения работ [124] (перевод на русский язык)

Другой подход, основанный на распределении задач в КРТС, представлен в работе [125], в котором взаимодействуют агенты, объединенные единой гибридной волоконно-беспроводной сетью (Рис. 3.4.). Подход позволяет учитывать произвольное количество роботов, наличие опыта выполнения (эффективность)

определенной работы/операции, расстояние до рабочего места и энергетические ресурсы роботов. Для повышения отказоустойчивости КРТС и оперативности восстановления работоспособности роботов представлен алгоритм оповещения об отказе соседнего (ближайшего) робота. В подходе также учитывается возможность распределения различных ресурсов, необходимых для выполнения работ. Распределение работ осуществляется как на глобальном (глобальный планировщик для всей КРТС), так и на локальном уровне (робототехнические ячейки и отдельные агенты).

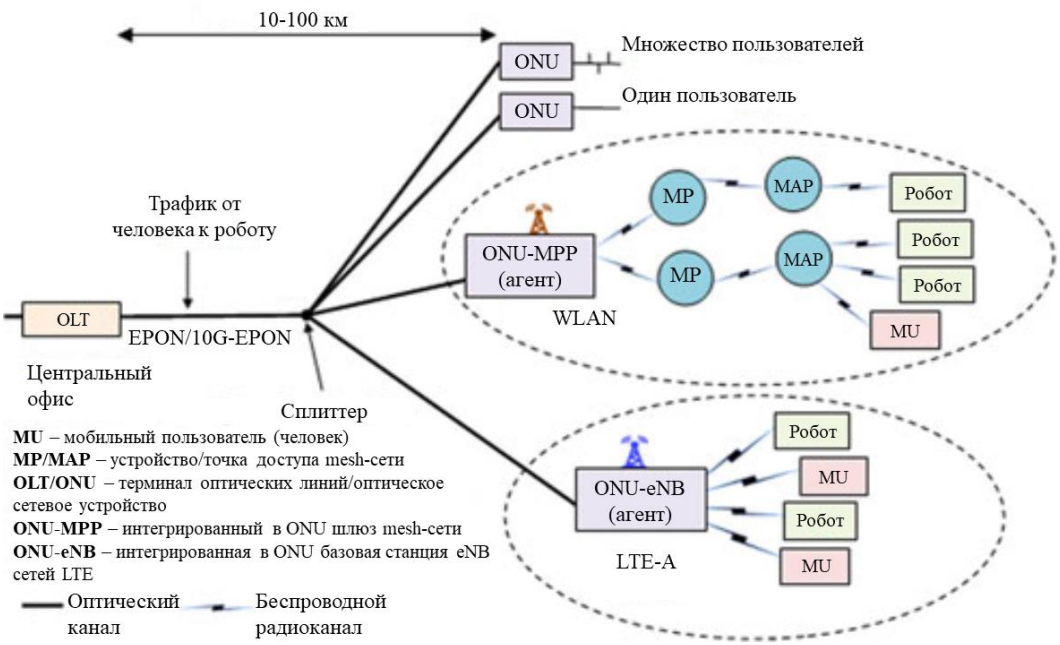


Рис. 3.4. Схема управления КРТС и взаимодействия ее участников, объединенных в единую гибридную волоконно-беспроводную сеть [125]
(перевод на русский язык)

Совместно с подходом к распределению задач для КРТС, объединенных в единую гибридную волоконно-беспроводную сеть, представлен также соответствующий алгоритм. Координирующий агент сети отправляет всем роботам запрос на назначение задачи, роботы отправляют ответное сообщение, в котором указываются их текущие энергетические характеристики, текущее местоположение, тип робота, состояние (доступность для выполнения задачи) и другие значения параметров. На основании полученных ответов координатор осуществляет выбор наиболее подходящего агента, вычисляя значения функции

стоимости (затрат) для каждого робота. Кроме того, учитываются требования наблюдения роботом за действиями соседнего агента и отправки сообщения координатору в случае его выхода из строя, а также распределение и назначение дополнительных ресурсов при выполнении задач. Алгоритм распределения работ представлен на Рис. 3.5.

Алгоритм. Распределение задач

Вх. данные: количество поступающих задач (N_{task}), количество роботов для любого ONU-MPP (m), тип задачи (t^i_{type}), раб. нагр-ка (L_i), назнач-ие (тип) робота (r^j_{type}), порог. знач-ие по энергии для каждой задачи (e_{th}), расст-ие от робота до места вып-ия задачи $(\bar{d}^j_i)$, скорость обработки (s^j_p), скорость дв-ия (s^j_m), сост-ие робота до назначения задач $(s_{j,busy})$, нач-ая энергия (e^j_i), сост-ие выбр-ого робота в ходе распред-ия задач $(s^i_{j,busy})$

1: **для** $i = 1$ **до** N_{task} **выполнять**
2: **для** $j = 1$ **до** m **выполнять**
3: ONU-MPP проверяет доступность и назначение (тип) всех участвующих роботов путем обмена сообщениями T-REQ и T-RES
4: **если** $(s_{j,busy} == false)$ && $(t^i_{type} == r^j_{type})$, **тогда**
5: Проверить остаточную энергию (e^j_r) участвующих роботов
6: **если** $(e^j_r \geq e_{th})$, **тогда**
7: Проверить время вып-ия $t^j_{ex,i} = t_r + t_p = \frac{\bar{d}^j_i}{s^j_m} + \frac{L_i}{s^j_p}$ для всех роботов j
8: Назначить задачу i роботу j с мин. знач-м $t^j_{ex,i}$
9: Все соседние роботы отслеж-т сост-ие выбранного робота $(s^i_{j,busy})$ и отправляют в ONU-MPP сведения о состоянии этого робота
10: **конец если**
11: **конец если**
12: **если** $(s^i_{j,busy} == false)$ в ходе выполнения задачи **тогда**
13: ONU-MPP повторно объявляет задачу i
14: Повт-ть шаги 1: – 11: для выбора робота для задачи i
15: **иначе**
16: Выполнение задач прошло без ошибок
17: **конец если**
18: Каждый робот (j) вычисляет собственное значение e^j_r значение e^j_r по уравнению: $e^j_r = e^j_i - e^j_t$
19: **конец для**
20: **конец для**

Рис. 3.5. Алгоритм распределения работ между участниками, объединенными в единую гибридную волоконно-беспроводную сеть [125]
(перевод на русский язык)

В качестве недостатков, предложенных в работе метода и алгоритма следует отметить возможное отсутствие коллаборации (т.е. допускаются сценарии, когда люди и роботы выполняют непересекающиеся наборы задач).

Подход к распределению работ и соответствующая система принятия решений на основе модифицированной архитектуры КРТС FlexHRC (flexible human-robot-collaboration) для КРТС, в состав которых входят роботы манипуляторного типа, представлен в работе [126]. Предложенный подход предполагает итеративное повторение последовательности действий для каждого агента при распределении работ: восприятие окружающей среды и состояния других участников КРТС, моделирование обстановки и планирование последующих действий. Метод основан на минимизации функции затрат (стоимости) для каждого агента при формировании последовательности его действий в планировщике, при этом учитывается набор допустимых состояний и их переходов, соответствующие затраты, предварительные условия для совершения действия, набор временных состояний агентов, а также векторы состояний каждого участника КРТС. В целом, субоптимальными будут те действия, которые позволяют наиболее эффективно достигать общую цель КРТС. В качестве недостатка следует отметить то, что предложенный подход и модифицированная система принятия решений были апробированы исключительно на робототехнической ячейке (КРТС из одного робота и одного человека). Кроме того, априори задавался набор последовательных задач (без возможности их распараллеливания в рамках технологического процесса). Архитектура модифицированной системы принятия решений FlexHRC для КРТС, включающая взаимосвязь ее составных элементов и потоки данных между ними, представлена на Рис. 3.6.

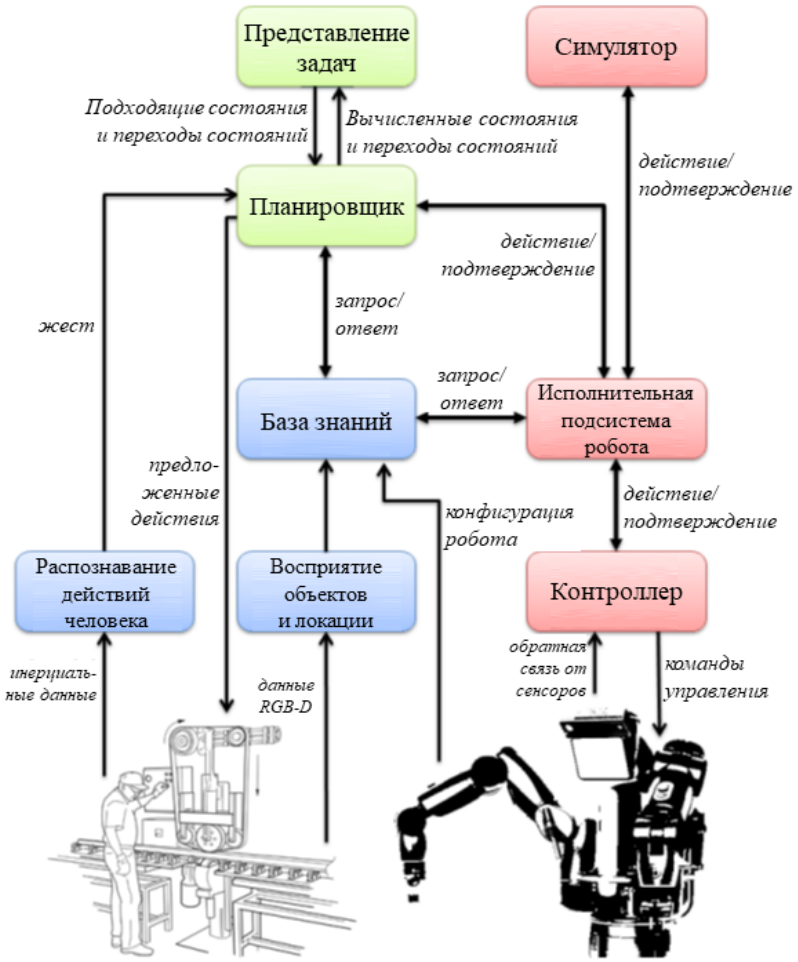


Рис. 3.6. Архитектура системы принятия решений на основе FlexHRC для КРТС [126] (перевод на русский язык)

В работе [127] рассматривается еще один подход ConcHRC (concurrent human-robot-collaboration) на основе FlexHRC с возможность распараллеливания задач при их распределении между агентами. Подход основан на распознавании действий операторов (поз и жестов человека) и адаптации под них действий роботов, а также моделирование сценариев коллаборативного взаимодействия. Использование предложенного подхода на примере робототехнической группы с роботами манипуляторного типа Kuka youBot позволило повысить общую эффективность коллаборации людей и коботов. Основными недостатками предложенного метода являются использование набора независимых локальных планировщиков работ для каждого агента без глобального планировщика задач, а также отсутствие моделей действий, поз и жестов человека, что снижает эффективность распознавания поведения операторов.

В статье [128] предложен двухуровневый метод распределения задач в КРТС на основе теории мультиагентных систем. На первом (верхнем) уровне планирования осуществлялось построение абстрактной модели окружающей среды и использовался мультиагентный подход для формализации коллаборации людей и роботов (конкретно в работе – выполняющих совместные задачи по сборке деталей). Для учета особенностей поведения людей и коботов для этих двух видов агентов использовались разные функции затрат. На выходе первого уровня формировались скоординированные последовательности действий для каждого агента. На втором (нижнем) уровне для каждого агента осуществлялось планирование для выполнения каждого действия с разбивкой на отдельные операции (вплоть до атомарных). Возможно также получение обратной связи и изменение плана (последовательности) действия как для отдельных агентов, так и для всей КРТС. Схема применения представленного метода представлена на Рис. 3.7.

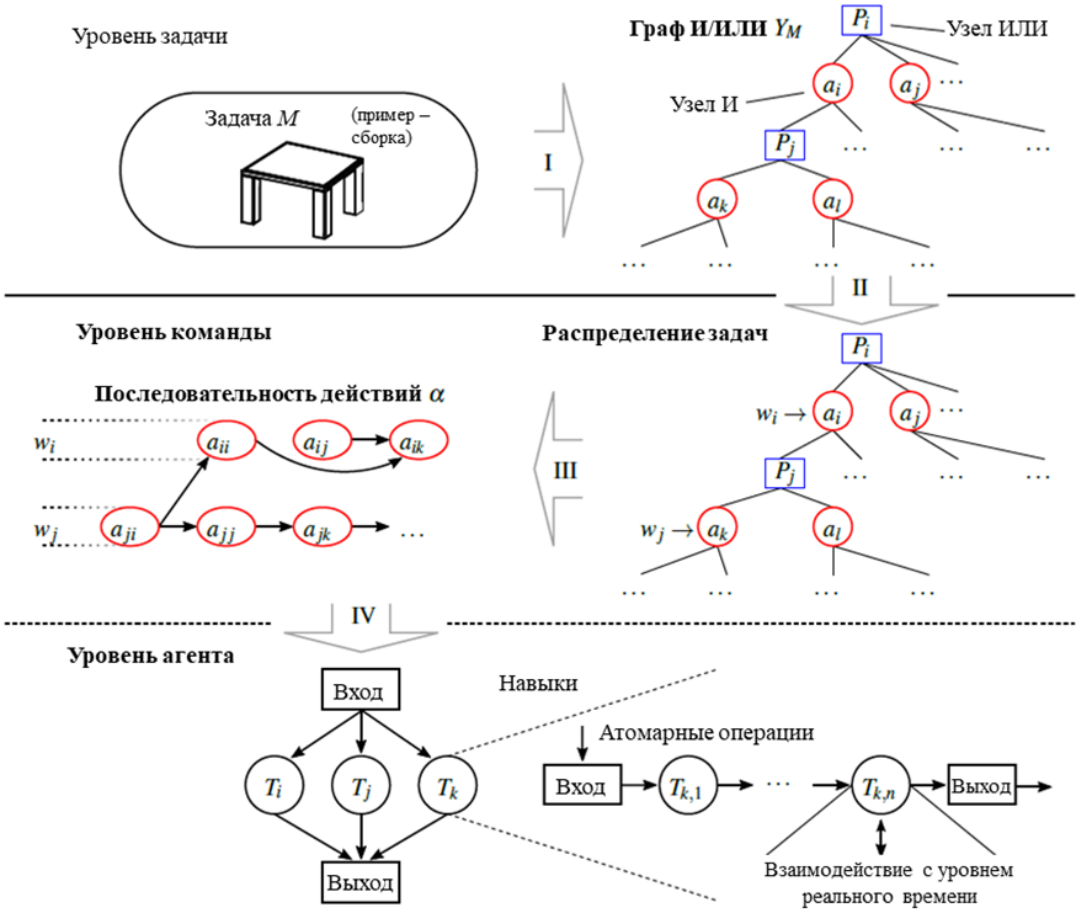


Рис. 3.7. Схема применения двухуровневого метода распределения задач в КРТС с использованием мультиагентного подхода [128] (перевод на русский язык)

Основными недостатками являются возможное отсутствие коллаборации (построение отдельных независимых последовательностей действий для человека и робота). Кроме того, апробация предложенного в работе метода осуществлялась исключительно на примере коллаборативной робототехнической ячейки, для масштабирования на более сложные КРТС, возможно, потребует доработки метода.

Двухуровневый метод формирования КРТС и распределения задач среди ее участников представлен в работе [129]. Верхний уровень отвечает за формирование последовательности задач для каждого агента, нижний – за формирование траекторий движения и элементарных действий роботов. После этапа декомпозиции работ на подзадачи их распределение в КРТС осуществляется на основе марковского процесса принятия решений. Следует отметить, что по сравнению с другими работами, в рамках глобального планирования набор задач для человека формируется роботом (а не наоборот), используя критерии удобства восприятия сформированного пула задач человеком и «справедливости» распределения работ. В качестве недостатка предложенного метода следует отметить высокую сложность восприятия человеком задач, сформированных роботом, а также апробацию исключительно на базе коллаборативной робототехнической ячейки, состоящей из одного человека и двух коботов манипуляторного типа.

В статье [130] предложен метод распределения задач для гетерогенных КРТС, основанный на принципе «искусственного доверия» для роботов, которые могут изучать поведение и возможности других агентов (коботов и людей) и распределять/перераспределять задачи между собой. При распределении задач между агентами в КРТС решается задача максимизации ожидаемого общего вознаграждения всей команды, учитывая затраты, связанные с назначением конкретного агента на выполнение определенной задачи. Доверие агенту вычисляется по соответствующей модели – путем сопоставления возможностей агента и требований к выполнению задачи. При успешном выполнении задачи агентом значение доверия к нему и его возможностям (по выполнению

определенных задач) повышается, при неудаче – снижается. В качестве недостатка следует отметить использование одинаковых моделей вознаграждений и функций затрат для людей и коботов, а также отсутствие учета других факторов, влияющих на значения функций затрат и вознаграждения агентов (например, количество и сложность задач, которые агент уже выполнил, актуальность выполнения задачи и т.д.). Схема распределения и назначения задач среди участников КРТС на основе предложенного метода представлена на Рис. 3.8.

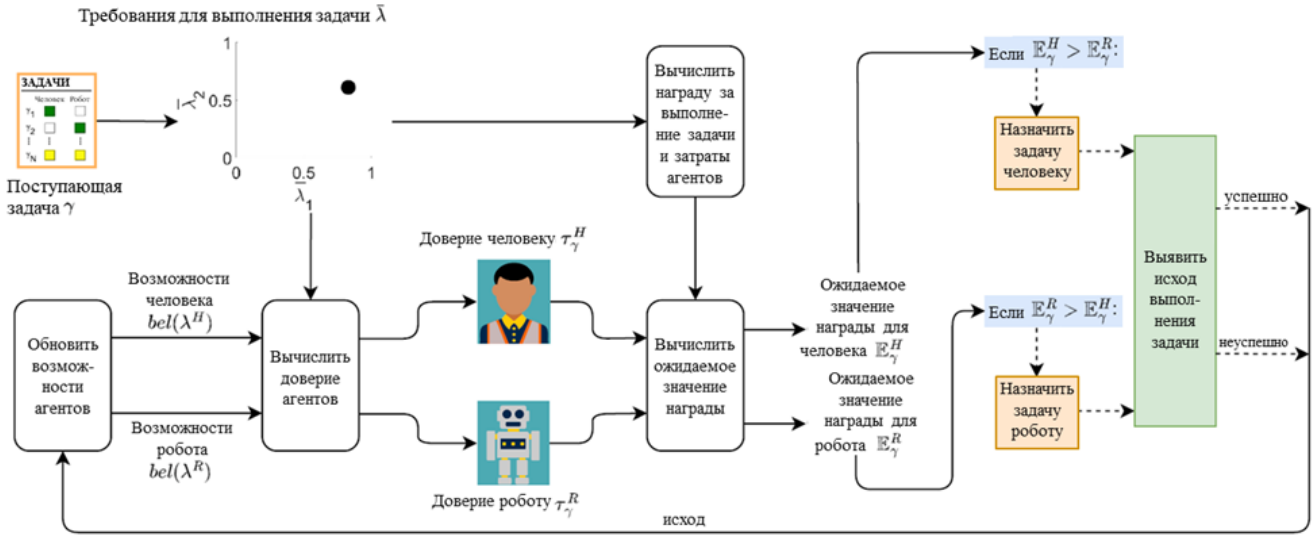


Рис. 3.8. Схема распределения и назначения задач среди участников КРТС на основе предложенного метода [130] (перевод на русский язык)

Распределение задач между агентами возможен также с применением ролевого метода, как представлено в работе [131]. Целью является максимизация производительности и эффективности использования КРТС и выбора состава исполнителей (назначение на работы отдельно людей, коботов или их вместе (коллаборация). Метод основан на предиктивном анализе производительности на основе сценариев взаимодействия при выполнении операций и механизме переключения задач, заключающемся в смене внимания между задачами при воздействии внешних стимулов. Использование предложенного метода позволяет предсказывать производительность КРТС и определять субоптимальное расписание для всех агентов системы, в том числе отдавать задачи на выполнение только роботам или только людям. Недостатком подобного подхода является возможное отсутствие коллаборации, когда люди и роботы выполняют

непересекающиеся наборы задач независимо друг от друга. Помимо ролевого метода распределения задач между агентами КРТС и выбора состава исполнителей предложен соответствующий алгоритм. В нем вводятся следующие понятия: «переключение» – назначение исполнителей с выполнения одной задачи на выполнение другой; «стоимость переключения» – разность значений эффективности выполнения конкретной задачи определенными исполнителями при условии, что эти же исполнители до этого выполняли другую задачу, «переход» – назначение исполнителей на выполнение новой последовательности задачи после завершения предыдущей последовательности; «стоимость перехода» – разность значений эффективности выполнения новой последовательности задачи после завершения предыдущей тем же составом исполнителей. Блок-схема алгоритма представлена на Рис. 3.9.

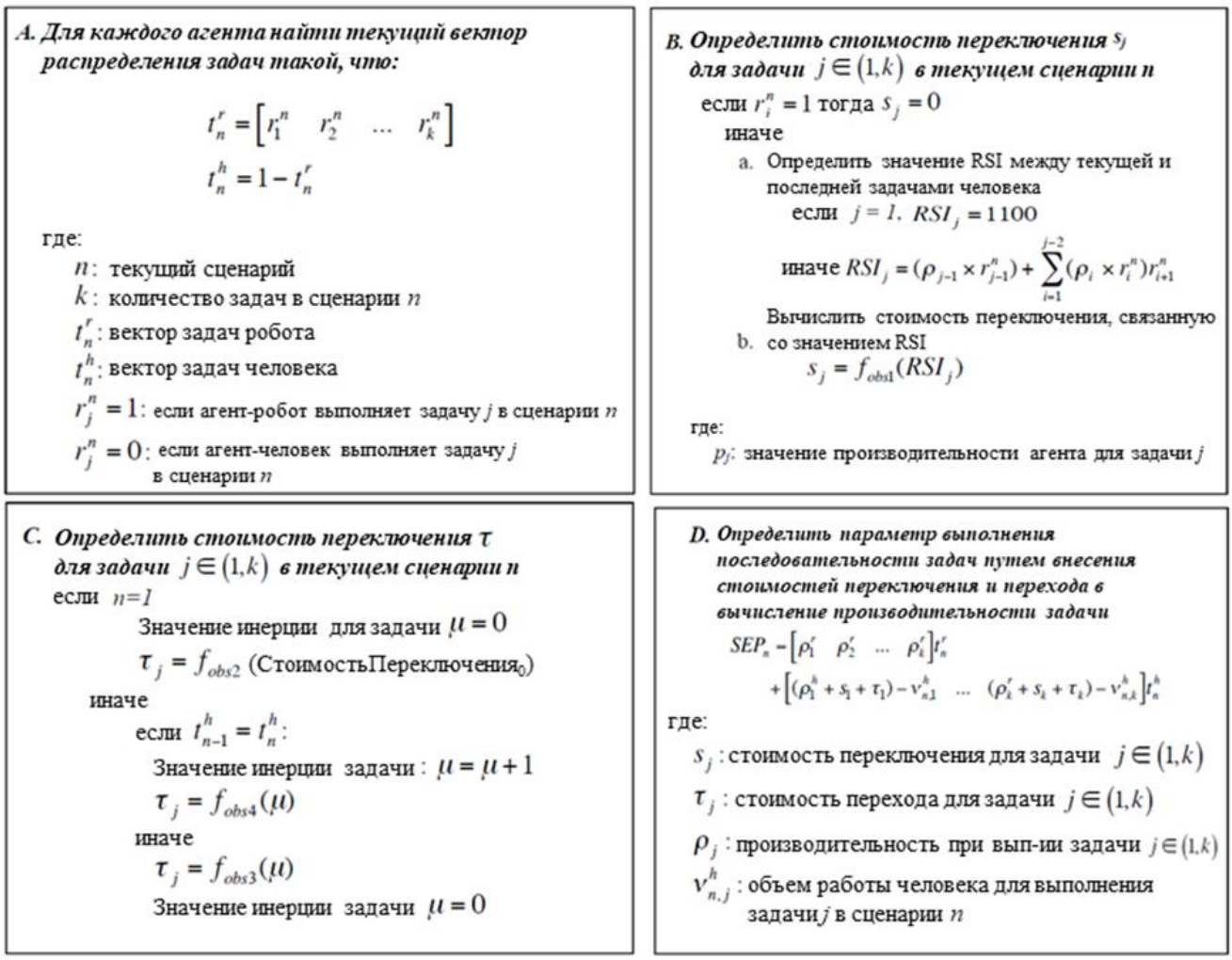


Рис. 3.9. Блок-схема алгоритма распределении задач в КРТС на основе ролевого метода и максимизации производительности [131] (перевод на русский язык)

Алгоритм включает следующие этапы: расчет вектора назначения текущей работы для каждого агента, определение стоимости переключения для текущего сценария, определение стоимости перехода для текущего сценария, вычисление значения параметра (стоимости) выполнения последовательности задач с учетом значений стоимости переключения и перехода.

В работе [132] для распределения задач среди участников КРТС предложено совместное использование методов DFA (Design for Assembly), многокритериальной оптимизации и линейного программирования. В работе осуществляется вычисление значения сложности для каждой задачи для людей и коботов, которые затем используется в многокритериальной модели оптимизации, распределяющей работы по исполнителям. Метод линейного программирования позволяет минимизировать значение функций затрат (стоимости), при этом значения весов определяются с использованием метода игры с нулевой взвешенной суммой. Основным недостатком предложенного комплекса методов является апробация исключительно на базе коллаборативной робототехнической ячейки (два человека и один робот).

В статье [133] представлены метод и алгоритм распределения работ в КРТС на основе многокритериальной глобальной оптимизации – GOER (Global Optimal Evaluation of Revenue). Метод и алгоритм основаны на модели максимизации значения выгоды, которая получается при назначении определенного агента на выполнение конкретной задачи, при этом заявляется решение проблемы «сваливания» алгоритма в локальный минимум (оптимум) и его высокая сходимость. Используются следующие критерии оптимизации: максимальное время ответа, количество коботов, назначаемых на выполнение работы, и максимальное значение выгоды. Сравнение с венгерским алгоритмом, алгоритмом аукциона и алгоритмом теории игр показал, что предложенный алгоритм GOER позволяет сократить количество задействуемых роботов для выполнения работ не менее чем на 17%. Блок-схема алгоритма представлена Рис. 3.10. Другим достоинством метода и алгоритма является возможность задания и назначения на выполнение одной работы произвольного количества роботов.

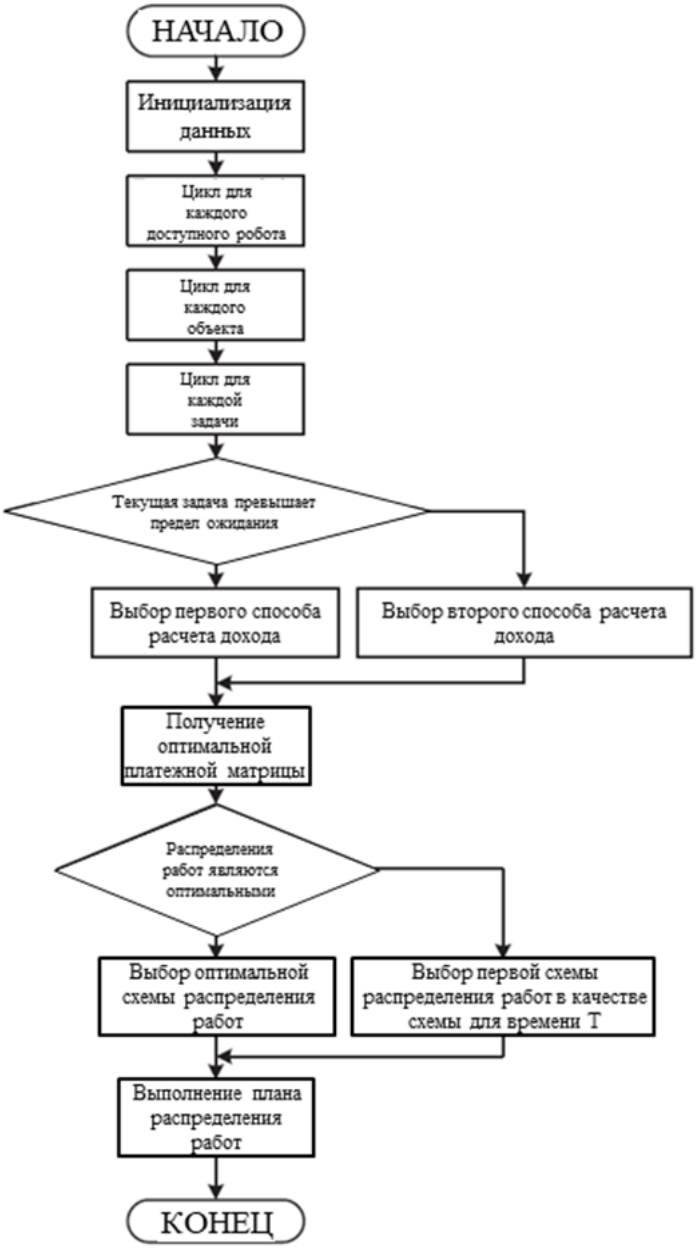


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритма GOER [133] (перевод на русский язык)

В качестве недостатка следует отметить слабую проработанность задачи назначения людей на работы и соответствующего математического аппарата, а также отсутствие в работе указаний на возможность назначения произвольного количества людей на выполнение одной работы.

В работе [134] представлен метод распределения задач в КРТС на основе двунаправленной модели доверия и формирования перечня доступных задач для агентов на основе их возможностей. Модель позволяет прогнозировать значение доверия (вероятности выполнения задачи агентом) для новых задач на основе опыта выполнения этими агентами аналогичных работ. Ожидаемое общее

вознаграждение рассчитывается для каждого участника КРТС, при этом задача распределяется тому агенту, который максимизирует ожидаемое общее вознаграждение. Результат выполнения задачи агентом используется для обновления значения доверия для этого агента. В качестве недостатков следует отметить то, что в модели при распределении задач в КРТС не учитываются возможности людей как агентов, а также отсутствие так называемого этапа торгов при выборе агента для выполнения задачи. Работа метода продемонстрирована на базе коллаборативной робототехнической ячейки. Кроме того, в работе не учитываются различия в эффективности выполнения задач разными агентами.

На основании представленного описания ряда исследований с предлагаемыми методами, алгоритмами и способами распределения работ в КРТС, возможно провести их сравнение с разработанным в рамках настоящего исследования методом и алгоритмом распределения работ в смешанной неоднородной команде КРТС (подраздел 2.2). Качественный сравнительный анализ представлен в Таблице 3.1.

Таблица 3.1. Качественный сравнительный анализ проанализированных в работах методов, способов и алгоритмов распределения работ в КРТС с методом и алгоритмом (подраздел 2.2), предложенными в рамках настоящего исследования

Основание (признак) сравнения	**Методы, способы и/или алгоритмы распределения работ в КРТС***											
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	Авторский метод и алгоритм
Произвольный объем работ	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	**+**
Глобальный планировщик распределения работ	+	+	+	–	+	+	+	–	+	+	+	**+**
Произвольное количество людей в КРТС	–	–	–	+	–	–	–	–	+	–	–	**+**
Произвольное количество роботов в КРТС	+	+	–	–	+	–	–	+	–	+	–	**+**

Продолжение Таблицы 3.1

Учет эффективности агентов для определенных работ	–	–	–	+	–	–	+	+	–	+	–	+
Обязательность коллаборации	–	–	+	–	–	–	+	–	–	+	–	+

Примечание:

* [1]-[11] – рассмотренные методы и алгоритмы в рамках сравнительного анализа [124]-[134] соответственно.

Разработанный метод и алгоритм распределения работ в КРТС с минимизацией затрат обладает преимуществом, связанным с обязательным обеспечением коллаборативности и учете эффективности выполнения каждого вида работ всеми участниками смешанной неоднородной команды.

3.3. Алгоритм распределения работ в КРТС с минимизацией их времени выполнения

Представленные в Главах 2 и 3 метод и алгоритм распределения работ с минимизацией затрат применимы для условий стационарности и неизменности рабочих мест, количества участников смешанной команды и отсутствия последовательности выполнения работ (технологического процесса), когда основной целью является минимизация именно не временных затрат на выполнение работ. Вместе с тем, чаще всего в рамках коллаборации людям и коботам требуется выполнять именно ряд последовательных задач, при этом приступить к выполнению следующей работы (или работ) невозможно до завершения предыдущей (или предыдущих). Таким образом, любой технологический процесс, требующий коллаборации людей и роботов, возможно представить в виде сетевой модели, т.е. ориентированного графа (орграфа), где ребра представляют собой длительности работ (операций), а вершины – события

завершения предыдущей работы (операции) или одновременно нескольких предыдущих работ (операций), при этом первая вершина является моментом начала технологического процесса, а последняя – моментом его завершения.

Направление исследований по оптимизации времени выполнения технологических процессов в виде орграфа с ограниченным количеством акторов широко известно в виде NP-трудной задачи построения оптимального расписания выполнения работ проекта (в англоязычной литературе – Resource-Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP) и является достаточно изученным. В частности, в работе [135] представлен обобщенный подход к решению этого класса задач с учетом различных типов компетенций (опыта) участников, оптимального распределения работ по исполнителям, назначения минимального количества исполнителей при ограниченном бюджете и сама модель построения оптимального расписания, в основе которой –метод линейного программирования. Общее решение задачи нахождения минимального времени выполнения общего объема работ с использованием методов оптимизации, линейного программирования и критического пути обозначено следующим образом [135] представим следующим образом:

$$\begin{cases} T_h \to \min \\ T_g - T_k - Rc_{k,g} = t_{k,g} \text{ для каждой } j \text{ операции}, j = \overline{1,m}, \\ T_1 = 0, \\ \forall T_s \geq 0, \\ \forall Rc_{k,g} \geq 0, \end{cases} \quad (28)$$

где:

T_h – ранний срок завершения последней операции под номером h;

T_k, T_g – время начала и завершения j-ой операции соответственно;

k, g – номера событий начала и завершения j-ой операции соответственно;

$Rc_{k,g}$ – максимальное время, на которое можно увеличить продолжительность выполнения операции, начало и завершение которой обозначено событиями k и g соответственно;

$t_{k,g}$ – время выполнения операции, начало и завершение которой обозначено событиями k и g соответственно;

T_1 – время наступления события начала выполнения работы;

T_s – время, которое необходимо для выполнения всех операций, предшествующих событию s.

Существуют также другие подходы и способы решения подобного класса задач. Например, в работе [136] решение подобной задачи на базе метода деревьев классификации рассматривается именно для КРТС с учетом операций, которые могут выполняться только человеком, только коботом или в рамках их коллаборации, а также длительности и других характеристик отдельных операций. В статье [137] аналогичный класс задач решается с использованием марковского процесса принятия решений.

Однако, несмотря на наличие множества решений для задач класса RCPSP, в том числе вышеуказанных методов и подходов, в них не учитывается то, что на выполнение конкретной работы (операции) может быть назначено различное количество участников смешанной команды (с учетом минимально и максимально возможного количества назначаемых на операцию исполнителей). Число назначенных исполнителей непосредственно влияет на время выполнения операции (работы), при этом наличие максимально возможного количества назначаемых участников обусловлено тем, что назначение большего состава исполнителей на практике уже не будет способствовать уменьшению времени выполнения данной операции. Следует отметить, что количество участников, доступных для назначения в момент начала операции может быть меньше максимально возможного для данной операции. Кроме того, при минимизации времени выполнения каждой операции требуется осуществлять перерасчет количества доступных участников КРТС, которых можно назначить на выполнение последующих операций. Отдельного рассмотрения требует случай распараллеливания задач по времени, когда после окончания одной операции начинается сразу несколько других. Последующие операции могут продолжаться в виде серий операций. Таким образом, требуется рассмотреть решение задачи оптимизации расписания работ и распределения исполнителей по работам для вышеуказанных случаев, предполагающих распараллеливание операций,

различные варианты по назначению состава их исполнителей, а также максимальные и минимальные ограничения по составу исполнителей, назначаемых на выполнение отдельной работы (операции).

Для этого по аналогии с п.п. 2.2 Главы 2 представим смешанную неоднородную команду в виде множества людей $H = \{h_i\}_{i=1}^{n}$ и коллаборативных роботов $B = \{b_j\}_{j=1}^{m}$, где n – количество людей в команде, m – количество коботов.

Каждый кобот и человек в команде имеют следующие характеристики:

- уникальный порядковый номер (нумерация осуществляется отдельно для людей и коботов, начиная с единицы);
- номер операции, на которую он назначен и которую выполняет (если значение равно нулю, значит участник команды не назначен ни на одну операцию и считается свободным, т.е. доступным для назначения);
- показатель эффективности ($r_{h_i} \in (0..1]$ – для i-го человека и $r_{b_j} \in (0..1]$ – для j-го кобота, где единичное значение соответствует максимальной эффективности).

Предположим, что технологический процесс является последовательностью выполняемых атомарных операций, т.е. таких операций, которые невозможно декомпозировать на более простые операции. Каждая операция имеет следующие характеристики:

- уникальный порядковый номер, представляющий собой положительное натуральное число (j для j-ой операции);
- минимально необходимое количество людей для выполнения j-ой операции – $n_{j_{min}}$;
- максимально необходимое количество людей для выполнения j-ой операции – $n_{j_{max}}$;
- минимально необходимое количество коботов для выполнения j-ой операции – $m_{j_{min}}$;
- максимально необходимое количество коботов для выполнения j-ой операции – $m_{j_{max}}$;

- количество людей, назначаемых на выполнение j-ой операции, – n_j;
- количество коботов, назначаемых на выполнение j-ой операции, – m_j;
- стандартное время выполнения j-ой операции $t_{op.st_j}$ (время выполнения операции минимальным составом людей и коботов, при условии, что каждый человек и кобот обладают единичной (максимальной) эффективностью);
- реальное время выполнения j-ой операции $t_{op.real_j}$ (время выполнения операции n_j количеством людей и m_j количеством коботов с соответствующими значениями их эффективности).

Представим технологический процесс в виде взвешенного орграфа $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ – множество вершин, соответствующих событиям завершения предыдущих операций, v_1 – исток графа, соответствует времени начала технологического процесса, v_k – сток графа, соответствует времени окончания технологического процесса. Веса ребер графа соответствуют продолжительности проведения операции в секундах. Пример подобного орграфа представлен на Рис. 3.11.

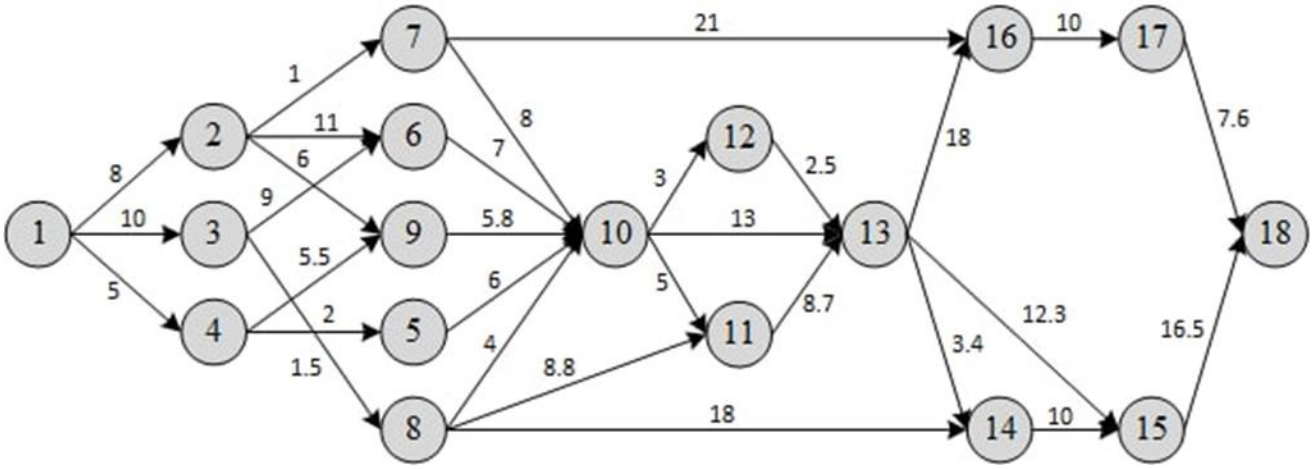


Рис. 3.11. Технологический процесс в виде взвешенного ориентированного графа

На выполнение каждой операции назначаются люди и коботы из числа свободных, т.е. не выполняющих никакие другие операции. Человек или кобот могут быть назначены только на выполнение одной операции, т.е. выполнять не

более одной операции одновременно. После завершения каждой операции люди и коботы, назначенные на ее выполнения, освобождаются, т.е. становятся доступными для назначения на выполнение других операций. В момент события начала каждой новой операции требуется назначить определенный состав коботов и людей, который должен быть не меньше минимально возможного, но не больше максимально допустимого количества людей и коботов для данной операции. Введем следующее допущение: на выполнение операции назначаются люди и коботы с наибольшим значением эффективности среди доступных (свободных).

Пусть $n_{j_{av}}$ – количество людей, доступных к моменту начала j-ой операции, $m_{j_{av}}$ – количество коботов, доступных к моменту начала j-ой операции, $H^{n_{j_{av}}}$ и $B^{m_{j_{av}}}$ – множества соответственно людей и коботов, доступных (не занятых выполнением какой-либо операции) в момент начала j-ой операции. Тогда в общем случае при назначении исполнителей на j-ю операцию возможны четыре сценария:

– количество свободных людей и (или) коботов больше максимально возможного значения для данной операции ($n_{j_{av}} > n_{j_{max}}$ или $m_{j_{av}} > m_{j_{max}}$ или $\begin{cases} n_{j_{av}} > n_{j_{max}} \\ m_{j_{av}} > m_{j_{max}} \end{cases}$) – тогда на операцию возможно назначить любой состав людей и (или) коботов – от минимально возможного до максимально возможного включительно ($n_j \in [n_{j_{min}}; n_{j_{max}}]$ или $m_j \in [m_{j_{min}}; m_{j_{max}}]$ или $\begin{cases} n_j \in [n_{j_{min}}; n_{j_{max}}] \\ m_j \in [m_{j_{min}}; m_{j_{max}}] \end{cases}$);

– количество свободных людей и (или) коботов меньше максимально возможного, но больше минимально возможного значения для данной операции ($n_{j_{min}} < n_{j_{av}} < n_{j_{max}}$ или $m_{j_{min}} < m_{j_{av}} < m_{j_{max}}$ или $\begin{cases} n_{j_{min}} < n_{j_{av}} < n_{j_{max}} \\ m_{j_{min}} < m_{j_{av}} < m_{j_{max}} \end{cases}$) – тогда на операцию возможно назначить состав людей и (или) коботов от минимально возможного (в том числе с наибольшими значениями эффективности) до всего состава доступных людей и (или) коботов ($n_j \in [n_{j_{min}}; n_{j_{av}}]$ или $m_j \in [m_{j_{min}}; m_{j_{av}}]$ или $\begin{cases} n_j \in [n_{j_{min}}; n_{j_{av}}] \\ m_j \in [m_{j_{min}}; m_{j_{av}}] \end{cases}$);

– если количество свободных людей и (или) коботов равно минимально возможному для операции ($n_{j_{av}} = n_{j_{max}}$ или $m_{j_{av}} = m_{j_{max}}$ или $\begin{cases} n_{j_{av}} = n_{j_{max}} \\ m_{j_{av}} = m_{j_{max}} \end{cases}$), то они в полном составе назначаются на выполнение операции ($n_j = n_{j_{av}}$ или $m_j = m_{j_{av}}$ или $\begin{cases} n_j = n_{j_{av}} \\ m_j = m_{j_{av}} \end{cases}$);

– если количество свободных людей и (или) коботов меньше минимально доступного, то назначение на операцию не производится до тех пор, пока количество свободных людей и (или) коботов не увеличится хотя бы до значения минимально возможного для назначения на выполнение j-ой операции.

В первых трех сценариях при назначении коботов и людей на выполнение операции время ее выполнения может измениться (в том числе в случае, если хотя бы у одного из назначаемых участников эффективность меньше максимально возможно (единичной). Так как стандартное время выполнения операции рассчитывается при минимальном составе участников с единичной эффективностью, то время выполнения $t_{op.real_j}$ для j-ой операции с отличным составом исполнителей (n_j людей и m_j коботов) будет рассчитываться следующим образом:

$$t_{op.real_j} = \frac{(n_{j_{min}} + m_{j_{min}}) \times t_{op.st_j}}{\sum_{k=1}^{n_j} r_{h_k} + \sum_{s=1}^{m_j} r_{b_s}}. \quad (29)$$

После нахождения данного значения его необходимо присвоить весу ребра, соответствующему длительности данной операции.

Возможны случаи, когда после завершения некоторой операции начинаются и продолжаются несколько других независимых операций или последовательностей операций. В свою очередь, их завершение может быть условием для начала некоторой другой операции или других операций и последовательностей операций. Каждый случай начала нескольких операций (или последовательностей операций) на графе будет представлен в виде «ветвления» – наличия нескольких ребер, исходящих из вершины, соответствующей моменту

завершения предыдущей операции. В связи с этим для каждого такого «ветвления» требуется определить состав назначаемых людей и коботов для всех одновременно начинающихся операций (последовательностей операций) способом, указанным выше.

Отдельно следует рассмотреть решение задачи назначения исполнителей в случае, когда количество свободных людей и (или) коботов меньше минимально необходимого значения для начинающейся операции (начинающихся операций) в момент ее (их) начала. Для этого требуется перенести назначение исполнителей для данной операции (данных операций) на ближайший по времени момент завершения какой-либо из выполняемых операций (когда может измениться состав свободных коботов и (или) людей). Сложность задачи заключается в определении ближайшего по времени момента начала операции, которая может не являться следующей по порядку или момент которой не будет являться ближайшей вершиной (например, в случае наличия параллельных операций или их последовательностей). Для решения обозначенной проблемы введем функцию, преобразующую орграф, веса ребер которого представляют собой время выполнения операций, во временную последовательность. Суть функции заключается в нахождении всех путей на графе от первой до каждой другой вершины, суммированию весов всех ребер для каждого из найденных путей и выбору пути до каждой вершины, соответствующего максимальному значению суммы весов ребер (для каждой другой вершины). Найденное максимальное значение суммы весов ребер от первой до любой другой вершины будет соответствовать временному событию начала операции (или операций), которое представлено этой вершиной графа. Временные значения, соответствующие началу операции (операций), сопоставляются с соответствующими вершинами графа в виде вектора временных значений и номеров вершин на графе (вид <Time, Node>). Работа данной функции представлена в виде псевдокода алгоритма в Приложении А.

Следует отметить, что в результате назначения исполнителей время выполнения операции (операций) может изменяться, что приведет к изменению

соответствующих весов ребер орграфа. В связи с этим требуется также обновлять временную последовательность выполнения операций после каждого назначения на операцию, в том числе при наличии нескольких одновременно начинающихся операций.

Кроме того, при невозможности назначения хотя бы минимального состава исполнителей на операцию ее необходимо запоминать для последующего назначения исполнителей при изменении состава свободных людей и коботов. Для хранения сведений операций, назначение на которых исполнителей было отложено, введем массив *delayed*, представляющий собой множества из пар номеров вершин на графе, соответствующих началу и завершению каждой из отложенных операций. Таким образом, если состав свободных коботов и (или) людей меньше минимально необходимого в момент начала операции, назначение исполнителей прекращается, а пара номеров вершин на графе, соответствующих началу и завершению данной операции, добавляется в массив *delayed*.

Сформулируем обобщенный алгоритм назначения исполнителей на выполнение операции в рамках технологического процесса следующим образом. Вначале из орграфа формируется временная последовательность. Начиная с первого по времени события начала операции (операций) проверяется наличие отложенных операций в массиве *delayed* и осуществляется попытка назначения на них исполнителей. Для каждой из отложенных операций проверяется наличие минимально требуемого состава свободных коботов и (или) людей, в случае отсутствия процесс назначения прекращается. В случае наличия требуемого количества свободных исполнителей осуществляется назначение исполнителей для каждой отложенной операции из массива *delayed*, после чего соответствующая пара вершин удаляется из массива отложенных операций. После назначения на каждую отложенную операцию производится модификация орграфа технологического процесса и временной последовательности в соответствии с расчетным временем выполнения данной операции назначенным составом исполнителей (с учетом значений их эффективности). Псевдокод алгоритма

назначения состава исполнителей на выполнение отложенной операции представлен в Приложении Б.

Аналогичным образом осуществляется назначение исполнителей на операцию (операции), начало которой (которых) соответствует текущему событию на временной последовательности. Если массив *delayed* пуст, то осуществляется попытка назначения исполнителей на операцию (операции), начало которой (которых) соответствует текущему временному событию. В случае успеха осуществляется модификация орграфа технологического процесса и временной последовательности, затем выбирается ближайшее к текущему временное событие, соответствующее началу операции (операций). В противном случае пара вершин орграфа, соответствующая событиям, начала и завершения операции, добавляется в массив отложенных операций, а назначение исполнителей на нее прекращается. Псевдокод алгоритма назначения состава исполнителей на выполнение одной или нескольких последующих операций представлен в Приложении В.

Вышеуказанные действия повторяются до достижения последнего события на временной последовательности, что соответствует вершине-стоку орграфа и окончанию технологического процесса (псевдокод алгоритма представлен в Приложении Г). В качестве времени выполнения технологического процесса, которое требуется минимизировать, будем использовать значение, соответствующее максимальной сумме весов ребер среди всех путей из истока в сток орграфа технологического процесса.

3.4. Сравнительный анализ алгоритмов распределения работ с минимизацией их времени выполнения

В работе [138] представлен метод и алгоритм, основанные на предшествовании (precedence) узлов в сетевой модели и многоагентном подходе для распределения работ технологического процесса в КРТС. Коботы и люди в

системе полагаются равноправными агентами. Предложена архитектура системы распределения задач и встраивания запланированных последовательностей действий агентов в единое расписание работ. Обратная связь агентов с системой планирования и распределения задач реализована путем наблюдения за действиями агентов и состоянием окружающего пространства/среды и выявления факта выполнения какой-либо задачи (подзадачи), либо занятности какого-либо агента. В качестве достоинства следует отметить возможность задания произвольного количества людей и коботов. Основными недостатками являются: отсутствие глобального планировщика, неэффективная схема обратной связи, а также дополнительные вычислительные и временные затраты при осуществлении наблюдения за действиями других участников КРТС. Блок-схема алгоритма распределения и выполнения задач в КРТС на основе метода предшествования представлена на Рис. 3.12.

Назначение и выполнение задач в КРТС на основе графов предшествования

1: I_1.push(преемник (n_i)), $I_2 \leftarrow \emptyset$ ▷ **Инициализация**
2: **пока** $I_1 \neq \{n_f\} \vee I_2 \neq \emptyset$ **выполнять**
3: **пока** $I_1 \neq \{n_f\}$ **выполнять** ▷ **Фаза выполнения**
4: $\bar{o} \leftarrow I_1$.pop()
5: **если** ¬ оценить$(\mathcal{S}(\bar{o}))$ **тогда**
6: **если** оценить$(\mathcal{R}(\bar{o}))$ **тогда**
7: вып-ть $(\bar{o})$
8: I_1.push(преемник $(\bar{o})$)
9: **иначе**
10: $I_2 \leftarrow I_2 \cup \{\bar{o}\}$
11: **иначе**
12: I_1.push(преемник $(\bar{o})$)
13: **для** $\bar{o} \in I_2$ **выполнять** ▷ **Фаза наблюдения**
14: $c \leftarrow$ FALSE
15: **для** $\bar{o}' \in \{\bar{o}\} \cup$ follow_up$(\bar{o})$ **выполнять**
16: **если** оценить$(\mathcal{S}(\bar{o}'))$ **тогда**
17: I_1.push(преемник $(\bar{o})$)
18: $c \leftarrow$ TRUE
19: **конец цикла**
20: $I_2 \leftarrow I_2 \setminus \{\bar{o}\}$ **Для стека:*
21: **если** $c \neq$ TRUE **тогда** **push – добавление элемента;*
22: I_1.push$(\bar{o})$ **pop – удаление элемента.*

Рис. 3.12. Блок-схема алгоритма распределения и выполнения задач в КРТС на основе метода предшествования [138] (перевод на русский язык)

В статье [139] представлен подход и алгоритм распределения задач в КРТС с возможностью их распараллеливания и в условиях наличия ограничений на количество одновременно используемых ресурсов. Подход и алгоритм основаны на минимизации функции затрат и дискретно-событийной модели, представляющей последовательность выполнения работ, в том числе общую и для каждого отдельного участника КРТС по-отдельности. Основными критериями минимизации являются общее время выполнения технологического процесса (временные затраты) и стоимость выполнения работ (финансовые затраты). Учитывается накопление усталости человека при длительном выполнении работ и снижение его эффективности. В качестве достоинств следует отметить высокую скорость сходимости алгоритма. Основными недостатками являются: одинаковая эффективность всех агентов, а также возможное отсутствие коллаборации людей и роботов при выполнении операций. Кроме того, из работы неясно, возможно ли назначать произвольное количество людей/коботов на выполнение одной операции, также не представлена в явном виде зависимость длительности операции от количества назначенных на ее выполнение агентов. Концепция распределения работ и построения общего расписания выполнения технологического процесса согласно [139] представлена на Рис. 3.13.

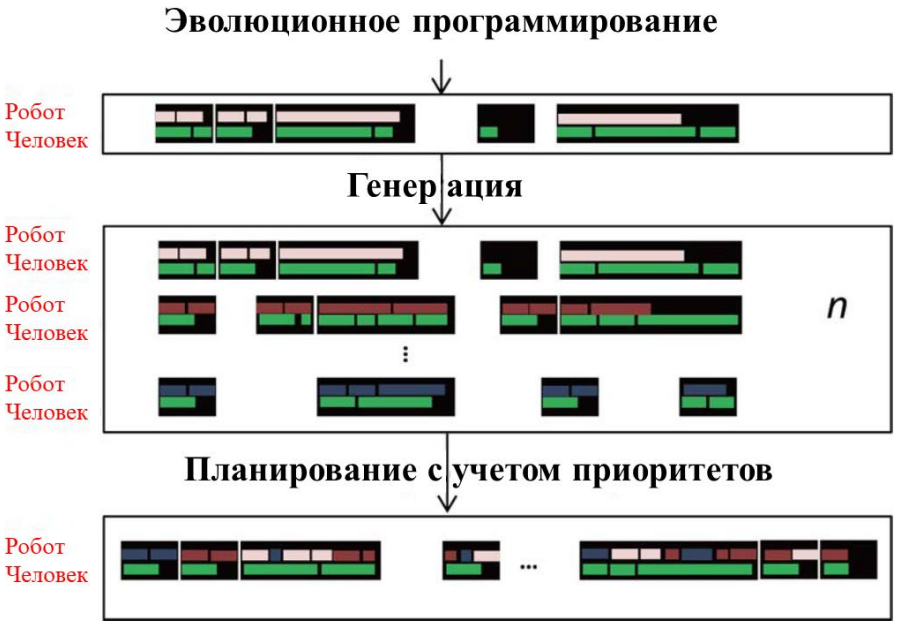


Рис. 3.13. Концепция распределения работ и построения общего расписания выполнения технологического процесса [139] (перевод на русский язык)

В статье [140] предложен алгоритм назначения операций технологического процесса для выполнения участниками КРТС на основе смешано-целочисленного линейного программирования для минимизации общего времени выполнения. Учитываются различия в значениях эффективности, предпочтения в выполнении определенных видов работ, снижение эффективности работы человека во времени. Реализован режим контроля выполнения работы коботами со стороны людей, а также возможность задания произвольного количества задач, людей и коботов в КРТС и рабочих мест. Учитываются состояния занятости агентов и рабочих мест, их общая нагрузка участников КРТС и время выполнения каждой операций. В рамках алгоритма возможно переназначение задач в режиме реального времени. В качестве недостатков следует отметить то, что на одну задачу можно назначить максимально одного человека и одного кобота, при этом возможна полная потеря коллаборации из-за независимого выполнения отдельных задач людьми и коботами. Кроме того, моделирование и апробация алгоритма проведены только на базе одной коллаборативной робототехнической ячейки, состоящей из двух коботов манипуляторного типа и одного человека.

В статье [141] представлен подход к распределению в КРТС в режиме реального времени однородных задач в зависимости от состояния человека и эффективности функционирования коботов. Суть подхода заключается в представлении работ в качестве модульных независимых функциональных блоков, а состояний агентов – с помощью соответствующих функций состояний. Подход учитывает возможность выхода из строя различных агентов системы и перераспределения задач в подобных сценариях другим участникам КРТС. Также учитывается модульность архитектуры КРТС. В рамках подхода предполагается, что все работы являются независимыми, и последовательность выполнения операций (работ) не формируется. В качестве существенного недостатка следует отметить то, в КРТС коботы и люди рассматриваются единообразно. Подход не учитывает зависимости операций, при этом сетевая модель технологического процесса не формируется. Кроме того, недостаточно проработано описание состояния человека, его возможных ошибок и изменения эффективности при

выполнении задач, не учитывается сценарии наступления полной недееспособности человека в КРТС/выхода из строя кобота. Схема предложенного подхода представлена на Рис. 3.14.

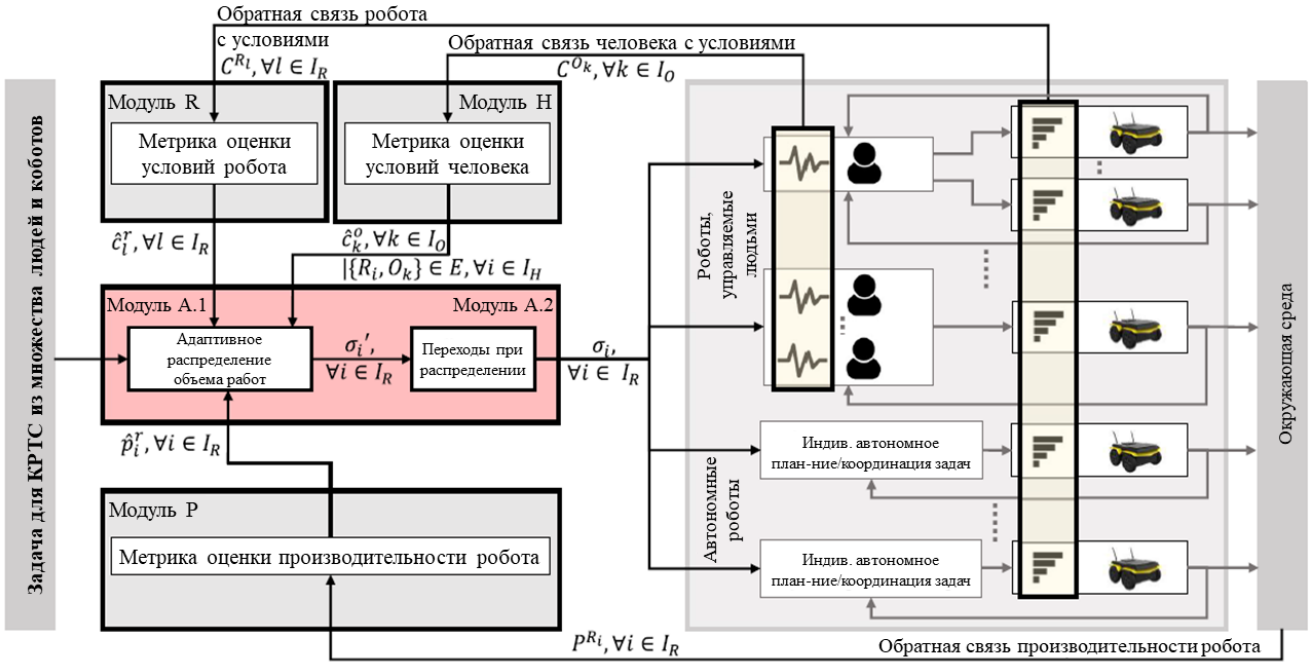


Рис. 3.14. Схема подхода к распределению однородных задач в КРТС [141] (перевод на русский язык)

В работе [142] предложен метод планирования и распределения задач в КРТС на основе деревьев поведения. Использование деревьев поведения позволяет задавать работу в качестве набора взаимосвязанных операций с временными и логическими ограничениями. Распределение работ среди агентов и назначение ролей в КРТС сводится к решению нескольких оптимизационных задач с использованием смешанного целочисленного линейного программирования, функций затрат свободных агентов и их действий. В частности, из пользовательского интерфейса определяются возможные действия агентов, их параметры и другие исходные данные. На основании полученных характеристик строится дерево поведения. На основе дерева поведения агент распределения ролей динамически назначает работы исполнителям из состава участников КРТС. Управляющие сигналы (распоряжения) на выполнение работ доводятся посредством управляющего агента. В качестве недостатка следует отметить отсутствие оценки эффективности предложенного метода на основе эксперимента

в КРТС с несколькими людьми и роботами. Кроме того, на выполнение одной работы (операции) возможно назначение только одного агента, таким образом в КРТС отсутствует коллаборации. Схема описанного метода представлена на Рис. 3.15.

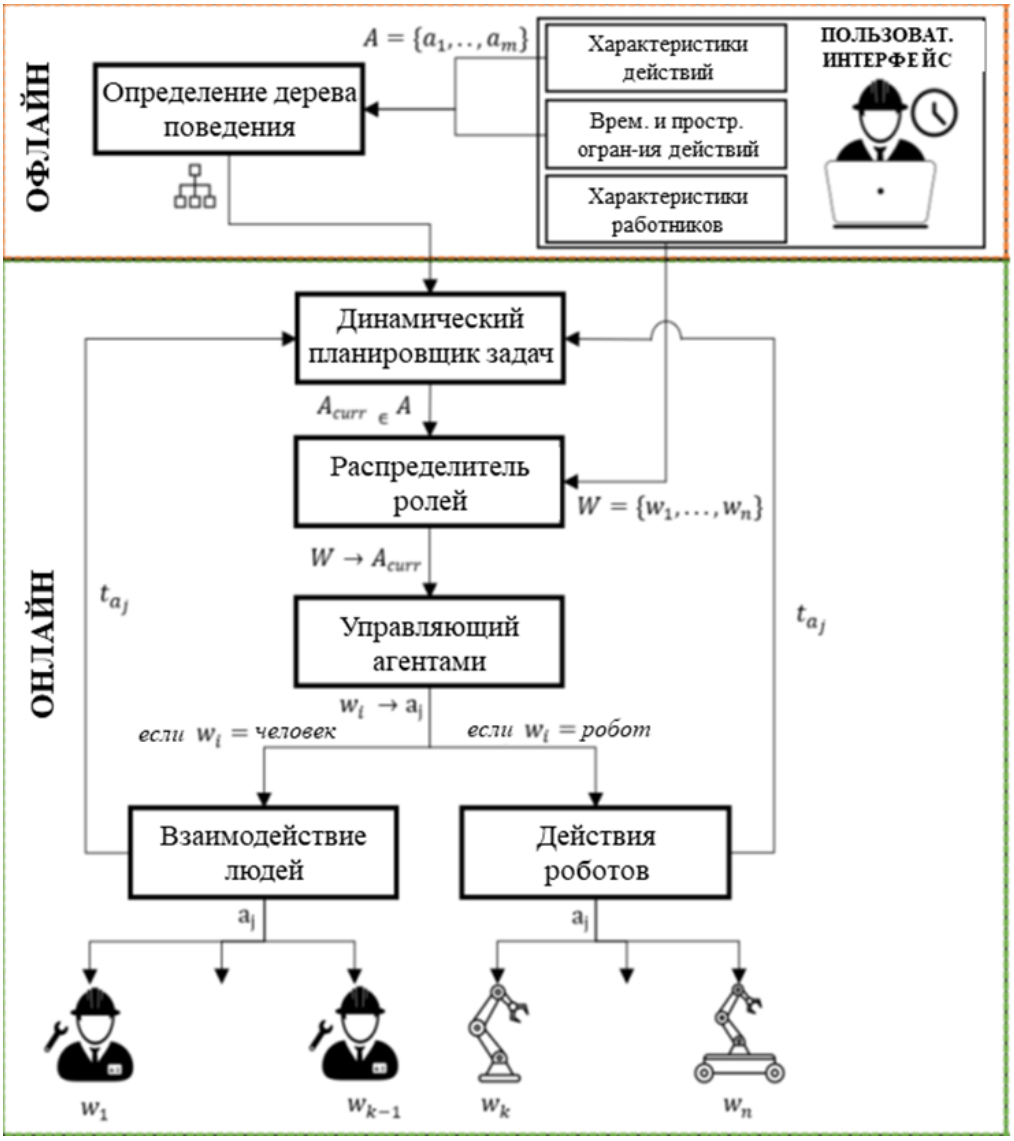


Рис. 3.15. Схема метода планирования и распределения задач в КРТС на основе деревьев поведения [142] (перевод на русский язык)

В работе [143] представлен алгоритм комплексного планирования и распределения работ в КРТС для разборки деталей, который учитывает наличие ограничений ресурсов и требований к безопасности коллаборации агентов. Целью работы алгоритма является минимизация общего времени разборки детали. Алгоритм учитывает время на выбор агентами различных рабочих инструментов и их доступность, очередность выполнения операций и необходимость

предотвращения возможных столкновений между человеком и коботом. Алгоритм основан на вычислении функции затрат при выборе действий агентами, при этом минимизация времени выполнения последовательности действий и назначение исполнителей сводится к решению оптимизационной задачи. Последовательность действий представлена в виде сетевой модели (графа) с ограничениями на необходимость завершения выполнения предыдущих задач до начала выполнения новых. В качестве выходных данных формируется диаграмма Ганта оптимизированной последовательности разборки детали с отдельными множествами операций, выполняемых человеком, коботом и в рамках их коллаборации (Рис. 3.16). Для проверки адекватности предложенного алгоритма проведены как численные, так и экспериментальные исследования. В качестве основного недостатка предложенного алгоритма следует отметить то, что состав КРТС жестко ограничен одним человеком и одним коботом. Кроме того, в результате распределения задач возможно полное отсутствие коллаборации, когда человек и кобот выполняют независимые последовательности операций в едином рабочем пространстве.

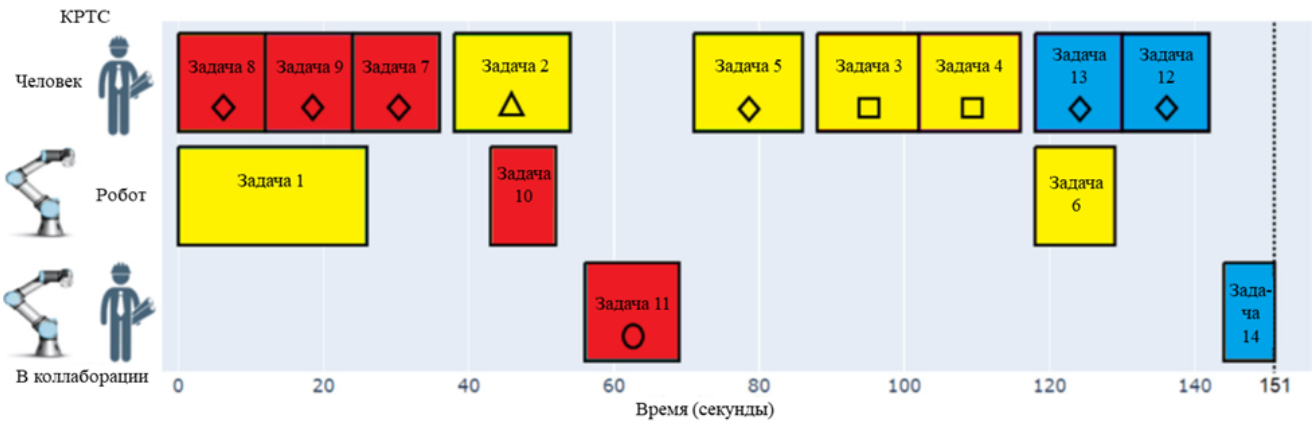


Рис. 3.16. Сформированная диаграмма Ганта для последовательности выполнения операций [143] (перевод на русский язык)

В статье [144] предложен подход и алгоритм планирования и распределения работ в КРТС на основе централизованного агента планирования и распределения, позволяющего распределять и перераспределять работы агентам в процессе выполнения задач. Архитектура планирования и распределения задач в соответствии с предложенным подходом представлена на Рис. 3.17.

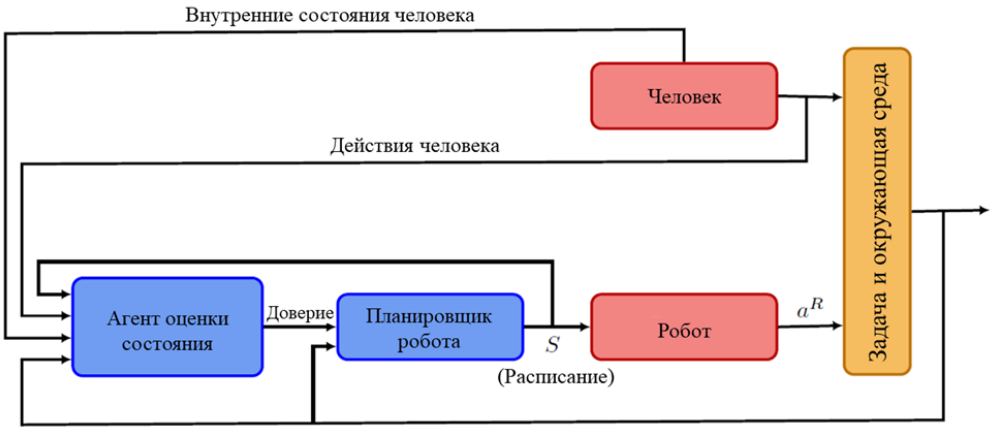


Рис. 3.17. Архитектура планирования и распределения задач в соответствии с предложенным подходом [144] (перевод на русский язык)

Разработанный алгоритм основан на теории доверия в многоагентных системах (Рис. 3.18) и позволяет людям назначать задачи коботам, а также учитывает эффективность выполнения задач различными агентами КРТС, векторы состояния агентов и их действия. В качестве недостатка следует отметить то, что коботы в КРТС, по сути, не являются самостоятельными агентами, так как предпочтительным является назначение задач человеком коботу, а сценарии получения задач от управляющего центра или назначения коботом задач человеку не предусмотрены. Кроме того, предложенные подход и алгоритм предназначены исключительно для систем с централизованным управлением.

Выбор и планирование задач

Вх. данные: задача с ограничением на предшествование τ
$P_f \leftarrow$ Изначальное доверие о предпочтении человека быть ведомым
$P_e \leftarrow$ Изначальное доверие о производительности человека
Пока задачи не выполнены **выполнять**
  Наблюдать за действиями человека
  Выявлять неверные действия человека
  Обновить задачу τ
  Обновить P_f и P_e
  Если *нужно новое расписание* **тогда**
    пока *расписание,* $S^\star$ *не найдено* **выполнять**
      $X^\star \leftarrow$ `ВыборЗадачи` $(\tau,\ P_f,\ P_e)$
      $\tau_{new} \leftarrow$ `СоздатьВременнуюЗадачу` $(\tau,\ X^\star)$
      $S^\star \leftarrow$ `РасписаниеЗадач` $(\tau_{new},\ X^\star)$
  $a^R \leftarrow$ `ПолучитьНаборДействий` $(S^\star)$
  `ПрименитьДействия` (a^R)

Рис. 3.18. Алгоритм централизованного планирования и распределения работ в КРТС на основе [144] (перевод на русский язык)

В работе [145] представлен подход к планированию и динамическому распределению задач для гетерогенных многоагентных робототехнических систем с участием людей. Подход позволяет устанавливать различные приоритеты для задач и изменять их порядок (очередь) в многоагентной системе. Подход основан на решении оптимизационной задачи и учитывает зависимости операций в рамках сетевой модели технологического процесса (временные ограничения) и пространственные ограничения при перемещении агентов. Архитектура управления КРТС предполагает наличие агента декомпозиции задач, агента-планировщика, агента назначения работ и одного оператора (Рис. 3.19).

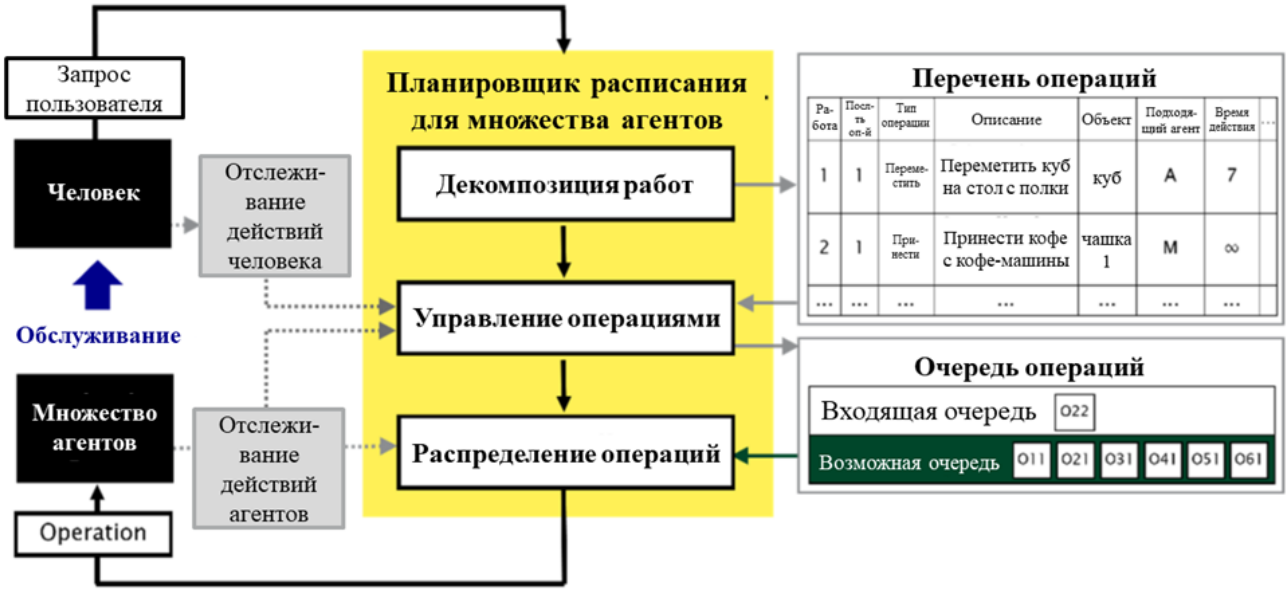


Рис. 3.19. Архитектура управления КРТС в рамках предложенного подхода [145] (перевод на русский язык)

В качестве недостатков следует отметить то, что люди в подобных смешанных командах способны ставить задачи роботам и контролировать их, но не могут принимать непосредственное участие в выполнении операций. Анализ приложенного подхода позволяет сделать вывод о том, что коллаборация людей и коботов в целом отсутствует, т.е. система не является коллаборативной. Кроме того, экспериментальная апробация подхода осуществлялась в виртуальной среде и на базе робототехнической системы, состоящей из нескольких роботов манипуляторного типа и одного мобильного робота.

В работе [146] представлен подход к распределению задач в КРТС на основе трехуровневой иерархической модели взаимодействия человека и робота «производственная линия – задачи – операции», а также модели распределения работ с учетом эффективности коллаборации. Коллаборация человека и робота представлена в виде трех этапов технологического процесса: предварительная, основная и финишная механическая обработка деталей. Разработана функция распределения операций на основе эффективности сотрудничества путем нормализации времени, затрат, эффективности, точности и сложности взаимодействия человека и робота. Для решения задачи выбора стратегии коллаборации в работе использовались алгоритм имитации отжига и метод грануляции (гранулированных вычислений). В качестве достоинства предложенного подхода следует отметить многоагентный подход при рассмотрении КРТС, а также использование методов глобальной оптимизации для сокращения времени выполнения отдельных операций и всего технологического процесса. Основными недостатками являются: распределение задач только для этапа предварительной механической обработки (деталей), апробация на базе коллаборативной робототехнической ячейки из одного человека и одного робота, а также возможное отсутствие коллаборации для некоторых операций (распределение задач отдельно человеку, коботу и всей ячейке).

В работе [147] представлен двухуровневый подход и алгоритм распределения работ в КРТС в производственных задачах (сборка деталей). Подход основан на декомпозиции технологического процесса на несколько подзадач и моделях взаимного доверия агентов в реальном времени. Синтезированные модели доверия человека к роботу и робота к человеку предполагают наличие обратной связи для перераспределения подзадач между агентами в случае, если уровни доверия принимают значение ниже заданных пороговых. Перераспределение подзадач таким образом способствует восстановлению доверия и повышению производительности КРТС. Результаты проведенного эксперимента показали, что модели двустороннего доверия (человек роботу и робот человеку) показывают большую эффективность с точки зрения эффективности коллаборации, чем модели

с односторонним доверием (робот человеку) или без учета доверия. Недостатком предложенного подхода оптимального распределения работ для задач сборки деталей на основе модели доверия с обратной связью является изначальная линейность модели. Кроме того, в работе рассматриваются исключительно коллаборативные робототехнические ячейки. На Рис. 3.20 представлен алгоритм распределения задачи в КРТС на основе модели доверии.

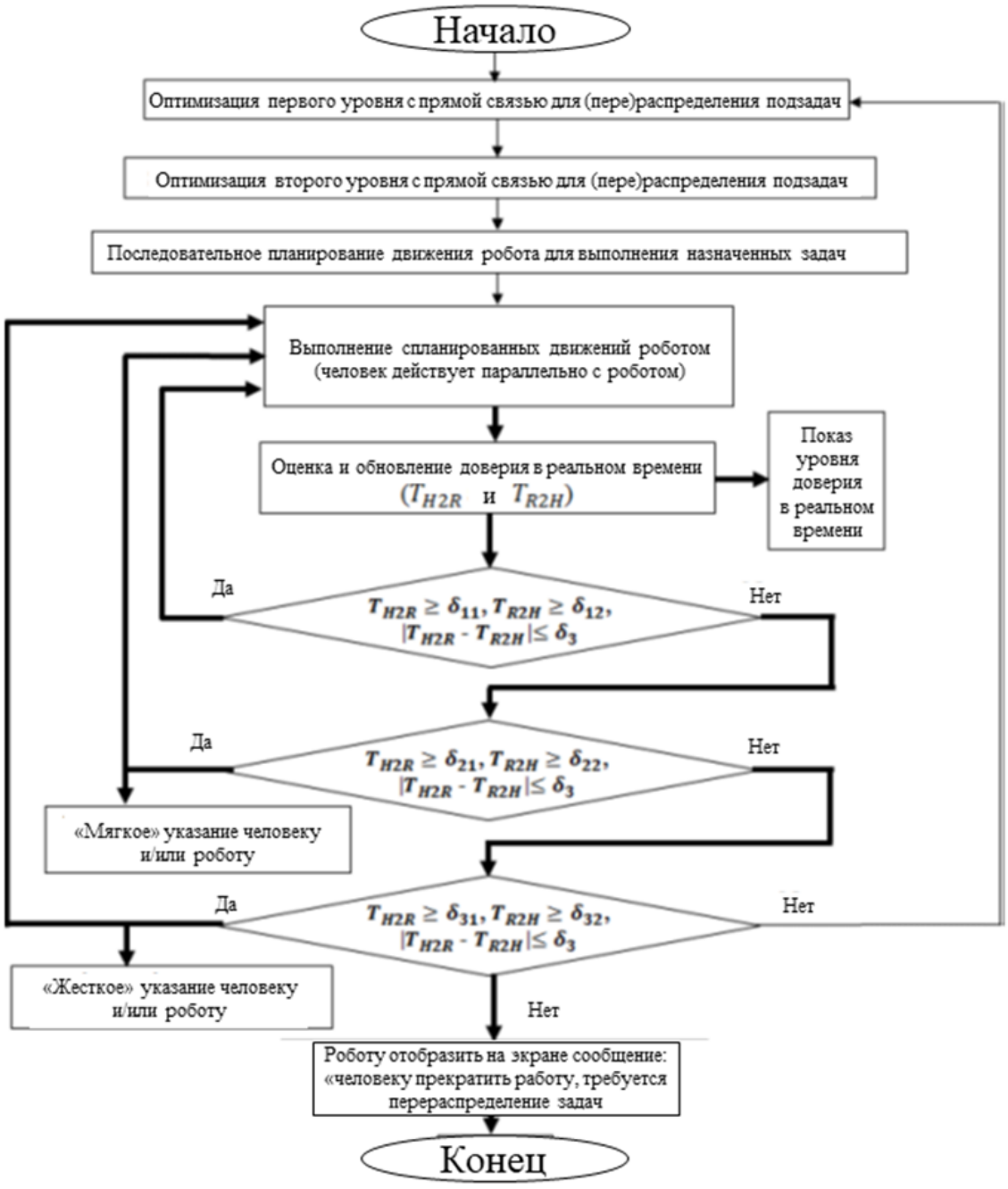


Рис. 3.20. Алгоритм распределения задачи в КРТС на основе модели доверии [147] (перевод на русский язык)

В статье [148] представлен подход к распределению задач в КРТС и формированию расписания работ агентов в рамках временной модели технологического процесса на основе методов и алгоритмов смешанного целочисленного линейного программирования и программирования в ограничениях (constraint programming). Общая задача распределения работ сводится к решению задачи на основе теории расписания с гибким графиком. Алгоритм на базе программирования в ограничениях позволяет задавать до 100 агентов в КРТС с 1000 подзадачами (в среднем 10 подзадач на агента). Учитывается время перемещения агентов, в том числе между рабочими местами, а также маршрутизация агентов при их перемещении для сокращения времени движения и предотвращения их возможных столкновений (т.е. учитываются пространственные и временные ограничения при перемещении каждого агента). Достоинством предложенного подхода является высокая скорость сходимости разработанных на его основе алгоритмов. В качестве недостатков возможно отметить отсутствие учета перемещения агентов в трехмерном пространстве (возможно перемещение только по прямой), при этом скорость перемещения участников КРТС всегда постоянна. Кроме того, использование предложенного подхода однозначно предполагает отсутствие коллаборации между роботами из-за задаваемых ограничений (одна работа – один исполнитель).

В работе [149] предложен подход к динамическому распределению работ для участников КРТС на основе модели задач (работ). Данная модель формируется роботом на основе текущего состояния выполнения своих задач и других агентов (в том числе людей), при этом используются данные с систем технического зрения и других сенсоров. Предложен алгоритм выбора действий на основе значений доверия и орграфа состояния выполнения задач, анализа данных от систем технического зрения и обновления модели внешней среды. В качестве достоинства предложенного подхода следует отметить декомпозицию технологического процесса на отдельные операции, использование сетевой модели для представления последовательности действий, а также наличие интеллектуальности агентов за счет подстройки роботов под действия людей и выбора их действий на

основе модели внешней среды и действий других участников КРТС. Недостатками являются возможное отсутствие коллаборации (построение непересекающихся последовательностей действий для человека и робота). Апробация предложенного в работе подхода осуществлялась исключительно на примере коллаборативной робототехнической ячейки, масштабирование на более сложные КРТС, возможно, потребует доработки метода. Кроме того, из работы не ясен механизм перепланирования и перераспределения задач при обновлении глобальной модели внешней среды. Схема планирования и выполнения последовательности действий участниками КРТС с использованием предложенного подхода представлена на Рис. 3.21.

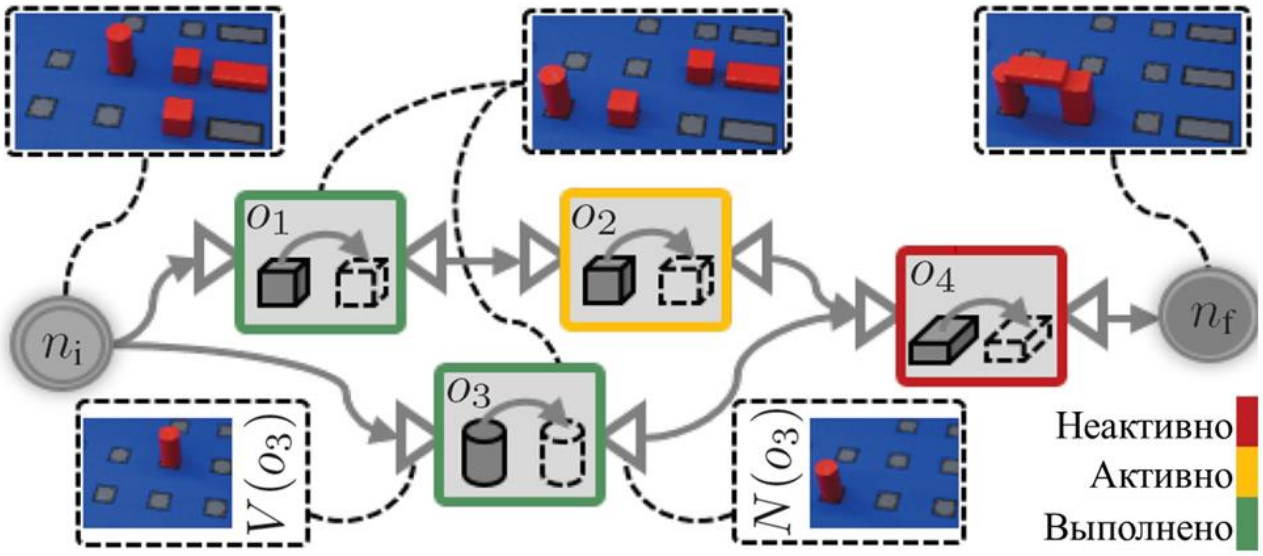


Рис. 3.21. Схема планирования и выполнения действий участниками КРТС [149] (перевод на русский язык)

На основании представленного описания некоторых исследований, посвященных методам, алгоритмам и способам распределения последовательности работ (операций) в КРТС возможно провести их сравнение с разработанным в рамках настоящего исследования авторским алгоритмом (подраздел 3.3). Качественный сравнительный анализ представлен в Таблице 3.2.

Таблица 3.2. Качественный сравнительный анализ предложенных в работах методов, способов и алгоритмов распределения задач технологического процесса в КРТС с авторским алгоритмом (подраздел 3.3), предложенным в рамках настоящего исследования

Основание (признак) сравнения	**Методы, способы и/или алгоритмы распределения работ в КРТС***												
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	Авторский алгоритм
Произвольное количество задач в тех. Процессе	+	+	+	–	+	–	+	+	+	+	+	+	**+**
Произвольное количество людей в КРТС	–	–	+	–	–	–	+	–	+	–	+	–	**+**
Произвольное количество роботов в КРТС	+	+	+	+	–	–	+	–	–	+	+	+	**+**
Произвольное количество рабочих мест	+	+	+	–	–	+	–	–	+	–	+	–	**+**
Возможность перепланировки расписания для КРТС	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+	–	**+**
Учет времени выполнения операций (задач) от количества и эффективности назначенных исполнителей	–	–	+	–	–	–	–	–	+	–	–	–	**+**
Учет эффективности агентов для конкретных задач	–	–	+	+/– **	+	+	+	+	+	–	+	+	**+**
Учет взаимозависимости задач в технологическом процессе	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	**+**
Учет временных и пространственных ограничений для агентов КРТС	–	–	+	–	+	+	–	–	+	–	+/– ***	–	**+**
Возможность задания изменения эффективности агентов во времени	–	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**+**

Продолжение Таблицы 3.2

Учет состояний занятости агентов при распределении задач	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+
Обязательность коллаборации	–	–	–	–	–	+	+	–	–	+	–	–	+

Примечания:

* [1]-[12] – рассмотренные методы и алгоритмы в рамках сравнительного анализа [138]-[149] соответственно.

** Только для коботов.

*** Пространственные ограничения не реализованы для трехмерного пространства.

3.5. Выводы по Главе 3

Разработанный алгоритм распределения работ с минимизацией затрат применим для смешанной неоднородной команды, состоящей из людей и коботов (т.е. гетерогенных групп из участников различных типов), с учетом специфики разнородности членов команды, а также обязательных требований безопасного взаимодействия участников, присущих КРТС. Рассмотрены частные случаи задачи, в том числе при различных функциях затрат разнородных участников, в случае ограниченной активности членов команды, при наличии зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ участников другого типа, а также в случае наличия произвольного количества видов работ, назначаемых участникам смешанной неоднородной команды. Алгоритм учитывает субоптимальный состав команд при распределении общего объема работ с учетом значений эффективности участников КРТС.

Разработанный алгоритм распределения работ, представленных в виде сетевой модели и временной последовательности операций, обеспечивает минимизацию как общего времени выполнения технологического процесса, так и отдельных его операций. Он позволяет представить условия, зависимости и время

выполнения операций технологического процесса в виде ориентированного взвешенного графа, вершины которого являются временными событиями, начала одной или нескольких операций и окончания предыдущей (предыдущих), а веса ребер – временем выполнения соответствующих операций. Алгоритм предполагает преобразование орграфа во временную последовательность выполнения операций, его суть заключается в назначении исполнителей на операцию (операции), начало которой (которых) соответствует текущему временному событию, при этом осуществляется подбор количества коботов и людей от минимально до максимально возможного в текущий момент времени на основании количества свободных исполнителей и значений их эффективности. После назначения осуществляется перерасчет времени выполнения операции в соответствии со значениями эффективности назначенного состава исполнителей, осуществляется модификация веса соответствующего ребра орграфа и переформирование временной последовательности после текущего временного события. В случае невыполнения данных условий (отсутствия требуемого количества незанятых людей и (или) коботов) назначение на данную операцию откладывается до наступления ближайшего временного события. Алгоритм осуществляет переход от текущего временного события к ближайшему по времени и одновременный обход графа, начиная с первой и заканчивая последней вершинами, что соответствует началу и концу технологического процесса, при этом вначале выполняются действия по назначению исполнителей на выполнение отложенных операций, затем коботы и люди назначаются на операции, начало которых соответствует текущему временному событию.

Результаты Главы 3 опубликованы в работах [94, 106, 108, 113, 150].

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В Главе 4 приведены результаты численных и натурного экспериментов, проведенных в рамках апробации разработанных метода и алгоритмов распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы.

Численный эксперимент для апробации алгоритма распределения работ среди участников КРТС с минимизацией затрат и применением модифицированной функции затрат Кобба-Дугласа проведен по пяти сценариям, включающих различные значения количества работ и эффективности участников системы.

В рамках численного эксперимента для апробации алгоритма распределения работ в КРТС с минимизацией их времени выполнения проведено моделирование назначения исполнителей из числа участников смешанной команды КРТС на выполнение отдельных операций и оценка времени выполнения всего технологического процесса после использования предложенного алгоритма по сравнению с изначальными временными значениями. Для эксперимента были использованы на основе простого технологического процесса, неодинаковое количество людей и коботов с отличающимися значениями эффективности. Технологический процесс, представленный в виде ориентированного взвешенного графа, включал в себя взаимосвязанную последовательность недекомпозируемых (атомарных) операций, выполнение которых предполагало обязательную коллаборацию людей и коботов.

Натурный эксперимент проведен на основе разработанных метода и алгоритма распределения работ среди людей и коботов с минимизацией затрат на основе роботизированной ячейки. Целью коллаборативного взаимодействия участников системы являлось изготовление металлических изделий.

4.1. Распределение работ в КРТС с минимизацией затрат

В среде MATLAB проведено моделирование оптимального распределения работ между участниками КРТС для решения системы уравнений, представленной в (3). Для целей моделирования использованы следующие ограничения и допущения:

1. В команде присутствует $n \geq 1$ людей и $m \geq 1$ коботов.

2. Количество типов работ для людей и коботов в команде является одинаковым и равно $q > 1$. Любой кобот и человек в команде способен выполнять все q видов работ, но с разной эффективностью, задаваемой матрицами эффективности $R_h = (r_{h_{ki}})_{q \times n}$, и $R_b = (r_{b_{kj}})_{q \times m}$ для людей и коботов соответственно.

3. Как было указано в Главе 2, в качестве функций затрат людей были использованы обобщенные производственные функции Кобба-Дугласа, суммируемые по всем q видам работ. Так, для i-го человека, выполняющего q видов работ с различными значениями эффективности $r_{h_i}^k \geq 0, k \in [1, q]$, данная функция имеет вид: $c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^{q} \left(\frac{(x_{h_i}^k)^2}{2 r_{h_i}^k} \right), i \in [1, n]$.

4. В свою очередь, функция затрат для j-го кобота полагаются линейными: $c_j \left(x_{b_j}, r_{b_j} \right) = \sum_{k=1}^{q} \left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k} \right), j \in [1, m], r_{b_j}^k \geq 0$.

5. Любой участник команды способен выполнять любой из доступных ему q видов работ, если его эффективность для этого вида работ не равна нулю.

6. Общее количество затрат людей и роботов соответственно для k-го вида работ равно общему объему для этого вида работ: V^k: $\sum_{i=1}^{n} {x^k}_{h_i} + \sum_{j=1}^{m} {x^k}_{b_j} = = V_k; k \in [1, q]$.

Общие объемы для любых видов работ одинаковы, но значения объемов работ для людей ${V_h}^k = \sum_{i=1}^{n} {x^k}_{h_i}$ и коботов ${V_c}^k = \sum_{j=1}^{m} {x^k}_{b_j}$ могут различаться.

Общий объем для всех q видов работ представляет собой матрицу $V = (V_{kd})_{q \times l}$, где l – количество типов участников ($l = 2$ для команды из коботов и людей). Объемы работ для людей и коботов имеют одинаковую размерность q: $V_h = (V_k)_q$; $V_b = (V_k)_q$.

В рамках моделирования было принято к рассмотрению пять сценариев, расположенных в порядке усложнения исходных данных и начальных условий:

1. Одинаковые фиксированные объемы для всех q видов работ для людей и коботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и коботов одинаковое, значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

2. Одинаковые фиксированные объемы для всех q видов работ для людей и коботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и коботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

3. Неодинаковые фиксированные объемы для всех q видов работ для людей и коботов, любой участник команды может выполнять любое количество работ, количество людей и коботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

4. Одинаковые фиксированные объемы для всех q видов работ для людей и коботов, любой участник команды может выполнять только одну работу, количество людей и коботов одинаковое, значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

5. Неодинаковые фиксированные объемы для всех q видов работ для людей и коботов, любой участник команды может выполнять только одну работу, количество людей и коботов неодинаковое, значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом, но значения эффективности для коботов – выше, чем у людей; значения матрицы эффективности для людей и коботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

Вычисление значений, назначенных участникам команды объёмов работ $x^k{}_{h_i}$ и $x^k{}_{b_j}$ осуществлялось в среде моделирования MATLAB с использованием функции *fmincon*. Исходные данные по характеристикам команды и распределяемым объемам работ представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные по характеристикам команд и распределяемым объемам работ

Сценарий	**Значение переменных**					
	n	m	q	V	r_h	r_b
№ 1	3	3	3	200 200 200	0,08 0,24 0,12 0,05 0,90 0,95 0,90 0,37 0,11	0,18 0,24 0,42 0,49 0,49 0,34 0,78 0,39 0,24
№ 2	4	2	3	200 200 200	0,30 0,74 0,19 0,69 0,63 0,78 0,08 0,93 0,46 0,45 0,31 0,51	0,18 0,37 0,78 0,49 0,51 0,82
№ 3	4	2	3	110 200 90	0,58 0,23 0,46 0,97 0,62 0,68 0,40 0,37 0,80 0,10 0,26 0,34	0,52 0,23 0,04 0,89 0,14 0,72
№ 4	3	3	3	200 200 200	0,56 0 0 0 0,70 0 0 0 0,82	0,93 0 0 0 0,58 0 0 0 0,88
№ 5	2	4	3	100 190 90	1 0 0 0,87 0 0	0 0,65 0 0 0 0 0,84 0 0,97 0 0 0,81

Результаты эксперимента после распределения объемов работ участникам неоднородной смешанной команды КРТС представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты моделирования распределения объема работ в смешанной неоднородной команде

Сценарий	**Значение переменных**	
	x_h	x_b
№ 1	0,01 0,14 0,04 0,01 1,66 1,82 1,04 0,17 0,02	0 0 199,81 196,52 0 0 198,77 0 0
№ 2	0,24 1,50 0,10 1,28 0,5 0,78 0,01 1,11 0,23 0,24 0,11 0,32	0 196,88 197,59 0 0 199,09
№ 3	0,64 0,11 0,40 1,78 0,44 0,52 0,18 1,15 0,88 0,01 0,10 0,16	107,07 0 0 198,71 0 88,86

Продолжение Таблицы 4.2

№ 4	0,34 0 0 0 0,83 0 0 0 0,76	199,66 0 0 0 199,17 0 0 0 199,24
№ 5	0,49 0 0 0,29 0 0	0 99,51 0 0 0 0 189,71 0 90 0 0 0

Во всех сценариях коботам назначался больший объем работ, чем людям. Это связано с отличиями в типах функциях затрат двух типов участников – у коботов она принята линейной.

В сценариях 1–3 в результате минимизации функции основной объем работы назначался одному коботу с максимальной эффективностью среди этого типа участников для данного вида работ. Кроме того, среди людей в команде также была заметна неравномерность распределения назначаемых объемов работ, сильно зависящая от различий в значениях эффективности по конкретному виду работ.

Результаты моделирования по сценариям 4–5, где любой участник команды может выполнять только одну работу (т.е. остальные значения в матрицах эффективности для людей и коботов являются нулевыми), схожи с вычисленными значениями назначаемых объемов работ в сценариях 1–3: основной объем работ выполнял кобот, если его эффективность для данной работы была больше нуля. Несмотря на это, некоторый объем работ людям все же назначался, если значение их эффективности было ненулевое. Особо следует отметить результаты моделирования по третьему виду работ сценария 5, где ненулевыми значениями эффективности среди всех участников обладали только два кобота. В результате кобот с наивысшим значением эффективности получил весь объем данного вида работы, хотя этот объем мог быть распределен между двумя роботами.

4.2. Распределение работ в КРТС в рамках технологического процесса для минимизации времени его выполнения

В среде MATLAB было проведено моделирование назначения исполнителей из числа участников смешанной команды КРТС на выполнение отдельных операций простого технологического процесса и оценка времени общего выполнения с использованием предложенного алгоритма по сравнению с изначальными временными значениями. Для целей моделирования были введены следующие ограничения и допущения:

1. В смешанной неоднородной команде КРТС присутствует $n = 25$ людей и $m = 20$ коботов. Эффективность для всех людей из состава команды $H = \{h_i\}_{i=1}^{n}$ одинакова и равна 0,5 ($\forall h_i \in H: r_{h_i} = 0{,}5, i \in [1, n]$), эффективность для всех коботов из множества $B = \{b_j\}_{j=1}^{m}$ принята равной единице $\forall b_j \in B: r_{b_j} = 1, j \in [1, m]$.

2. В рамках технологического процесса участникам смешанной команды требуется выполнить 11 операций, которые являются атомарными, т.е. недекомпозируемыми. Каждая операция предполагает обязательную коллаборацию людей и коботов для ее выполнения. Исходные значения параметров операций представлены в Таблице 4.3, обозначения переменных взяты из Главы 3 (минимально и максимально возможное количество людей (n_{min} и n_{max}) и коботов (m_{min} и m_{max}) для выполнения конкретной операции, а также стандартное время ее выполнения $t_{op.st}$ минимально возможным составом участников смешанной команды КРТС, каждый участник которой обладает максимальной (единичной) эффективностью).

Таблица 4.3. Исходные значения параметров операций технологического процесса

№ операции	n_{min}	n_{max}	m_{min}	m_{max}	$t_{op.st}$
1	1	10	1	10	14
2	1	10	1	10	18
3	1	10	1	10	18
4	1	10	1	10	26

Продолжение Таблицы 4.3

5	1	10	1	10	20
6	1	10	1	10	28
7	1	10	1	10	8
8	1	10	1	10	10
9	1	10	1	10	10
10	1	10	1	10	18
11	1	10	1	10	16

Технологический процесс в виде орграфа представлен на Рис. 4.1, время наступления событий начала операции (операций), представленных вершинами графа, начиная с первой вершины в нулевой момент времени (начало технологического процесса) – в Таблице 4.4.

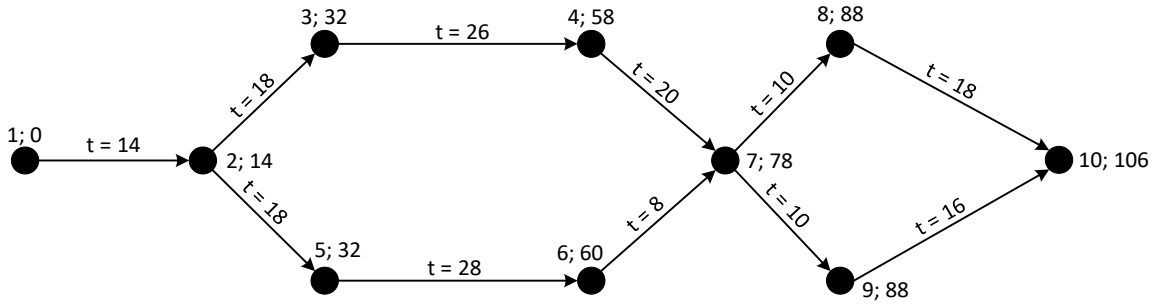


Рис. 4.1. Технологический процесс в виде взвешенного ориентированного графа

Таблица 4.4. Время наступления событий начала операции (операций) на орграфе технологического процесса

Номер вершины графа	**Время наступления соответствующего события (сек.)**
1	0
2	14
3	32
4	58
5	32
6	60
7	78
8	88
9	88
10	106

В результате выполнения алгоритма на каждую операцию удалось назначить состав людей и коботов значительно больше минимально необходимого, что позволило сократить время их выполнения. Количество назначенных на операции

людей и коботов (n_j и m_j), а также значения времени их выполнения данным составом ($t_{op.real}$) представлены в Таблице 4.5 (обозначения переменных взяты из Главы 3).

Таблица 4.5. Значения параметров операций технологического процесса после выполнения разработанного алгоритма

№ операции	n_j	m_j	$t_{op.real}$
1	7	4	3,7
2	7	8	3,1
3	3	3	8
4	4	4	8,7
5	2	4	8
6	5	6	6,6
7	9	2	2,5
8	10	8	1,5
9	4	7	2,2
10	4	3	7,2
11	7	2	5,8

В Таблице 4.6 представлено время наступления событий начала операции (операций) на орграфе технологического процесса после использования предложенного алгоритма, модифицированный технологический процесс в виде графа представлен на Рис. 4.2.

Таблица 4.6. Время наступления событий начала операции (операций) на графе технологического процесса после использования предложенного алгоритма

Номер вершины графа	**Время наступления соответствующего события (сек.)**
1	0
2	3,7
3	6,9
4	15,5
5	11,7
6	18,3
7	23,5
8	25,1
9	25,8
10	32,3

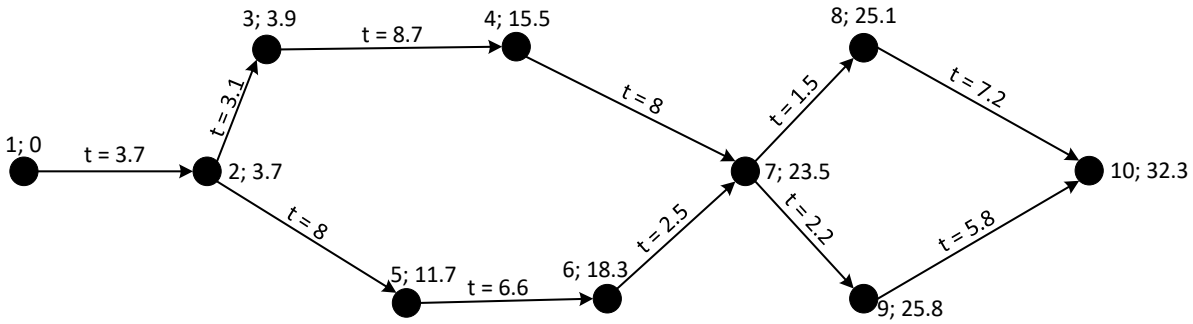


Рис. 4.2. Модифицированный технологический процесс в виде орграфа

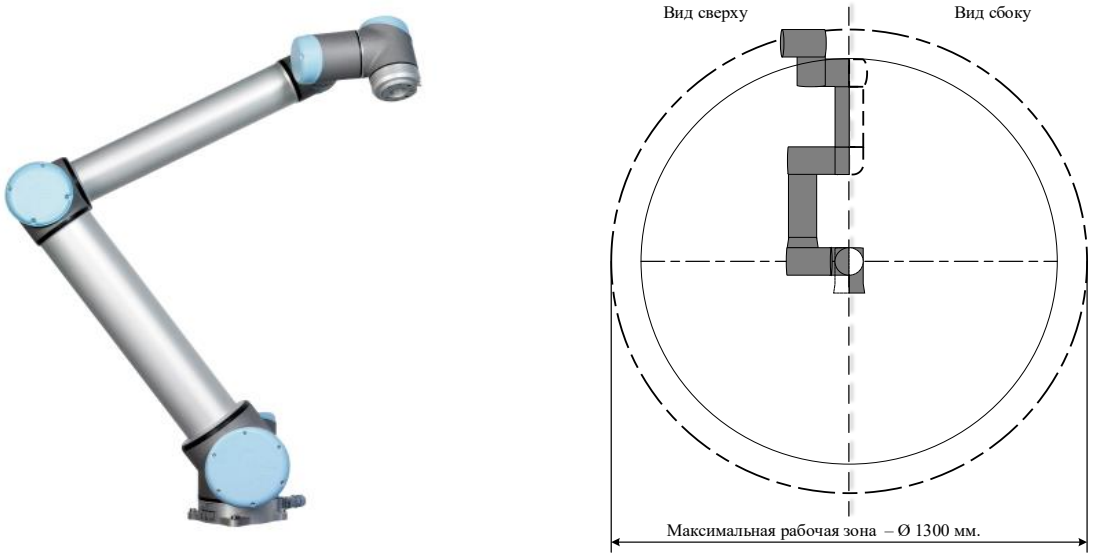
Из Таблицы 4.4 и Таблицы 4.6 видно, что общее время технологического процесса удалось сократить более чем в три раза. Данные, представленные в Таблице 4.5, позволяют сделать вывод о том, что минимальное количество назначаемых на операцию людей и коботов составило по два человека и кобота, максимальное количество – десять людей и восемь коботов. В среднем на операцию назначалось десять участников, минимальное и максимальное количество исполнителей для операции составило шесть и 18 участников смешанной команды КРТС соответственно.

4.3. Натурный эксперимент

В рамках исследовательской работы проведен натурный эксперимент на базе металлообрабатывающего предприятия по изготовлению металлочерепицы. В эксперименте был рассмотрен процесс изготовления металлического изделия в рамках рабочего пространства роботизированной ячейки, где зона трудовой деятельности людей была оснащена необходимым оборудованием, приспособлениями, инструментами и материалами для выполнения предусмотренных технологией работ и операций.

4.3.1. Исходные данные и описание рабочего места

Натурный эксперимент проводился на базе рабочего пространства с использованием коллаборативного манипулятора UR10 с шестью степенями свободы (Рис. 4.3). В системе управления робота ведется учет внешних возмущающих воздействий, оказываемых на робот-манипулятор в процессе работы. В связи с этим кобота можно эксплуатировать без защитных ограждений, рядом с рабочими местами операторов.



а) Внешний вид кобота

б) Проекция кобота (вид сверху и сбоку)

Рис. 4.3. Коллаборативный робот манипуляторного типа (UR10)

Технические характеристики коллаборативного манипулятора представлены в Таблице 4.7 [151].

Таблица 4.7. Технические характеристики кобот манипуляторного типа UR10

№ п/п	Наименование	Значение
1	Модель	UR10
2	Масса	28,9 кг
3	Полезная нагрузка	10 кг
4	Зона досягаемости	1300 мм
5	Диапазон углов движения сочленений	+/- 360° для всех соединений

Продолжение Таблицы 4.7

6	Максимальная угловая скорость движения	120/180 °/сек
7	Стабильность позиционирования	+/- 0,1 мм
8	Диаметр у основания	∅190 мм
9	Степень свободы	6
10	Размер блока управления (Ш*В*Г)	475 мм*423 мм*268 мм
11	Порты ввода-вывода	10/10 цифровых вводов/выводов, 4/2 аналоговых входов/выходов
12	Электропитание	24 В
13	Система коммуникации	Гнезда TCP/IP-Ethernet Modbus TCP
14	Средства программирования	Полископический графический интерфейс пользователя на 12-дюьмовым сенсорном экране с креплением
15	Уровень шума	Низкий
16	Классификация по IP	IP4
17	Потребляемая мощность	350 Вт
18	Материалы	Алюминий, нержавеющая сталь, пластик АБС
19	Температура	от 0 до 50°C
20	Электропитание	200–240В переменного тока, 50–60 Гц

В рамках рабочего процесса для приема/передачи заготовки на гибочный станок использовалось вакуумное устройство захвата коллаборативного робота. В качестве генератора вакуума использована вихревая камера. На Рис. 4.4 представлена принципиальная схема вакуумного захватного устройства с пневматическим вихреобразователем и замкнутой вихревой камерой.

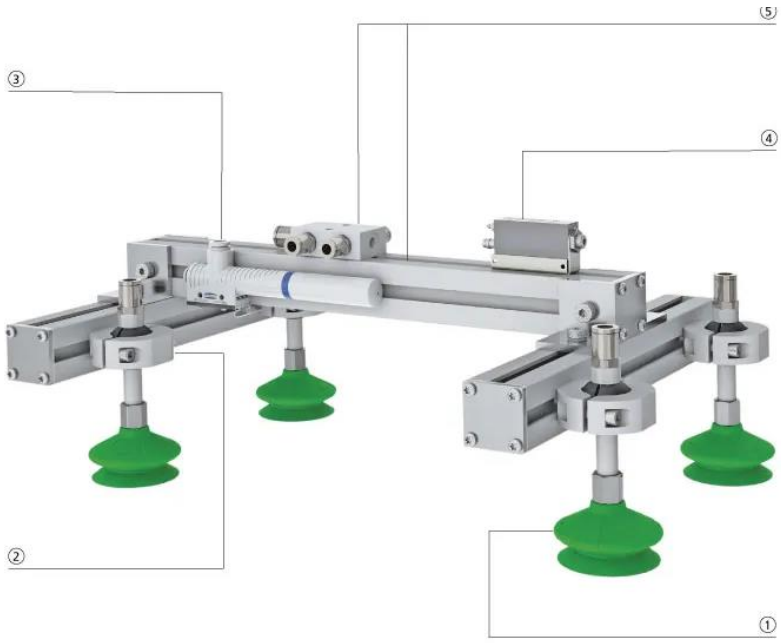


Рис. 4.4. Принципиальная схема вакуумного захвата

Применение таких захватов в процессах перемещения объектов обеспечивает автоматическое паллетирование, депалетизацию, комплектацию заказов и сортировку изделий.

Рабочее пространство оснащено листогибочным станком (прессом), содержащем электрический сервопривод для пресса, который деформирует обрабатываемую деталь (Рис. 4.5).



Рис. 4.5. Электрический комбинированный гибочный станок

4.3.2. Описание и результаты натурного эксперимента

Рабочий процесс заключался в подаче и контроле листовой заготовки и ее закреплении на рабочем столе прижимным устройством человека, а также передача для последующего изгиба заготовки коботом с помощью поворотной балки станка. На базе роботизированной ячейки, в состав которой входили два мастера, коллаборативный робот, гибочный станок, были проведены настроечные работы и апробация разработанного алгоритма с минимизацией затрат. На Рис. 4.6

представлены процесс настройки и задействования коллаборативного робота в рамках рассматриваемой робототехнической ячейки.



а) Настройка коллаборативного робота



б) Проведение натурного эксперимента в рамках исследовательской работы

Рис. 4.6. Организация и проведение натурного эксперимента

В ходе экспериментального исследования измерялось время, затраченное на проведение операций с момента подачи заготовок до момента получения готовой продукции. Критериями эффективности являлись время, затрачиваемое на создание одной единицы готовой продукции, и количество качественной (не бракованной) продукции за условную смену.

В Таблице 4.8 и на Рис. 4.7 представлены данные, полученные в период проведения экспериментальных исследований, с учетом применения разработанного метода и алгоритма распределения работ в коллаборативной робототехнической системе с минимизацией затрат.

Таблица 4.8. Экспериментальные данные по выполнению работ смешанной неоднородной командой на базе роботизированной ячейки

Параметр, ед. изм.	**Неделя 1**					**Среднее значение**
	День 1	День 2	День 3	День 4	День 5	
Кол-во изд. (без оптим.), шт.	530	495	520	540	520	521
Кол-во изд. (после оптим.), шт.	690	703	699	705	685	696

Продолжение Таблицы 4.8

Неделя 2						
Кол-во изд. (без оптим.), шт.	502	515	550	520	499	517
Кол-во изд. (после оптим.), шт.	685	690	701	700	702	695
Неделя 3						
Кол-во изд. (без оптим.), шт.	505	525	498	480	500	501
Кол-во изд. (после оптим.), шт.	675	688	701	694	700	691
Неделя 4						
Кол-во изд. (без оптим.), шт.	490	510	489	493	499	496
Кол-во изд. (после оптим.), шт.	703	701	695	690	701	698

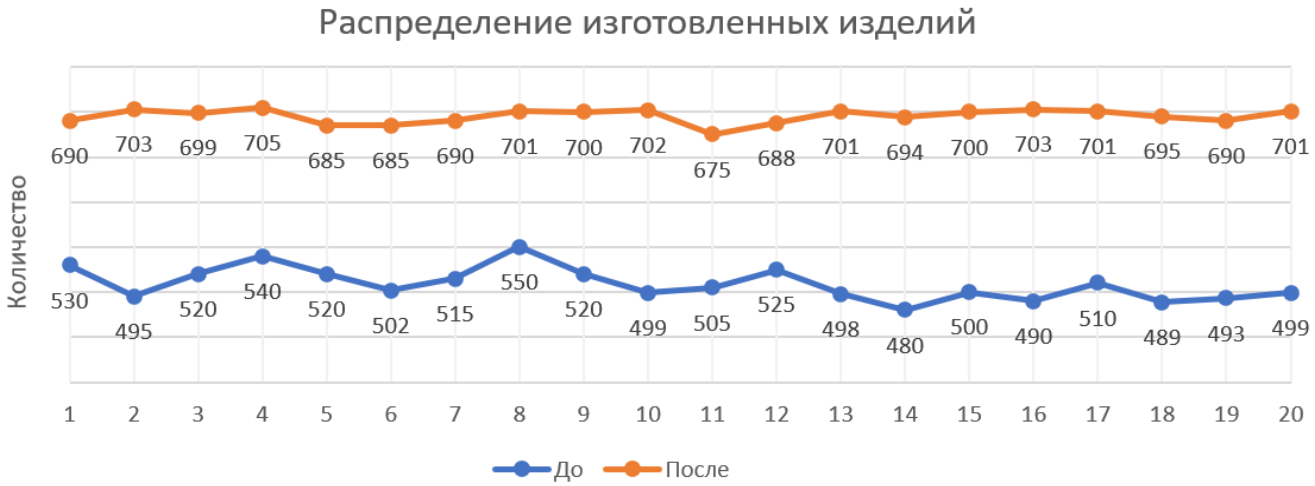


Рис. 4.7. Распределение готовых изделий по дням в период измерений

На гистограмме (Рис. 4.8) приводится распределение полученных измерений в ходе проведенного эксперимента по его средним значениям за неделю, до и после оптимизации процесса изготовления изделий.

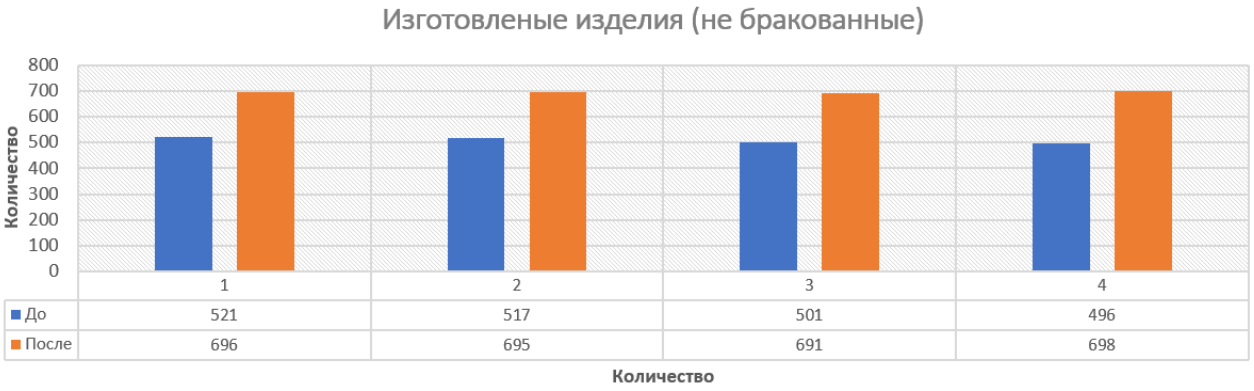


Рис. 4.8. Распределение полученных измерений в ходе проведенного эксперимента по его средним значениям за неделю

Измерение ежедневных показателей изготовленной продукции показало эффективность применения метода и алгоритма распределения работ в КРТС с минимизацией затрат. Процесс изготовления изделий был оптимизирован с точки зрения повышения производительности и снижения времени на издержки, которые возникали в работе до оптимизации. Это связано с возможными человеческими факторами и неэффективным распределением работ агентам. В результате проведенного натурного эксперимента производительность процесса изготовления листового материала удалось повысить на 35 %. Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенных метода и алгоритмов распределения работ в неоднородной смешанной команде КРТС.

4.4. Выводы по Главе 4

В результате проведенного моделирования работы алгоритма распределения работ между участниками КРТС основной объем работ распределялся на коллаборативных роботов, обладающих максимальной эффективностью среди этого типа участников для данного конкретного работ, что связано с разницей значений эффективности по конкретным видам работ. Несмотря на это, некоторый объем работ людям все же назначался, если значение их эффективности было

ненулевое. Такое распределение работ свидетельствует о возможности минимизации затрат участников КРТС в условиях распределения больших объемов работ среди агентов, обладающих различными значениями эффективности.

Анализ численных данных в рамках моделирования работы предложенного алгоритма по минимизации времени выполнения операций (работ) технологического процесса показывает, что его использование для выполнения последовательности взаимозависимых атомарных операций, требующих коллаборации людей и роботов, позволяет сократить время выполнения как технологического процесса в целом, так и отдельных его операций. Кроме того, разработанный алгоритм возможно использовать для проверки различных гипотез по формированию субоптимального состава участников КРТС для выполнения операций технологического процесса с учетом эффективности каждого из задействованных агентов смешанных неоднородных команд, минимального и максимального состава назначаемых на операцию исполнителей и значений их эффективности.

Результаты применения разработанных метода и алгоритма минимизации затрат в КРТС в рамках натурного эксперимента позволяют утверждать, что их использование обеспечивает повышение эффективности функционирования КРТС, в том числе на примере простых коллаборативных робототехнических ячеек. Натурный эксперимент показал эффективность применения метода и алгоритма распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, выраженную в увеличении количества изделий, выполненные за время, затраченное на проведение операций с момента подачи заготовок до момента получения готовой продукции в течение рабочей смены. Использование метода и алгоритма в рамках натурного эксперимента позволило повысить эффективность производственного процесса на 35%.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [152, 153].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной научный результат диссертационной работы заключается в решении актуальной научной задачи, заключающийся в разработке метода и алгоритмов распределения работ в смешанной неоднородной команде коллаборативной робототехнической системы, способствующих повышению эффективности ее функционирования.

В ходе диссертационного исследования получены следующие результаты:

1. Структура гибридной системы управления коллаборативной робототехнической системы с целью эффективного распределения работ в смешанной неоднородной команде в случае применения централизованной и децентрализованной стратегий управления.

2. Разработаны метод и реализующие его алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, обеспечивающие повышение эффективности коллаборации участников КРТС за счет минимизации временных, финансовых и/или энергетических затрат и сокращения времени выполнения операций технологического процесса.

Представленная модульная структура системы управления КРТС обеспечивает эффективное формирование и функционирование смешанной неоднородной команды коботов и людей и предназначена для использования в системах как с централизованными, так и децентрализованными стратегиями управления. Управление в КРТС предполагает распределение работ человеку и коботу на нижнем уровне управления, а также использование человека для тактического управления действиями кобота. Гибридная стратегия управления ориентирована на оптимизацию общей производительности и эффективное решение задач, поставленных отдельным управляющим центром (в случае централизованной схемы управления) или одним из участников смешанной неоднородной команды (для децентрализованного управления) КРТС. Коллаборативное взаимодействие рассматривается в качестве совершения

целенаправленных и совместных действий детерминированными коллаборативными роботами и людьми с недетерминированным поведением в едином рабочем пространстве для достижения общей цели или при совместном выполнении задач.

Для решения задачи минимизации затрат при распределении работ в КРТС разработаны авторские метод и алгоритм. Рассмотрена общая постановка задачи для минимизации значений обобщенных производственных функций затрат Кобба-Дугласа для участников гетерогенных смешанных команд, а также частные случаи со следующими условиями:

1. Разные виды функций затрат для разных типов участников команды – людей и коботов.
2. Ограниченная активность коботов в команде.
3. Наличие зависимости затрат коботов на выполнение некоторого вида работ от количества людей, назначенных на выполнение того же вида работ.
4. Наличие произвольного количества видов работ, назначаемых участникам смешанной неоднородной команды.

Разработанный алгоритм распределения работ с минимизацией затрат применим для смешанной неоднородной команды с гетерогенными участниками, позволяет учитывать специфику разнородности членов команды, а также требования безопасного взаимодействия агентов в КРТС. Рассмотрены особенности работы алгоритма в рамках указанных в методе частных случаев, в том числе при различных функциях затрат разнородных участников, в случае ограниченной активности членов команды, при наличии зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ участников другого типа, а также в случае наличия произвольного количества видов работ, назначаемых участникам смешанной неоднородной команды. Следует отметить, алгоритм учитывает субоптимальный состав команд при распределении общего объема работ с учетом значений эффективности участников КРТС.

В рамках численного эксперимента (моделирования) использования алгоритма для распределения работ между участниками КРТС с минимизацией

затрат основной рабочий объем назначался коллаборативным роботам, обладающим максимальной эффективностью среди этого типа участников для конкретной работы, что связано с существенными различиями в значениях эффективности агентов. Несмотря на это, некоторый объем работ людям назначался, если значение их эффективности для данной работы было ненулевым. Таким образом, показана возможность минимизации затрат участников КРТС в условиях распределения больших объемов работ среди разнородных агентов, обладающих различными значениями эффективности.

Результаты натурного эксперимента позволяют утверждать, что использование разработанных метода и алгоритма обеспечивает повышение эффективности функционирования реальных КРТС, в том числе на представленном примере простой коллаборативной робототехнической ячейки. В частности, их применение на производственном объекте позволило увеличить количество выхода изделий и эффективность производственного процесса на 35%.

Для решения задачи минимизации времени выполнения агентами КРТС технологического процесса, представленного в виде сетевой модели и событийно-временной последовательности, разработан соответствующий алгоритм распределения работ среди агентов подобных систем. Алгоритм обеспечивает минимизацию как общего времени выполнения технологического процесса, так и отдельных его операций, позволяет представлять условия, зависимости и время выполнения операций в виде ориентированного взвешенного графа, вершины которого являются временными событиями начала одной или нескольких операций, а веса ребер – ее (их) временем выполнения. Алгоритм предполагает преобразование орграфа во временную последовательность выполнения операций с последующим назначением исполнителей на операцию (операции), начало которой (которых) соответствует текущему временному событию, с выбором количества назначаемых исполнителей (коботов и людей) от минимально до максимально возможного в текущий момент времени на основании количества свободных исполнителей и значений их эффективности. После назначения осуществляется перерасчет времени выполнения операции в соответствии со

значениями эффективности назначенного состава исполнителей, осуществляется модификация веса соответствующего ребра орграфа и переформирование временной последовательности после текущего временного события. В случае отсутствия требуемого количества незанятых людей и (или) коботов назначение на операцию откладывается до наступления ближайшего временного события. Алгоритм осуществляет переход от текущего временного события к ближайшему по времени и одновременный обход графа, начиная с первой и заканчивая последней вершинами, что соответствует началу и концу технологического процесса, при этом вначале выполняются действия по назначению исполнителей на выполнение отложенных операций, затем коботы и люди назначаются на операции, начало которых соответствует текущему временному событию.

Анализ данных численного эксперимента (моделирования) работы предложенного алгоритма по минимизации времени выполнения участниками КРТС технологического процесса показывал, что его использование для сетевой модели последовательности взаимозависимых атомарных операций, требующих коллаборации людей и роботов, позволяет сократить время выполнения как технологического процесса в целом, так и отдельных его операций. Кроме того, разработанный алгоритм возможно использовать для проверки различных гипотез по формированию субоптимального состава участников КРТС для выполнения технологического процесса с учетом эффективности каждого из задействованных агентов смешанных неоднородных команд, минимального и максимального состава назначаемых на операцию исполнителей и значений их эффективности для отдельных задач.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

№ п/п	**Сокращения и условные обозначения**	**Расшифровка**
1	КРТС	Коллаборативная робототехническая система
2	РТС	Робототехническая система
3	СУ	Система управления
4	ЦУУ	Центральное устройство управления
5	ConcHRC	Concurrent human-robot-collaboration (параллельное коллаборативное взаимодействие человека и робота)
6	DFA	Design for Assembly (проектирование для сборки)
7	GOER	Global Optimal Evaluation of Revenue (глобальная оптимальная оценка выручки)
8	FlexHRC	Flexible human-robot-collaboration (гибкое коллаборативное взаимодействие человека и робота)
9	HRI	Human-robot interaction (взаимодействие человека и робота)
10	HRC	Human-robot interaction (взаимодействие человека и робота)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов, А. А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). В 2-х кн.: Кн. 1. / под ред. Л. И. Абалкин / А. А. Богданов. – М.: Экономика. – 1989. – 304 с.
2. Саламатов, Ю. П. Система законов развития техники (основы теории развития технических систем) / Ю. П. Саламатов. – Красноярск, INSTITUTE OF INNOVATIVE DESIGN. – 1996.
3. ГОСТ Р ИСО 8373-2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения – Введ. 2016-01-01. – М.: Стандарт информ, 2014. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
4. Юревич, Е. П. Функциональные схемы роботов трех поколений / Е. П. Юревич. – Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. –1974. – №. 6.
5. Anandan, T. Safety and control in collaborative robotics / T. Anandan. – Control Engineering. – 2013. – Т. 6. – С. 1–4.
6. Ермишин, К. В., Ющенко, А. С. Коллаборативные мобильные роботы-новый этап развития сервисной робототехники. – Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 3. – С. 3–9.
7. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V. Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – № 187. – С. 175–185.
8. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. // Hannover Messe. – Режим доступа: http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml.
9. Чернышев, М. А., Кузнецов, Д. А., Кормин, Т. Г. Коллаборативные роботы / М. А. Чернышев, Д. А. Кузнецов, Т. Г. Кормин. – Научные исследования и разработки 2018 года. – 2018. – С. 142–147.

10. Технические характеристики коллаборативного робота Fanuc CR-7iA/L. [Электронный ресурс] // FANUC. – Режим доступа: https://www.fanucamerica.com.
11. Технические характеристики коллаборативного робота Universal Robots UR5e. // Промэнерго Автоматика. – Режим доступа: https://www.siemens-pro.ru/universal-robots/ur5.html.
12. Технические характеристики коллаборативного робота Rethink Robotics. [Электронный ресурс] // Rethink Robotics. – Режим доступа: https://www.rethinkrobotics.com/fileadmin/user_upload/sawyer/rr-blackedition-brochure_low.pdf.
13. Халл, Т., Рентюк, В. Что необходимо знать о коллаборативных роботах / Т. Халл, В. Ретнюк. – Control Engineering Россия. – 2019. – № 6. – С. 48–51.
14. Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A. et al. Collaborative Robots. Second Edition / M. Mihelj, T. Bajd, A. Ude, J. Lenarčič, A. Stanovnik, M. Munih, J. Rejc, S. Šlajpah. – Springer, Cham, 2019. – 251 c.
15. I. S. O. ISO/TS 15066: 2016: Robots and Robotic Devices – Collaborative Robots // International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. – 2016.
16. ISO I. S. O. 10218: Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Industrial Robots – Part 1: Robots; Part 2: Robot systems and integration // ISO: Geneve, Switzerland. – 2011.
17. Arkhipov, V. V., Naumov, V. B. Artificial intelligence and autonomous devices in legal context: on development of the first Russian law on robotics / V. V. Arkhipov, V. B. Naumov. – SPIIRAS Proceedings. – 2017. – Т. 6. – № 55. – С. 46–62.
18. Villani, V., Pini, F., Leali, F., Secchi, C. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications / V. Villani, F. Pini, F. Leali, C. Secchi. – Mechatronics. – 2018. – Т. 55. – С. 248–266.
19. ISO E. N. 12100: 2010: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction // Reference Source. – 2010.

20. International Electrotechnical Commission et al. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems // IEC 61508. – 2000.
21. I. O. ISO 13849-1: 2015 Safety of machinery – Safety related parts of control systems – Part 1: General principles for design.
22. International Electrotechnical Commission et al. IEC 62061, Safety of machinery – Functional safety of safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems // IEC Standards Online. – 2005.
23. ISO 13850: 2015. Safety of machinery – Emergency stop function – Principles for design.
24. ISO E. N. 13851: 2019 Safety of machinery – Two-hand control devices – Principles for design and selection // Online [Accessed 16 August 2021] https://www. iso. org/standard/70295. html. – 2019.
25. Michalos, G., Makris, S., Tsarouchi, P. et al. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces / G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, G. Chryssolouris. – Procedia CIrP, 2015. – Т. 37. – С. 248–253.
26. Galin, R. R., Meshcheryakov, R.V. Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov // Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – № 272. – С. 55–63.
27. Lasota, P. A., Shah, J. A. Analyzing the effects of human-aware motion planning on close-proximity human-robot collaboration / P. A. Lasota, J. A. Shah. – Human factors. – 2015. – Т. 57. – № 1. – С. 21–33.
28. Schmidtler, J., Knott, V., Hölzel, C. et al. Human centered assistance applications for the working environment of the future / J. Schmidtler, V. Knott, C. Hölzel, Bengler K. – Occupational Ergonomics. – 2015. – Т. 12. – № 3. – С. 83–95.
29. Конюховская, А., Цыпленкова, В. Рынок робототехники: угрозы и возможности для России. – М.: Litres, 2022.

30. Matúšová, M., Bučányová, M., Hrušková, E. The future of industry with collaborative robots / M. Matúšová, M. Bučányová, E. Hrušková. – MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2019. – Т. 299. – С. 02008.
31. Knudsen, M., Kaivo-Oja, J. Collaborative robots: Frontiers of current literature / M. Knudsen, J. Kaivo-Oja. – Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications. – 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 13–20.
32. Hoffman, G. Evaluating fluency in human–robot collaboration / G. Hoffman. – IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2019. – Т. 49. – №. 3. – С. 209–218.
33. Yanco, H. A., Drury, J. Classifying human-robot interaction: an updated taxonomy //2004 IEEE international conference on systems, man and cybernetics / H. A. Yanco, J. Drury. – IEEE, 2004. – Т. 3. – С. 2841–2846.
34. Scholtz, J. Theory and evaluation of human robot interactions //36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of the. – IEEE, 2003. – С. 10.
35. Huttenrauch, H., Eklundh, K. S. Investigating socially interactive robots that give the right cues and make their presence felt / H. Huttenrauch, K. S. Eklundh. – Proceedings of the CHI 2004 workshop on shaping human-robot interaction. – 2004. – С. 17–20.
36. Ellis, C. A., Gibbs, S. J., Rein, G. Groupware: some issues and experiences / C. A. Ellis, S. J. Gibbs, G. Rein. – Communications of the ACM, 1991. – Т. 34. – №. 1. – С. 39–58.
37. Goodrich, M. A., Crandall, J. W., Stimpson, J. L. Neglect tolerant teaming: Issues and dilemmas / M. A. Goodrich, J. W. Crandall, J. L. Stimpson. – Proceedings of the 2003 AAAI Spring Symposium on Human Interaction with Autonomous Systems in Complex Environments. – 2003. – С. 24–26.
38. Wang, X. V., Kemény, Z., Váncza, J. et al. Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation / X. V. Wang, Z. Kemény, J. Váncza, L. Wang. – CIRP annals. – 2017. – Т. 66. – №. 1. – С. 5–8.
39. Галин, Р. Р., Серебренный, В. В., Тевяшов, Г. К., Широкий, А. А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических

системах / Р. Р. Галин, В. В. Серебренный, Г. К. Тевяшов, А. А. Широкий // Известия Юго-Западного Государственного университета. – 2020. – № 24(4). – С. 180–199.

40. Андрианов, Ю. Д., Бобриков, Э. П., Гончаренко, В. Н. и др. Робототехника / под ред. Е. П. Попова, Е. И. Юревича / Ю. Д. Андрианов, Э. П. Бобриков, В. Н. Гончаренко. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
41. Управление роботами от ЭВМ [Текст]: монография / Е.И. Юревич [и др.]; под ред. Е.И. Юревича.-М.: Энергия, 1980- 264 с.
42. Макаров, И. М. Групповое управление роботами-манипуляторами с распределенно-централизованной организацией обработки информации / И. М. Макаров, В. З. Рахманкулов. – Микропроцессорные системы управления в радиотехнике: сб. науч. трудов. – М.: Наука, 1984. – С.35–45.
43. Каляев, И. А. Система планирования и управления деятельностью коллектива транспортных роботов / И. А. Каляев. – Методы автоматизации проектирования, программирования и моделирования: сб. науч. трудов. – Таганрог, ТРТИ. – 1982. – № 3. – С.119–123.
44. Fukuda, T., Ueyama, T., Kawauchi, Y. et al. Concept of cellular robotic system (CEBOT) and basic strategies for its realization / T. Fukuda, T. Ueyama, Y. Kawauchi, F. Arai. – Computers & electrical engineering, 1992. – Т. 18. – № 1. – С. 11–39.
45. Alami, R., Fleury, S., Herrb, M., Ingrand, F. et al. Multi-robot cooperation in the MARTHA project / R. Alami, S. Fleury, M. Herrb, F. Ingrand, F. Robert. – IEEE Robotics & Automation Magazine. – 1998. – Т. 5. – №. 1. – С. 36–47.
46. Oudot-Mellakh, T., Cohen, W., Germain, M., Saut, N., Kallel, C., Zelenika, D., ... & Morange, P. E. (2012). Genome wide association study for plasma levels of natural anticoagulant inhibitors and protein C anticoagulant pathway: the MARTHA project. British journal of haematology, 157(2), 230-239.
47. Alami, R., Ingrand, F. F., Qutub, S. A Scheme for Coordinating Multi-robots Planning Activities and Plans Execution / R. Alami, F. F. Ingrand, S. Qutub. – ECAI, 1998. – С. 617–621.

48. Alami, R., da Costa Bothelho, S. S. Plan-based multi-robot cooperation / R. Alami, S. S. da Costa Bothelho. – Advances in Plan-Based Control of Robotic Agents: International Seminar Dagstuhl Castle, Germany, October 21–26, 2001 Revised Papers. – Springer Berlin Heidelberg, 2002. – С. 1–20.
49. Stoeter, S. A., Burt, I. T., Papanikolopouslos, N. Scout robot motion model / S. A. Stoeter, I. T. Burt, N. Papanikolopouslos. – IEEE, 2003. – Т. 1. – С. 90–95.
50. Desai, J. P., Ostrowski, J., Kumar, V. Controlling formations of multiple mobile robots / J. P. Desai, J. Ostrowski, V. Kumar. – IEEE, 1998. – Т. 4. – С. 2864–2869.
51. Kawamura, K., Peters, R. A., Johnson, C. et al. Supervisory control of mobile robots using sensory egosphere / K. Kawamura, R. A. Peters, C. Johnson, P. Nilas; S. Thongchai. – IEEE, 2001. – С. 523–529.
52. Павловский, В. Е., Кирикова, Е. П. Моделирование управляемого адаптивного поведения гомогенной группы роботов /В. Е. Павловский, Е. П. Кирикова. – Искусственный интеллект, 2002. – № 4. – С. 596–605.
53. Галин, Р. Р. Виртуальный полигон для эффективного взаимодействия роботов в многоагентной робототехнической системе / Р. Р. Галин // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2018. – № 6 (86) часть II. – С. 108–113.
54. Кулинич, А. А. Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход / А. А. Кулинич. – Управление большими системами: сборник трудов. – 2014. – № 51. – С. 174–196.
55. Фестингер, Л. Теория когнитивного диссонанса / Л. Фестингер. – СПб.: Ювента, 1999. – С. 15–52.
56. Воробьев, Н. Н. Устойчивые ситуации в коалиционных играх // Доклады Академии наук / Н. Н. Воробьев. – Российская академия наук, 1960. – Т. 131. – № 3. – С. 493–495.
57. Conte, R., Edmonds, B., Moss, S. et al. Sociology and social theory in agent based social simulation: A symposium / R. Conte, B. Edmonds, S. Moss, R. K. Sawyer. – Computational & Mathematical Organization Theory. – 2001. – Т. 7. – № 3. – С. 183–205.

58. Genesereth, M. R., Ginsberg, M. L., Rosenschein, J. S. Cooperation without communication // Readings in distributed artificial Intelligence / M. R. Genesereth, M. L. Ginsberg, J. S. Rosenschein. – Morgan Kaufmann, 1988. – С. 220–226.
59. Карпов, В. Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике / В. Э. Карпов. – Управление большими системами: сборник трудов, 2016. – № 59. – С. 165–232.
60. Пантелеев, А. В., Каранэ, М. Анализ эффективности мультиагентных методов оптимизации элементов конструкций летательных аппаратов / А. В. Пантелеев, М. Каранэ. – Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2019. – Т. 22. – № 2. – С. 96–108.
61. Пантелеев, А. В., Евдокимова, М. Д. Методы «роевого» интеллекта в задачах оптимизации параметров технических систем / А. В. Пантелеев, М. Д. Евдокимова. – Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2017. – Т. 20. – № 2. – С. 6–15.
62. Peters, N. S. Collaborative Communication Interruption Management System (C-CIMS): Modeling Interruption Timings via Prosodic and Topic Modeling for Human-Machine Teams: дис. / N. S. Peters. – Carnegie Mellon University. – 2017.
63. Каляев, И. А., Гайдук, А. Р., Капустян, С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Монография / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М.: Изд. фирма «Физико-математическая литература», 2009. – 280 с.
64. Vorotnikov, S., Ermishin, K., Nazarova, A. et al. Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // Interactive Collaborative Robotics: Third International Conference / S. Vorotnikov, K. Ermishin, A. Nazarova, A. Yuschenko. – Springer International Publishing, 2018. – С. 270–279.
65. Иванов, Д. Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия / Д. Я. Иванов. – Управление большими системами: сборник трудов. – 2019. – № 78. – С. 23–45.
66. Пшихопов, В. Х., Медведев, М. Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых

режимов / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев. – Информатика и автоматизация, 2018. – Т. 5. – № 60. – С. 39–63.

67. Каляев, И. А., Гайдук, А. Р., Капустян, С. Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – Вестник Южного научного центра РАН, 2005. – Т. 1. – № 2. – С. 20–27.
68. Юревич, Е. И. Основы робототехники / Е. И. Юревич. – 4 изд. – БХВ-Петербург. – 2018.
69. Рыжова, Т. С. Система управления коллективом мобильных роботов / Т. С. Рыжова. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 4. – С. 45–50.
70. Тимофеев, А. В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий / А. В. Тимофеев. – СПб.: СПИИ РАН, 1999. – С. 71–81.
71. Wooldridge, M., Jennings, N. R. Agent theories, architectures, and languages: a survey / M. Wooldridge, N. R. Jennings. – International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer. – 1995. – С. 1–39.
72. Осипов, О. Ю., Мещеряков, Р. В., Шепеленко М. Г. Проектирование цифровых моделей элементов электромашинной части электромехатронных модулей робототехнических систем / О. Ю. Осипов, Р. В. Мещеряков, М. Г. Шепеленко. – Extreme Robotics, 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 160–164.
73. Sycara, K., Pannu, A., Willamson, M. et al. Distributed intelligent agents / K. Sycara, A. Pannu, M. Willamson, D. Zeng. – IEEE expert, 1996. – Т. 11. – № 6. – С. 36–46.
74. Губко, М. В., Новиков, Д. А. Теория игр в управлении организационными системами / М. В. Губко, Д. А. Новиков. – М.: Синтег, 2002. – 148 с.
75. Многоагентные системы. Искусственный интеллект. [Электронный ресурс] // Airportal.ru. – Режим доступа: http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/agent-classification.html.

76. Wooldridge, M., Jennings, N. R. Intelligent agents: Theory and practice / M. Wooldridge, N. R. Jennings. – The knowledge engineering review, 1995. – Т. 10. – № 2. – С. 115–152.
77. Лохин, В. М., Манько, С. В., Александрова, Р. И. и др. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками / В. М. Лохин, С. В. Манько, Р. И. Александрова, С. А. Диане, А. С. Панин. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16. – № 8. – С. 545–555.
78. Новиков, Д. А. Математические модели формирования и функционирования команд / Д. А. Новиков. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 184 с.
79. Beer, M. Organization Change and Development: A System View / M. Beer. – London: Scott-Glenview: Foresman & Co, 1980.
80. Бронштейн, М. Управление командами для «чайников» / М. Бронштейн. – М.: Вильямс, 2004. – 320 с.
81. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами // 3-е изд / Д. А. Новиков. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
82. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В. Б. Тарасов. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
83. Kotenko, I. V., Ulanov, A. V. Agent-based simulation of DDOS attacks and defense mechanisms / I. V. Kotenko, A. V. Ulanov. – Journal of Computing, 2005. – Т. 4. – № 2. – С. 16-37.
84. Ren, W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control / W. Ren. – Brigham: Brigham University, 2004. – 141 с.
85. Hilmi, I. Z., Sariff, N. A Survey and Analysis of Cooperative Multi-Agent Robot Systems: Challenges and Directions / I. Z. Hilmi, N. Sariff. – Applications of Mobile Robots. – 2019. – С. 1–22.

86. Darintsev, O. V., Yudintsev, B. S., Alekseev, A. Y. et al. Methods of a heterogeneous multi-agent robotic system group control / O. V. Darintsev, B. S. Yudintsev, A. Y. Alekseev, D. R. Bogdanov, A. B. Migranov. – Procedia Computer Science. – 2019. – Т. 150. – С. 687–694.
87. Lavendelis, E., Liekna, A., Nikitenko, A. et al. Multi-agent robotic system architecture for effective task allocation and management / E. Lavendelis, A. Liekna, A. Nikitenko, A. Grabovskis, J. Grundspenkis. – Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing & Automatic. – 2012. – С. 22–24.
88. Белов, М. В., Новиков, Д. А. Методология комплексной деятельности / М. В. Белов, Д. А. Новиков. – М.: Ленанд, 2018. – 320 с.
89. Галин, Р. Р., Камешева, С. Б. Эффективное функционирование коллаборативной робототехнической системы в едином пространстве / Р. Р. Галин, С. Б. Камешева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2021. – № 1 (99). – С. 5–14.
90. Galin, R. R., Mamchenko, M. V. Human-Robot Collaboration in the Society of the Future: A Survey on the Challenges and the Barriers. In: Singh P.K., Veselov G., Vyatkin V., Pljonkin A., Dodero J.M., Kumar Y. (eds) / R. R. Galin, M. V. Mamchenko // Futuristic Trends in Network and Communication Technologies. Communications in Computer and Information Science. – 2021. – № 1395. – С. 111–122.
91. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov // Interactive Collaborative Robotics. Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – № 11659. – С. 63–74.
92. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V., Kamesheva, S. B., Samoshina, A. I. Cobots and the benefits of their implementation in intelligent manufacturing / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov, S. B. Kamesheva, A. I. Samoshina // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – № 862. – С. 032075.

93. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V. Automation and robotics in the context of Industry 4.0: the shift to collaborative robots / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 537.
94. Галин, Р. Р. Моделирование и классификация взаимодействия человека и робота в коллаборативной робототехнической системе / Р. Р. Галин // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук. – 2020. – Т. 20. – № 3. – С. 24–29.
95. Галин, Р. Р. Сотрудничество человека и робота на примере коллаборативной робототехники / Р. Р. Галин // Труды 14-й Международной конференции по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения-2019». – СПб.: ГУАП, 2019. – С. 241–246.
96. Галин, Р. Р. Взаимодействие человека и робота в эргатической робототехнической системе / Р. Р. Галин // Труды 13-го Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1197–1201.
97. Юревич, Е. И. Управление роботами и робототехническими системами: Учеб. пособие / Е. И. Юревич. – СПб.: СПбГТУ, 2001.
98. Ющенко, А. С., Ермишин, К. В. Коллаборативные мобильные роботы-новый этап развития робототехники / А. С. Ющенко, К. В. Ермишин. – Extreme Robotics. – 2016. – Т. 1. – № 1. – С. 451–459.
99. Серебренный, В. В., Шереужев, М. А. Основные вопросы разработки коллаборативных робототехнических систем промышленного назначения / В. В. Серебренный, М. А. Шереужев. – Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН, 2018. – № 6-3. – С. 106–113.
100. Hackman, J. R. Introduction: work teams in organizations: an oriented framework / J. R. Hackman. – MA: Addison Wesley, 1990. – 1–14.
101. Alchian, A. A., Demsetz, H. Production, information costs, and economic organization / A. A. Alchian, H. Demsetz. – The American economic review. – 1972. – Т. 62. – № 5. – С. 777–795.

102. Вартанян, А. А. Управление командой и организацией в бизнес-среде / А. А. Вартанян. – М.: Доброе слово, 2006.

103. Баркер, А. Как еще лучше управлять людьми / А. Бакер. – М.: ФАИР-Пресс, 2002.

104. Mathieu, B. What Does Collaborative Robot Mean / B. Mathieu // ROBOTIQ. – 2015. – Режим доступа: https://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean.

105. Хомченко, В. Г. Робототехнические системы: Учеб. пособие / В. Г. Хомченко. – Омск: ОМГТУ, 2016.

106. Galin, R. R., Mamchenko, M. V., Meshcheryakov, R. V. Analysis of the Allocation and Implementation of Tasks in the Heterogeneous Team of the Collaborative Robotic System. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) / Galin R. R., R. V. Meshcheryakov, M. V. Mamchenko // Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2021. – № 232. – С. 109–119.

107. Каляев, И. А., Капустян, С. Г. Проблемы группового управления роботами / И. А. Каляев, С. Г. Капустян. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 6. – С.33–40.

108. Galin, R. R., Shiroky, A. A., Magid, E., Meshcheryakov, R. V., Mamchenko, M. V. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System / R. R. Galin, A. A. Shiroky, E. Magid, R. V. Meshcheryakov, M. V. Mamchenko // Informatics and Automation. – 2021. – № 20(6) – С. 1224–1253.

109. Юревич, Е. И. О проблеме группового управления роботами / Е. И. Юревич. – Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 9-13.

110. Щербатов, И. А., Проталинский, И. О., Проталинский, О. М. Управление группой роботов: компонентный подход / И. А. Щербатов, И. О. Проталинский, О. М. Проталинский. – Информатика и системы управления. – 2015. – № 1. – С. 93–104.

111. Карпов, В. Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное / В. Э. Карпов. – Орехово-Зуево: Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы, 2011. – С. 132.

112. Пшихопов, В. Х., Медведев, М. Ю. Планирование движения группы подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев. – Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 6–22.

113. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V., Kamesheva, S. B. Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov, S. B. Kamesheva // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science. – 2020. – № 12336. – С. 99–106.

114. Lefranc, G. Colony of robots: New Challenge / G. Lefranc. – International Journal of Computers, Communications & Control. – 2008. – Т. 3. – С .92–107.

115. Ferrauto, T., Parisi, D., Di Stefano, G. et al. Different genetic algorithms and the evolution of specialization: A study with groups of simulated neural robots / T. Ferrauto, D. Parisi, G. Di Stefano, G. Baldassarre. – Artificial life. – 2013. – Т. 19. – № 2. – С. 221–253.

116. Каляев, А. И., Каляев, И. А. Метод децентрализованного управления группой роботов при выполнении потока заданий / А. И. Каляев, И. А. Каляев. – Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – №. 1. – С. 26–35.

117. Каляев, И. А., Капустян, С. Г., Гайдук, А. Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели / А. И. Каляев, С. Г. Капустян, А. Р. Гайдук. – Управление большими системами: сборник трудов. – 2010. – № 30–1. – С. 605–639.

118. Ющенко, А. С. Нечеткое управление в эргатических робототехнических системах / А. С. Ющенко. – Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 8 (20). – С. 30.

119. Манько, С. В., Лохин, В. М., Романов, М. П. Концепция построения мультиагентных робототехнических систем / С. В. Манько, В. М. Лохин, М. П. Романов. – Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 3–1. – С. 156–165.

120. Lemaignan, S., Warnier, M., Sisbot, E. A. et al. Artificial cognition for social human-robot interaction: An implementation / S. Lemaignan, M. Warnier, E. A. Sisbot, A. Clodic, R. Alami. – Artificial Intelligence. – 2017. – Т. 247. – С. 45–69.

121. Макаров, И. М. и др. Результаты и опыт реализации концепции построения мультиагентных робототехнических систем / И. М. Макаров, В. М. Лохин, С. В. Манько, М. П. Романов. – Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2011. – Т. 116. – № 3. – С. 101–109.

122. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V., Mamchenko, M. V. Analysis of Intersection of Working Areas Within the Human-Robot Interaction in a Shared Workspace. In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (eds) / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov, M. V. Mamchenko // Software Engineering Application in Informatics. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – № 232. – С. 749–759.

123. Галин, Р. Р. Умное производство. Взаимодействие человека и робота / Р. Р. Галин // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении». – 2020. – С. 196–198.

124. Djezairi, S., Akli, I., Zamoum, R. B. et al. Mission allocation and execution for human and robot agents in industrial environment // 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / S. Djezairi, I. Akli, R. B. Zamoum, B. Bouzouia. – IEEE, 2018. – С. 796–801.

125. Chowdhury, M., Maier, M. Local and nonlocal human-to-robot task allocation in fiber-wireless multi-robot networks / M. Chowdhury, M. Maier. – IEEE Systems Journal, 2017. – Т. 12. – № 3. – С. 2250–2260.

126. Darvish, K., Bruno B., Simetti, E. et al. Interleaved online task planning, simulation, task allocation and motion control for flexible human-robot cooperation // 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / K. Darvish, B. Bruno, E. Simetti, F. Mastrogiovanni, G. Casalino. – IEEE, 2018. – С. 58–65.

127. Karami, H., Darvish, K., Mastrogiovanni, F. A task allocation approach for human-robot collaboration in product defects inspection scenarios // 2020 29th IEEE

International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / H. Karami, K. Darvish, F. Mastrogiovanni. – IEEE, 2020. – С. 1127–1134.

128. Johannsmeier, L., Haddadin, S. A hierarchical human-robot interaction-planning framework for task allocation in collaborative industrial assembly processes / L. Johannsmeier, S. Haddadin. – IEEE Robotics and Automation Letters, 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 41–48.

129. Habibian, S., Losey, D. P. Encouraging human interaction with robot teams: Legible and fair subtask allocations / S. Habibian, D. P. Losey. – IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 6685–6692.

130. Ali, A., Azevedo-Sa, H., Tilbury, D. M. et al. Heterogeneous human–robot task allocation based on artificial trust / A. Ali, H. Azevedo-Sa, D. M. Tilbury, L. P. Robert Jr. – Scientific Reports. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 1–15.

131. Howard, A. M. Role allocation in human-robot interaction schemes for mission scenario execution // Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006 / A. M. Howard. – IEEE, 2006. – С. 3588–3594.

132. Tram, A. V. N., Raweewan, M. Optimal Task Allocation in Human-Robotic Assembly Processes // 2020 5th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE) / A.V.N. Tram, M. Raweewan. – IEEE, 2020. – С. 158–162.

133. Li, X., Zhang, Z., Wu, D. D. et al. A multi-robot allocation model for multi-object based on Global Optimal Evaluation of Revenue / X. Li, Z. Zhang, D. D. Wu, M. Medema, A. Lavozik. – International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2021. – Т. 18. – № 6. – С. 17298814211060650.

134. Ali, A., Azevedo-Sa, H., Tilbury, D. et al. Using Trust for Heterogeneous Human-Robot Team Task Allocation / A. Ali, H. Azevedo-Sa, D. M. Tilbury, L. P. Robert Jr. – 2021 AAAI Fall Symposium on AI for HRI, 2021. – С. 1–4.

135. Катаев, А. В., Катаева Т. М. Управление проектами на базе динамической сети партнеров: монография / А. В. Катаев, Т. М. Катаева. – Ростов-на-Дону – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 125 с.

136. Antonelli, D., Bruno, G. Dynamic distribution of assembly tasks in a collaborative workcell of humans and robots / D. Antonelli, G. Bruno. – FME Transactions, 2019. – Т. 47. – № 4. – С. 723–730.

137. Roncone, A., Mangin, O., Scassellati, B. Transparent role assignment and task allocation in human robot collaboration // 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) / A. Roncone, O. Mangin, B. Scassellati. – IEEE, 2017. – С. 1014–1021.

138. Riedelbauch, D., Henrich, D. Coordinating flexible human-robot teams by local world state observation // 2017 26th IEEE international symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / D. Riedelbauch, D. Henrich. – IEEE, 2017. – С. 1000–1005.

139. Chen, F., Sekiyama, K., Cannella, F. et al. Optimal subtask allocation for human and robot collaboration within hybrid assembly system / F. Chen, K. Sekiyama, F. Cannella, T. Fukuda. – IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013. – Т. 11. – № 4. – С. 1065–1075.

140. Lippi, M., Marino, A. A mixed-integer linear programming formulation for human multi-robot task allocation // 2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN) / M. Lippi, A. Marino. – IEEE, 2021. – С. 1017–1023.

141. Mina, T., Kannan, S. S., Jo, W. et al. Adaptive workload allocation for multi-human multi-robot teams for independent and homogeneous tasks / T. Mina, S. S. Kannan, W. Jo, B. C. Min. – IEEE Access, 2020. – Т. 8. – С. 152697-152712.

142. Fusaro, F., Lamon, E., De Momi, E. et al. An integrated dynamic method for allocating roles and planning tasks for mixed human-robot teams // 2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN) / F. Fusaro, E. Lamon, E. De Momi, A. Ajoudani. – IEEE, 2021. – С. 534–539.

143. Lee, M. L., Behdad, S., Liang, X. et al. Task allocation and planning for product disassembly with human–robot collaboration / M. L. Lee, S. Behdad, X. Liang, M. Zheng. – Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2022. – Т. 76. – С. 102306.

144. Noormohammadi-Asl, A., Ayub, A., Smith, S. L. et al. Task Selection and Planning in Human-Robot Collaborative Processes: To be a Leader or a Follower? // 2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / A. Noormohammadi-Asl, A. Ayub, S. L. Smith, K. Dautenhahn. – IEEE, 2022. – С. 1244–1251.

145. Jung, Y. et al. Human-Centered Dynamic Service Scheduling Approach in Multi-Agent Environments / Y. Jung, H. Kim, K. D. Suh, J. M. Park. – Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – № 21. – С. 10850.

146. Zhang, F., Zhang, Y., Xu, S. Collaboration effectiveness-based complex operations allocation strategy towards to human–robot interaction / F. Zhang, Y. Zhang, S. Xu. – Autonomous Intelligent Systems. – 2022. – Т. 2. – № 1. – С. 20.

147. Rahman, S. M. M., Wang, Y. Mutual trust-based subtask allocation for human–robot collaboration in flexible lightweight assembly in manufacturing / S. M. M. Rahman, Y. Wang. – Mechatronics. – 2018. – Т. 54. – С. 94–109.

148. Ham, A., Park, M. J. Human-robot task allocation and scheduling: Boeing 777 case study / A. Ham, M. J. Park. – IEEE Robotics and Automation Letters, 2021. – Т. 6. – № 2. – С. 1256–1263.

149. Riedelbauch, D., Henrich, D. Exploiting a human-aware world model for dynamic task allocation in flexible human-robot teams // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) / D. Riedelbauch, D. Henrich. – IEEE, 2019. – С. 6511–6517.

150. Galin, R. R., Meshcheryakov, R. V., Samoshina, A. I. Mathematical Modelling and Simulation of Human-Robot Collaboration / R. R. Galin, R. V. Meshcheryakov, A. I. Samoshina // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2020. – С. 1058–1062.

151. Service Manual “Original Instructions”. Revision: UR10_en_3.2.7. Robot with CB3.0/3.1/3.2-controller. Universal Robots A/S.

152. Galin, R. R., Mamchenko, M. V., Romanov, N. A. Business Processes Automation in a Production Facility Through the Use of Collaborative Robots / R. R. Galin, M. V.

Mamchenko, N. A. Romanov // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – 2020. – С. 1–5.

153. Исхаков, А. Ю., Мамченко, М. В., Галин, Р. Р. Программное обеспечение по распределению работ в смешанной неоднородной команде в рамках коллаборативной робототехнической системы. Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022614038 от 16.03.2022 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Алгоритм А.1 – Преобразование орграфа технологического процесса во временную последовательность выполнения операций

Входные данные: *G* – граф технологического процесса.

Выходные данные: *Timeseq* – вектор со множеством временных значений событи начала операций и соответствующих им вершин графа (<Time, Node>).

```
1:  function [Timeseq] = graph_to_timeseq(G)
2:      Timeseq(1,1) = 0;
3:      Timeseq(1,2) = 1;
4:      for each Node in G.Nodes from 2 to end
5:          [paths] = allpaths(G, from 1 to Node);
6:          for each path in paths
7:              time(path) = sum(G.Edges.Weight in path);
8:          end for
9:          Timeseq(Node, 1) = max(time);
10:         Timeseq(Node, 2) = Node;
11:     end for
12: end function
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Алгоритм Б.1 – Назначение состава исполнителей на выполнение отложенной операции

Входные данные: множества людей H и коботов B, *op* – множество операций, G – граф технологического процесса, *v_from*, *v_to* – вершины начала и окончания операции на графе G соответственно.

Выходные данные: G – модифицированный граф технологического процесса, модифицированные множества людей H и коботов B, *delayed* – множество пар вершин, соответствующих началу и окончанию отложенных операций, *op* – модифицированное множество операций.

```
1:  function [G, H, B, delayed, op] = assign_to_ops_delayed(H, B,
    op, G, v_from, v_to)
2:      predecessors ← predecessors(G, v_from);
3:      if predecessors is notempty
4:          for each predecessor in predecessors
5:              for each h_i in H
6:                  if h_i.current_op = op(predecessor)
7:                      h_i.current_op ← 0;
8:                  end if
9:              end for
10:             for each b_j in B
11:                 if b_j.current_op = op(predecessor)
12:                     b_j.current_op ← 0;
13:                 end if
14:             end for
15:         end for
16:     end if
17:     num = findedge(G, v_from, v_to);
18:     B^(m_jav) ← B(B.current_op = 0);
19:     m_(j_av) ← size(B^(m_jav));
20:     H^(n_jav) ← H(H.current_op = 0);
21:     n_(j_av) ← size(H^(n_jav));
22:     n_(j_min) ← op(from v_from to v_to).Min_human;
23:     n_(j_max) ← op(from v_from to v_to).Max_human;
```

$m_{j_{min}} \leftarrow$ op(**from** v_from **to** v_to).Min_cobot;
$m_{j_{max}} \leftarrow$ op(**from** v_from **to** v_to).Max_cobot;
if $n_{j_{av}} \geq n_{j_{min}}$
  if $n_{j_{min}} \leq n_{j_{av}} < n_{j_{max}}$
    $n_{j_{max}} \leftarrow n_{j_{av}}$
  end if
else
  break;
end if
if $m_{j_{av}} \geq m_{j_{min}}$
  if $m_{j_{min}} \leq m_{j_{av}} < m_{j_{max}}$
    $m_{j_{max}} \leftarrow m_{j_{av}}$
  end if
else
  break;
end if
for $n_j \in [n_{j_{min}} .. n_{j_{max}}]$ **do:**
  $H_j \leftarrow \left\{ h_{j_i} | r_{h_{j_i}} = \max\left(any\ h\ in\ H^{n_{j_{av}}}\right) \right\}_{i=n_{j_{min}}}^{n_j}$;
  h_{j_i}.current_op $\leftarrow$ op(**from** v_from **to** v_to);
end for
for $m_j \in [m_{j_{min}} .. m_{j_{max}}]$ **do:**
  $B_j \leftarrow \left\{ b_{j_k} | r_{b_{j_k}} = \max\left(any\ b\ in\ B^{m_{j_{av}}}\right) \right\}_{k=m_{j_{min}}}^{m_j}$
  b_{j_k}.current_op $\leftarrow$ op(**from** v_from **to** v_to);
end for
G.Edge(**from** v_from **to** v_to).weight $\leftarrow$ $\frac{(n_{j_{min}}+m_{j_{min}})\times t_{op.st_{\text{op(from v_from to v_to)}}}}{(\sum_{k=n_{j_{min}}}^{m_j} r_{h_{j_k}}+\sum_{i=n_{j_{min}}}^{n_j} r_{h_{j_i}})}$;
op(**from** v_from **to** v_to).human = n_j;
op(**from** v_from **to** v_to).cobot = m_j;
delete row [v_from v_to] **from** delayed;
end function

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Алгоритм В.1 – Назначение состава исполнителей на выполнение одной или нескольких последующих операций

Входные данные: множества людей H и коботов B, op – множество операций, G – граф технологического процесса, v_j – вершина на графе G, соответствующая времени начала операции (операций), *delayed* – множество пар вершин, соответствующих началу и окончанию отложенных операций.

Выходные данные: G – модифицированный граф технологического процесса, модифицированные множества людей H и коботов B, *delayed* – модифицированное множество пар вершин, соответствующих началу и окончанию отложенных операций, *op* – модифицированное множество операций.

```
1:  function [G, H, B, delayed, op] = assign_to_ops(H, B, op, G, v_j,
    delayed)
2:      predecessors ← predecessors(G, v_j);
3:      if predecessors is notempty
4:          for each predecessor in predecessors
5:              for each h_i in H
6:                  if h_i.current_op = op(predecessor)
7:                      h_i.current_op ← 0;
8:                  end if
9:              end for
10:             for each b_j in B
11:                 if b_j.current_op = op(predecessor)
12:                     b_j.current_op ← 0;
13:                 end if
14:             end for
15:         end for
16:     end if
17:     successors = successors(G, v_j);
18:     for each successor in successors
19:         B^(m_jav) ← B(B.current_op = 0);
20:         m_jav ← size(B^(m_jav));
21:         H^(n_jav) ← H(H.current_op = 0);
22:         n_jav ← size(H^(n_jav));
23:         n_jmin ← op(from v_j to successor).Min_human;
24:         n_jmax ← op(from v_j to successor).Max_human;
```

$m_{j_{min}}$ ← op(**from** v_j **to** successor).Min_cobot;
$m_{j_{max}}$ ← op(**from** v_j **to** successor).Max_cobot;
if $n_{j_{av}} \geq n_{j_{min}}$
    if $n_{j_{min}} \leq n_{j_{av}} < n_{j_{max}}$
        $n_{j_{max}}$ ← $n_{j_{av}}$
    end if
else
    delayed(end+1) = [from, successor];
    break; % прекращение выполнения операций в рамках
           % цикла
end if
if $m_{j_{av}} \geq m_{j_{min}}$
    if $m_{j_{min}} \leq m_{j_{av}} < m_{j_{max}}$
        $m_{j_{max}}$ ← $m_{j_{av}}$
    end if
else
    delayed(end+1) = [from, successor];
    break; % прекращение выполнения операций в рамках
           % цикла
end if
for $n_j \in [n_{j_{min}}..n_{j_{max}}]$ **do**:
    $H_j \leftarrow \left\{h_{j_i} | r_{h_{j_i}} = \max\left(any\ h\ in\ H^{n_{j_{av}}}\right)\right\}_{i=n_{j_{min}}}^{n_j}$;
    h_{j_i}.current_op ← op(**from** v_j **to** successor);
end for
for $m_j \in [m_{j_{min}}..m_{j_{max}}]$ **do**:
    $B_j \leftarrow \left\{b_{j_k} | r_{b_{j_k}} = \max\left(any\ b\ in\ B^{m_{j_{av}}}\right)\right\}_{k=m_{j_{min}}}^{m_j}$
    b_{j_k}.current_op ← op(**from** v_j **to** successor);
end for
G.Edge(**from** v_j **to** successor).weight ←
$\frac{(n_{j_{min}}+m_{j_{min}})\times t_{op.st_{\text{op(from } v_j \text{ to successor)}}}}{(\sum_{k=n_{j_{min}}}^{m_j} r_{h_{j_k}}+\sum_{i=n_{j_{min}}}^{n_j} r_{h_{j_i}})}$;
op(**from** v_j **to** successor).human = n_j;
op(**from** v_j **to** successor).cobot = m_j;
end for
end function

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Алгоритм Г.1 – Обобщенный алгоритм расчета минимального времени выполнения операций людьми и коботами в рамках технологического процесса

1: $n \leftarrow n;$
2: $m \leftarrow$ m;
3: H $\leftarrow \{h_j|number \leftarrow$i$|r_{h_i} \leftarrow (0..1]||current_op \leftarrow 0\}_{i=1}^{n}$
4: B $\leftarrow \left\{b_j|number \leftarrow \text{j}|r_{b_j} \leftarrow (0..1]||current_op \leftarrow 0\right\}_{j=1}^{m}$
5: G $\leftarrow$ digraph($s \leftarrow s,\ t \leftarrow t,\ weights \leftarrow weights$);
op$\leftarrow\{op_w \mid number \leftarrow$w$\mid min_human \leftarrow min_human \mid max_human \leftarrow max_human \mid \ldots$
6: $min_cobot \leftarrow min_cobot \mid max_cobot \leftarrow max_cobot \mid num_human \leftarrow [\,] \mid num_cobot \leftarrow [\,] \ldots st_t \leftarrow st_t\}_{w=1}^{G.Edges};$
7: delayed $\leftarrow$ [];
8: [Timeseq] $\leftarrow$ graph_to_timeseq(G);
9: t_time $\leftarrow$ Timeseq(1).Time;
10: v_vert $\leftarrow$ Timeseq(2).Node;
11: **while** v_vert != G.Node(end) **do**
12: **if** delayed **is notempty**
13: **for each** op_delayed **in** delayed **do**
14: [G, H, B, delayed, op] = assign_to_ops_delayed(H, B, op, G, ...
15: ... v_from $\leftarrow$ op_delayed(1), v_to $\leftarrow$ op_delayed(2));
16: [Timeseq] $\leftarrow$ graph_to_timeseq(G);
17: **end for**
18: **else**
19: **for each** v_vert **in** [v_vert]
20: [G, H, B, delayed, op] = assign_to_ops(H, B, op, G, v_vert, ...
21: ... delayed);
22: [Timeseq] $\leftarrow$ graph_to_timeseq(G);
23: **end for**
24: **end if**
25: [G, H, B, delayed, Timeseq, Nodetime] $\leftarrow$ assign_to_ops(H, B, op, ...
... G, v_vert)
26: t_time $\leftarrow$ [min(Timeseq(☺.Time > t_time)];

```
    v_vert ← Timeseq(:).Node where Timeseq(k).Time = t_time;
end while
[paths] = allpaths(G, from 1 to G.Node(end));
for each path in paths
    t1(path) = sum(G.Edges.Weight in path)
end for
t = max(t1);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Справка об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

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

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
Тел. (499) 263-63-91 Факс (499) 267-48-44
E-mail: bauman@bmstu.ru
ОГРН 1027739051779
ИНН 7701002520 КПП 770101001

_____№_____

на №_____от_____

Утверждаю:
Первый проректор-
проректор по учебной работе
МГТУ им Н.Э. Баумана
_____ Падалкин Б.В.

Справка
об использовании результатов диссертационной работы
Галина Рината Романовича в учебном процессе

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы Галина Р.Р. «Метод и алгоритмы распределения задач в коллаборативной робототехнической системе» используются в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре СМ-7 «Робототехнические системы и мехатроника» по программе подготовки бакалавров и магистров по направлению 15.03.06 «Мехатроника и робототехника». В том числе, в курсах лекций по дисциплинам «Введение в робототехнику и мехатронику», «Управление роботами» и «Эргономика робототехнических систем» даются сведения о предложенной в работе Галина Р.Р. методике расчета эффективности функционирования коллаборативной робототехнической системы и о способах её повышения за счет оптимизации распределения функций человека и робота.

Зам. заведующего кафедрой СМ-7

Профессор, д.т.н. _____ Ющенко А.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

ЦИГТ	Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли "Инновационные горные технологии"
ИПКОН РАН ООО «ГАН» ООО «ТНМ» ООО «Технобард»	119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.4, стр.1А, этаж 3, помещ.II Тел. 8(495) 953-72-96 E-mail: cigt@mail.ru ИНН 7706592697 КПП 770601001

Исх. №16/ЦИГТ от «29» декабря 2021 года

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Галина Рината Романовича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования Галина Р.Р. по теме: «Метод и алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе» были обсуждены на научно-техническом семинаре ЦИГТ, посвящённому вопросу проблем роботизации, вспомогательных ремонтных производств предприятий горно-добывающей отрасли. Актуальность данной тематики связанна с сокращением сроков простоя основного горного оборудования, что является важным технико-экономическим показателем основного производства. Особенностью ремонтно-механических производств горно-добывающих предприятий является широкая номенклатура производимых деталей, необходимость их оперативной доставки до объекта, а также реализацию сложных ремонтно-технологических регламентов, содержащих типовые и нетиповые операции.

По данным, приведенным в работе Галина Р.Р., была осуществлена модельная апробация представленных метода и алгоритмов. На основании результатов апробации была сделана экспертная оценка об эффективности использования метода и алгоритмов распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, предназначенной для выполнения работ по доставке деталей машин и ремонтно-технологического оборудования от ремонтно-механического производства до объекта, погрузочно-разгрузочных работ, а также выполнения отдельных типовых ремонтно-технологических операций. Ожидаемый эффект по повышению производительности на примере замены коронок зубьев экскаватора составил 8% ÷ 15%.

Метод и алгоритмы распределения работ в коллаборативной робототехнической системе, разработанные Галиным Р.Р., рекомендованы к включению в перспективные программы роботизации ремонтно-механических производств угледобывающих компаний.

Генеральный директор П.П. Ананьев

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022614038

Распределение работ в смешанной неоднородной команде в рамках коллаборативной робототехнической системы

Правообладатели: ***Исхаков Андрей Юнусович (RU), Мамченко Марк Владиславович (RU), Галин Ринат Романович (RU)***

Авторы: ***Исхаков Андрей Юнусович (RU), Мамченко Марк Владиславович (RU), Галин Ринат Романович (RU)***

Заявка № **2022613132**
Дата поступления **09 марта 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***16 марта 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов