

Р.Р. ГАЛИН, А.А. ШИРОКИЙ, Е.А. МАГИД, Р.В. МЕЩЕРЯКОВ,
М.В. МАМЧЕНКО

**ЭФФЕКТИВНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СМЕШАННОЙ
НЕОДНОРОДНОЙ КОМАНДЫ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В., Мамченко М.В. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе.

Аннотация. В статье представлены описание коллаборативного робота (кобота) как одного из подвидов интеллектуальной робототехники и его отличительные особенности по сравнению с другими видами роботов. Дано описание коллаборативной робототехнической системы как единой комплексной системы, в которой субъекты (акторы) различного типа – коботы и люди – выполняют действия в рамках коллаборации для достижения единой цели. Для коллаборативной робототехнической системы как единой комплексной системы представлены ее составные части, а также процессы и сущности, которые оказывают непосредственное влияние на эту систему. Представлены ключевые принципы коллаборации человека и робота (Human-Robot Collaboration). Коллаборативная робототехническая система проанализирована, с одной стороны, как многоагентная система, и, с другой стороны, как смешанная неоднородная команда, члены которой являются гетерогенными актерами. Актуальность работы заключается в недостаточном уровне исследованности вопроса формирования смешанных неоднородных команд из людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики этих двух типов участников и требований их безопасного взаимодействия. Целью работы является исследование вопросов формирования смешанных команд из числа элементов единой комплексной системы человек-кобот, распределения задач среди участников подобных команд с учетом необходимости минимизации затрат для ее участников и гетерогенности ее состава. В рамках исследования представлена постановка задачи формирования смешанной неоднородной команды из числа людей и коботов и распределения работ между членами команды, а также ее математическое описание. Рассматриваются частные случаи задачи, в том числе при различных функциях затрат у разных видов участников, в случае ограниченной активности членов команды, при наличии зависимости функций 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 команды.

Ключевые слова: коллаборативный робот, многоагентная система, смешанная неоднородная команда, взаимодействие человека и робота.

1. Введение. В ходе проектирования и разработки автоматизированных систем на производстве на основе использования робототехнических решений, повсеместная и полная замена роботами людей-операторов для выполнения производственных операций (реализация т. н. безлюдных производств), вне зависимости от специфики используемых технологических процессов и сложности выполняемых действий, на данном этапе оказалась невозможной. Работа на промыш-

ленных сборочных линиях по-прежнему требует труда большого количества людей, а вопрос о том, как автоматизировать ручной процесс сборки многокомпонентных деталей или обработки сложных изделий с различными свойствами и составом материалов, продолжает оставаться открытым [1]. Несмотря на это, автоматизация отдельных производственных мощностей и линий предприятий за счет внедрения робототехнических решений продолжает активно расти. Следует особо отметить, что спросом для этих целей пользуются именно интеллектуальные роботы, обладающие 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). Коллаборативные роботы предназначены для работы в едином рабочем пространстве с человеком без риска нанесения вреда последнему (т.н. коллаборативное взаимодействие [2–5]) и обладают рядом преимуществ по сравнению с промышленными, в пользу чего свидетельствует рост активности интеграции коботов в различных отраслях производства [6, 7].

Комплексность решаемых задач интеллектуальными коллаборативными роботами обуславливает повышенные требования к обеспечению безопасного процесса деятельности совместно с человеком-оператором в рамках единой комплексной системы, взаимодействующими и взаимосвязанными элементами которой являются человек и кобот [8]. В подобных системах коллаборативного робота возможно рассматривать как отдельную техническую систему, способную выполнять полезные действия; вторым элементом системы является человек-оператор, обладающий способностями самостоятельно принимать решения и выполнять целенаправленные и конкретные операции во взаимодействии с коботом для достижения общей цели системы.

Несмотря на актуальность направлений исследований в области коллаборативной робототехники, недостаточно проработанным остается вопрос формирования (подбора по составу) смешанных команд из числа людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики гетерогенных акторов и требований безопасности их совместной деятельности (подробнее в главах 3–5). В настоящей работе представлено исследование вопросов формирования смешанных неоднородных команд из числа участников КРТС и распределения задач в

команде с учетом необходимости минимизации затрат для ее участников и различных значений эффективности выполнения конкретными участниками определенных видов работ.

2. Робот как элемент коллаборативной робототехнической системы. Рабочее пространство для безопасного взаимодействия с коллаборативным роботом должно быть спроектировано с точки зрения эргономики рабочего места. Наличие технических объектов и дополнительного оборудования в рабочем пространстве не должно создавать угрозу безопасности человека. В рассматриваемой системе определены различные области рабочего пространства, которые представлены на рисунке 1. Данные области рабочего пространства можно описать следующим образом [9]:

- предельно допустимое рабочее пространство (*maximum workspace*) — пространство, которое определяется максимальным значением радиуса коллаборативного робота – зона досягаемости с учетом элементов захвата, установленных на фланце робота;

- пространство ограниченного доступа (*restricted workspace*) — зона рабочей области в рамках предельно допустимого рабочего пространства. Данная зона рабочей области обусловлена наличием элементов робототехнической системы – совместная рабочая ячейка или коллаборативное приложение. Это означает, что речь идет не только о роботе, но и о инструментах, кабелях, рабочего стола, т.е. все то, что входит в данную зону рабочей области [10]. Наличие этих элементов системы создает условия ограниченного доступа;

- операционное пространство (*operating workspace*) — рабочая область, в которой осуществляются операционные действия коллаборативным роботом;

- коллаборативное пространство (*collaborative workspace*) — рабочая зона совместных операция (одновременно/параллельно) коллаборативного робота и человека.

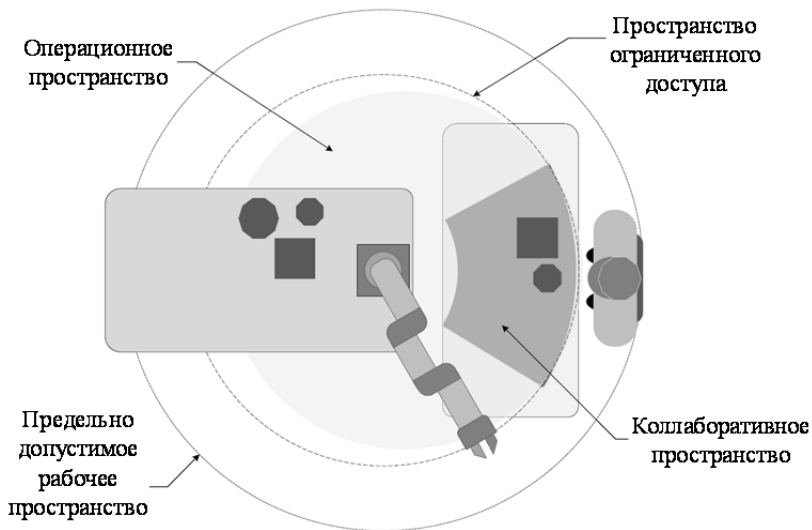


Рис. 1. Области рабочего пространства в робототехнической системе человек–робот

Авторы рассматривают представленную робототехническую систему с точки зрения ее комплексности. Для понимания комплексности необходимо учитывать следующие сущности и объекты, которые непосредственно оказывают влияние на саму систему (в целом) и/или ее подсистемы (в частности). К таким сущностям и объектам можно причислить:

- технологический процесс выполнения операций;
- технические объекты и подсистемы разного уровня иерархии;
- объекты, которые используются элементами системы в процессе деятельности (например, инструменты);
- среда, необходимая для функционирования системы.

Таким образом, рассмотрение вышеуказанной единой комплексной системы человек–робот как совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих ее элементов является неполным. Необходимо учитывать требуемые для ее функционирования ресурсы, взаимодействие элементов с окружающей средой, управляющие воздействия и последовательность выполнения команд. Иными словами, именно подобное (расширенное) толкование рассматриваемой единой системы человек–робот будет отвечать ее работоспособности и комплексности.

Представим систему взаимодействия человека и робота в качестве двух одноименных взаимодействующих подсистем. Тогда подсистема «Человек» будет включать в себя не только самого работника, но и блок обработки информации, поступающей от робота, о ходе выполнения задач, и блока управляющих воздействий, направляемых роботу как в явном (в виде передачи команд), так и в неявном виде (например, за счет подстраивания работы робота под действия человека). В свою очередь, подсистема «Робот» состоит из робота, органов управления, осуществляющих 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 выполнения работы. Упрощенная схема взаимодействия элементов в единой комплексной системе человек–робот представлена на рисунке 2.

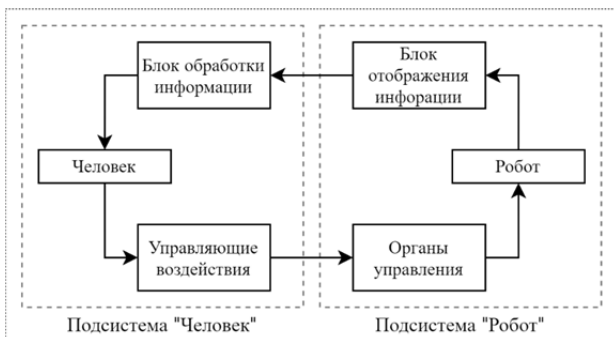


Рис. 2. Схематичное представление единой комплексной системы человек–робот

В представленной схеме подсистема «Робот» является элементом робототехнической системы [11, 12], а наличие подсистемы «Человек» в единой системе позволяет рассматривать ее в качестве эргатической робототехнической системы [13]. Кроме того, учитывая использование именно коботов в рамках настоящей работы, подобную комплексную систему можно назвать коллаборативной робототехнической системой (КРТС). В рамках данной работы именно это понятие будет использоваться в дальнейшем для описания единой комплексной системы человек–кобот.

В процесс проектирования КРТС в обязательном порядке должны учитываться следующие четыре ключевых принципа взаимодействия человека и робота (HRC – Human-Robot Collaboration) [14–16]:

- операции, выполняемые роботом, должны быть безопасны по отношению к другим агентам, 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, то необходимо вносить изменения в рабочий процесс робота, а не искать замену человеку;

- должны создаваться такие условия, в которых любой человек-оператор в области рабочего пространства мог бы максимально использовать возможности робота;

- при проектировании системы следует добиваться повышения производительности труда и снижения вероятности возникновения ошибок за счет эргономического дизайна и/или упрощения конструкции.

Таким образом, КРТС, которую можно рассматривать в качестве отдельной производственной единицы на предприятии, обладает уникальными свойствами, в первую очередь связанными с гетерогенностью двух типов входящих в нее акторов – людей и роботов. Эти разнородные члены команды могут использовать различные подходы к выполнению производственных операций: роботы действуют в основном на основании имеющейся программы, и их действия повторяются для одинаковых операций, в то время как люди могут использовать креативность и нестандартные подходы к выполнению задач. Второй значимой особенностью КРТ является необходимость соблюдения мер безопасности и вытекающие из этого особенности размещения рабочего пространства для людей и технические спецификации роботов (наличие силомоментных датчиков, контроль скорости движения и т.д.).

3. Анализ КРТС как многоагентной системы и смешанной неоднородной команды. Участники КРТС взаимодействуют в единой области рабочего пространства для выполнения единой глобальной целевой задачи. Такие задачи могут быть решены с применением технологий многоагентных систем. Исследование многоагентных систем с участием людей и роботов осуществлялось в работах [17–19]. В частности, в [17] рассматривались подходы к решению задачи управления человеком группой роботов. В [20] представлены централизованные и децентрализованные методы распределения задач между агентами на примере интеллектуальных электромеханических систем. В работе [21] рассматривается децентрализованная структура много-

агентной робототехнической системы с акцентом на сетевое взаимодействие между агентами.

Распределению задач в однородных группах роботов с предлагаемыми подходами и методами многоагентного управления посвящены работы [22–24]. Особенности формирования и распределения задач в однородных командах, состоящих из людей, исследовались в [25–27]. Однако недостаточно исследованным остается вопрос формирования смешанных команд из людей и коботов и распределения задач в них с учетом специфики этих двух типов участников и требований их безопасного взаимодействия.

Проблему формирования КРТС, в которых участвует множество коботов и людей, а также распределения и выполнения ее элементами задач, можно рассматривать в контексте так называемых многоагентных систем. Подобные системы представляют собой некоторое множество интеллектуальных агентов, взаимодействующих друг с другом, учитывая взаимное влияние друг на друга внешней среды и самих агентов [28, 29]. Ключевыми свойствами агентов являются целенаправленность и автономность принятия решений и действий, т.е. подобные агенты обладают чертой интеллектуальности (подробное описание понятия интеллектуального агента представлено в работах [5, 17, 30, 31]). Применение многоагентных робототехнических систем позволяет решать проблему распределения между агентами всего спектра задач и перераспределять (переназначать) их в зависимости от изменений среды функционирования, а также состояния и состава самой системы. В КРТС при взаимодействии интеллектуальных агентов необходимо учитывать такие аспекты, как общность цели, автономность агентов и согласованность действий агентов.

Аналогичными аспектами обладает команда при рассмотрении задач коллективного управления организационных систем [32]. Традиционно под командой понимают коллектив (объединение агентов, осуществляющих совместную деятельность и обладающих общими интересами), способный достигать цели автономно и согласованно, при минимальных управляющих воздействиях [33]. В рамках КРТС смешанная неоднородная команда состоит из людей и коботов, осуществляющих совместную согласованную деятельность.

На практике согласованность действий редко появляется сама по себе; достижение согласованности в действиях требует наличия управления. При этом команды, состоящие из людей, можно рассматривать как организационные системы, и для обеспечения требуемого поведения участников возможно применение обширного набора существующих способов управления (см., например, [33]). Команды, состо-

ящие только из коботов, можно рассматривать в качестве многоагентных систем [25, 34] или групп [35], способы и методы управления, которыми также хорошо исследованы [36–39].

Спецификой смешанных неоднородных команд является необходимость объединения в системе управления механизмов управления организационными и техническими системами. Одной из перспективных методологий, рассматривающих именно организационно-технические системы, является методология комплексной деятельности [40]. В то же время, последняя является по сути расширением теории управления организационными системами, и предлагаемые в её рамках модели и методы требуют адаптации к специфическим задачам для роботов (в частности, коллаборативным).

Согласно [26, 32, 41], жизненный цикл команды состоит из двух этапов — формирования и функционирования. По отношению к рассматриваемым КРТС этап формирования разделён на определение состава участников команды и её адаптацию к особенностям решаемой задачи. Этап функционирования рассматривается в рамках коллаборативного пространства, с учетом взаимодействия человека и кобота и требований безопасности коллаборации. Следует отметить, что проанализированные исследования сосредоточены в основном на изучении именно этапа функционирования КРТС [42–44]. Однако на практике часто требуется решать задачи, относящиеся к этапу формирования команды.

4. Формирование смешанной неоднородной команды из людей и коботов и распределение работ между ее участниками. Рассмотрим команду, членами которой являются множество людей $H = \{h_i\}_{i=1}^n$, где n – количество людей в команде и множество коллаборативных роботов $B = \{b_j\}_{j=1}^m$, где m – количество коботов. Предположим, что успешная деятельность команды требует осуществления множества различных видов работ $U = \{u_k\}_{k=1}^q$, где q – количество этих 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 для видов работ (производительность труда [33]), 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 ($r_{h_i}^k, r_{b_j}^k \in \mathbb{R}_{\geq 0}$).

Предположим, что требуемые к выполнению полный объем работ задан вектором $V = (V^1, \dots, V^q), V^k \geq 0, k \in [1, q]$. Теперь 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: $c_i(x_{h_i}, r_{h_i})$ и $c_j(x_{b_j}, r_{b_j})$, $x_{h_i} = (x_{h_i}^1, x_{h_i}^2, \dots, x_{h_i}^q)$, $x_{b_j} = (x_{b_j}^1, x_{b_j}^2, \dots, x_{b_j}^q)$ для людей и роботов соответственно. В общем случае функции затрат относятся к производственным функциям, однако для определения конкретного вида функции отдельно для людей и роботов определим суть самих затрат, которые понесут участники команды при выполнении определенного объема работ конкретного вида.

С одной стороны, за затраты можно считать денежные средства, требуемые на привлечение и удержание/задействование агента в команде. Так, для людей затратами будет являться выплачиваемая им заработная плата, 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 робота будут расти пропорционально количеству работ определенного типа или общего количества всех назначенных работ всех видов (в случае ненулевой эффективности для всех указываемых видов работ, без учета сценариев с его поломкой и оплаты стоимости ремонта).

С другой стороны, затраты в общем виде могут отражать и время, необходимое для выполнения работ. Аналогично первому случаю, в случае перенапряжения, отсутствия или недостатка полноценного отдыха человек будет терять эффективность с течением времени (в конечном счете – до нулевого значения). Робот же может функциони-

ровать круглосуточно, а время на выполнение определенной работы не зависит от продолжительности его непрерывного функционирования.

Таким образом, можно предположить, что в случае увеличения объема работ для человека его затраты будут увеличиваться нелинейно, а для робота – линейно, поэтому возьмем линейную функцию для определения затрат робота. 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 вид

$$c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q \left(\frac{(x_{h_i}^k)^2}{2r_{h_i}^k} \right). \text{ Следует отметить, что также существуют и}$$

другие производственные функции (функции затрат), например, обобщенная функция Кобба-Дугласа, функция с постоянной эластичностью замещения (функция Солоу), производственная функция Леонтьева и др. Таким образом, 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, а у робота в этих же условиях отдача будет пропорционально возрастать [41].

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 объема выполняемых работ (первый аргумент). При этом, чем выше эффективность (второй аргумент), тем затраты ниже. Невогнутость отражает тот факт, что затраты возрастают как минимум линейно (обычно, для роботов), а в случае выпуклой функции затрат — тем быстрее, чем больший объем работ назначен члену команды (эффект усталания).

Определим следующие условия:

- любой член команды может выполнить любой неотрицательный объем работ каждого вида;
- функции затрат аддитивны (т.е. не учитывается дополнительность затрат по различным видам работ [41]).

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

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) + \sum_{j=1}^m c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) \rightarrow \min_{\{x_{h_i}^k \geq 0, x_{b_j}^k \geq 0, k=1, \dots, q\}}, \\ \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k + \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k = V^k, k \in [1, q]. \end{cases} \quad (1)$$

Если функции затрат членов команды являются функциями

Кобба-Дугласа (т. е. $c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right)$, $c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) = \sum_{k=1}^q r_{b_j}^k \varphi\left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}\right)$, $i \in [1, n], j \in [1, m]$, $\varphi(\cdot)$ — возрастающая выпуклая

гладкая функция, $\varphi(0) = 0$, то решение задачи (1) будет соответствовать решению задачи оптимального распределения работ между членами однородной команды, представленному в [41]. В то же время, специфика смешанной команды, включающей два вида членов различной природы, требует рассмотрения постановок задач со следующими расширениями и ограничениями:

1. Разные виды функций затрат для разных видов членов команды — людей и роботов.
2. Ограниченная активность роботов в команде (в выполнении работ каждого вида обязательно должен участвовать хотя бы один человек*).
3. Зависимость затрат роботов на выполнение некоторого вида работ от количества людей, назначенных на выполнение того же вида работ.
4. Неаддитивность функций затрат у одного вида членов команды или у обоих сразу.

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

4.1. Постановка и решение задачи в случае различных функций затрат у разных видов участников. Пусть функции затрат членов команды — коботов и людей соответственно — имеют вид:

* данное условие соответствует принципам взаимодействия человека и коллаборативного робота в рамках КРТС.

$$c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) = \sum_{k=1}^q \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}, j \in [1, m]; \quad (2)$$

$$c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q r_{h_i}^k \varphi\left(\frac{x_{h_i}^k}{r_{h_i}^k}\right), i \in [1, n], \quad (3)$$

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 видов в количестве q распределяются между участниками команды составом, аналогичным п. 1 ($q \in \mathbb{N}, q < \infty, n = 1, m = 1$).

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

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 задачу 1 и решим её 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:

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

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

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

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 $c(x_h, r_h, x_b, r_b)$.

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:

$$c^*(x_h^*, r_h, x_b^*, r_b) = \underset{\substack{x_h \geq 0, x_b \geq 0, \\ x = x_h + x_b}}{\text{Arg min}}(c(x_h, r_h, x_b, r_b)).$$

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

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

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

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

$$c_c^V = c_c(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = c_c^{V-1}(x_h^{V-1}, r_h, x_b^{V-1}, r_b) + \\ + \min \left\{ \begin{array}{l} c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h) - c_h(x_h^{V-1}, r_h), \\ c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b) - c_b(x_b^{V-1}, r_b) \end{array} \right\}, \text{ либо}$$

$$c_t^V = c_t(x_h^V, r_h, x_b^V, r_b) = \min \left\{ \begin{array}{l} \max\{c_h(x_h^{V-1} + v_V, r_h), c_b(x_b^{V-1}, r_b)\}, \\ \max\{c_h(x_h^{V-1}, r_h), c_b(x_b^{V-1} + v_V, r_b)\} \end{array} \right\}.$$

Так как для выбранных функций затрат $c_h(0, r_h) = c_b(0, r_b) = 0$, 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. решает также и задачу 3.

Теперь рассмотрим задачу 2. Если функции затрат роботов 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 .

$$c_c^{V^k} = c_c(x_h^k, r_h^k, x_b^k, r_b^k) = c_h(x_h^k, r_h^k) + c_b(x_b^k, r_b^k), x_h^k + x_b^k = V^k.$$

Для этого необходимо вычислять значения x_h^k и x_b^k , что можно сделать по алгоритму решения задачи 1. Тогда минимальные затраты на выполнение всего объёма работ V будут равны $c_c^V = \sum_{k=1}^q c_c^{V^k}$. Задача 4 решается аналогично.

4.2. Постановка и решение задачи в случае ограниченной активности членов команды. Предположим, что функции затрат членов команды имеют вид (2) и (3) для роботов 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 (1) в непрерывном виде. Рассмотрим следующие частные случаи:

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

Рассмотрим случай 1. Пусть x_h — часть объёма работ, который мы должны распределить для выполнения человеком. Итоговое рас-

пределение всего объёма работ V между членами команды должно минимизировать затраты на его выполнение, а объём заранее неизвестен.

Добиться этого можно, минимизируя приращение затрат при приращении объёма работ. Поскольку функции затрат коботов $c_j(x, r_{b_j})$ 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 $V - x_h$.

Найдём теперь x_h . Заметим, что поскольку $c_i(x, r_h)$ — выпуклая функция, то $\forall j \in [1, m] \exists x_j^0 : \forall x > x_j^0 \quad c_i(x, r_h) > c_j(x, r_{b_j})$. В силу непрерывной дифференцируемости функции $c_i(x, r_h)$ если $\exists x_E > 0 : c_i(x, r_h) = c_j(x, r_{b_j})$, то $\exists x_h \in (0, x_E) : c'_i(x_h, r_h) = c'_j(x_h, r_{b_j}) = \frac{1}{r_{b_j}}$.

Это и будет искомая часть объёма работ. Следует отметить, что в случае $c_i(x, r_h) > c_j(x, r_{b_j}) \quad \forall x > 0$ оптимального решения не существует.

Предложенный алгоритм применим на случай произвольного ограниченного числа участников смешанной команды, т.е. решает также и задачу 3.

Рассмотрим случай 2. Алгоритм решения тот же, но теперь необходимо искать вектор $\{x_{h_1}, \dots, x_{h_n}\} : \forall i \in [1, n] \quad c'_i(x_{h_i}, r_{h_i}) \leq \frac{1}{r_{b_j}}$. Если

$$\sum_{i=1}^n x_{h_i} \leq V, \text{ то решение для каждого из членов команды – людей можно}$$

найти по алгоритму для случая 1. Если же $\sum_{i=1}^n x_{h_i} > V$, то распределение работ должно удовлетворять следующему условию:

$$c'_1(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_2(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_n(x_{h_n}, r_{h_n}) \leq c'_j(x_h, r_{b_j}) = \frac{1}{r_{b_j}}$$

Задача 4 решается аналогично.

4.3. Постановка и решение задачи в случае зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот вид работ 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 придётся использовать — таким образом, эффективность будет снижаться. Кроме того, в этом случае функция затрат для коботов будет также зависеть еще и от количества людей с ненулевой эффективностью выполнения работ, т.е. $c_{b_j} = f(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k)$.

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

$$c_{b_j}(x_{b_j}, r_{b_j}, N_k) = \sum_{k=1}^q (1+N_k) \frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k}, j \in [1, m]. \quad (4)$$

Здесь N_k — число людей, которым распределён ненулевой объём работ вида k . Функции затрат людей имеют вид (3). Как и ранее, все затраты считаем аддитивными по видам работ.

Будем решать задачу (1) 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 решения для единственного коллаборативного робота, так как их функции затрат линейны.

Рассмотрим случай, когда требуется распределить между участниками команды объёмы работ одного вида. Вначале заметим, что при $V \rightarrow +\infty$ нет никакого смысла включать в команду более одного человека. Действительно, при увеличении N_k увеличивается также и производная функции затрат (4) — следовательно, при достаточно большом 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 (см. также предыдущий параграф).

С другой стороны, при фиксированном объёме работ и достаточном количестве людей может получиться так, что:

$$\exists \{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\} : \sum_{i=1}^n x_{h_i} = V,$$

$$c'_{h_1}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_{h_n}(x_{h_n}, r_{h_n}) \leq c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}.$$

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

Рассмотрим теперь ситуацию, когда $V = const < +\infty$, а количество людей n имеет такое значение, что:

$$\forall \{x_{h_1}, x_{h_2}, \dots, x_{h_n}\} : \sum_{i=1}^n x_{h_i} = V,$$

$$c'_{h_1}(x_{h_1}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}, r_{h_2}) = \dots = c'_{h_n}(x_{h_n}, r_{h_n}) > c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}.$$

Вначале посчитаем издержки для смешанной команды из одного человека и одного робота. В общем случае, выберем условную норму людей таким образом, чтобы их эффективность не росла с увеличением номера, то есть $r_{h_1} \geq r_{h_2} \geq \dots \geq r_{h_n}$. Также будем считать, что $\forall i \in \{1, \dots, n\} \exists x^{(i)} > 0 : \forall 0 \leq x \leq x^{(i)} \quad c_{h_i}(x, r_{h_i}) \leq c_b(x, r_b, i)$.

Тогда $\exists x_{h_1}^{(1)} : c'_{h_1}(x_{h_1}^{(1)}, r_{h_1}) = c'_b(r_b, 1) = \frac{2}{r_b}$.

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

При добавлении в команду ещё одного человека возможны два варианта:

$$1) \exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)} : x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} = V, c'_{h_1}(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}) \leq c'_b(r_b, 2) = \frac{3}{r_b}.$$

$$2) \exists x_{h_1}^{(2)}, x_{h_2}^{(2)} : x_{h_1}^{(2)} + x_{h_2}^{(2)} < V, c'_{h_1}(x_{h_1}^{(2)}, r_{h_1}) = c'_{h_2}(x_{h_2}^{(2)}, r_{h_2}) = c'_b(r_b, 2) = \frac{3}{r_b}.$$

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

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

В общем случае о том, в каком отношении находятся $c^{(1)}$ и $c^{(2)}$, ничего сказать нельзя. Авторам не удалось найти точного решения этой задачи даже для случая $r_{h_1} = r_{h_2} = r_h$, то есть, когда все люди выполняют работу с одинаковой эффективностью. По всей видимости, для решения практических задач в такой постановке потребуется использовать некоторые эвристические подходы. Разработка таких алгоритмов и методов является темой для дальнейшего исследования.

5. Вычислительный эксперимент. В среде MATLAB было проведено моделирование оптимального распределения работ между участниками КРТС для решения системы уравнений, представленной в (1). Для целей моделирования были внесены следующие ограничения и допущения:

1. В команде присутствует $n \geq 1$ людей и $m \geq 1$ роботов.
2. Количество типов работ для людей и роботов в команде является одинаковым и равно $q > 1$. Любой робот и человек в команде способен выполнять все q видов работ, но с разной эффективностью, задаваемой матрицами эффективности $r_h = (r_{h_k i})_{q \times n}$, и $r_b = (r_{b_k j})_{q \times m}$ для людей и роботов соответственно.

3. Как было указано в главе 4, в качестве функций затрат людей были использованы квадратичные функции типа Кобба-Дугласа, суммируемые по всем q видам работ. Так, для i -го человека, выполняющего q видов работ с различными значениями эффективности

$$r_{h_i}^k \geq 0, k \in [1, q], \text{ данная функция примет вид: } c_i(x_{h_i}, r_{h_i}) = \sum_{k=1}^q \left(\frac{(x_{h_i}^k)^2}{2r_{h_i}^k} \right),$$

$i \in [1, n], r_{h_i}^k \geq 0$. В свою очередь, функция затрат для i -го робота, сумми-

руемая по всем q видам работ, полагаются линейными: $c_j(x_{b_j}, r_{b_j}) =$
 $= \sum_{k=1}^q \left(\frac{x_{b_j}^k}{r_{b_j}^k} \right), j \in [1, m], r_{b_j}^k \geq 0.$

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

5. Общее количество затрат людей и роботов соответственно для $-го$ вида работ равно общему объему для этого вида работ

$V^k : \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k + \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k = V^k, k \in [1, q].$ Общие объемы для любых видов работ

одинаковы, но значения объемов работ для людей $V_h^k = \sum_{i=1}^n x_{h_i}^k$ и

роботов $V_b^k = \sum_{j=1}^m x_{b_j}^k$ могут различаться. Общий объем работ для всех q

видов работ представляет собой матрицу $V = (V_{kl})_{q \times l}$, где l – количество типов участников ($l = 2$ для команды из роботов и людей).

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

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

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

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

4. Одинаковые фиксированные объемы работ для всех q видов работ для людей и роботов, любой участник команды может выполнять только одну работу, количество людей и роботов одинаковое,

значения матрицы эффективности для людей и роботов задаются случайным образом в диапазоне [0..1].

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

Вычисление значений, назначенных участникам команды объемов работ $x_{h_i}^k$ и $x_{b_j}^k$ осуществлялось в среде моделирования MATLAB с использованием функции `fmincon`. Значения по исходным характеристикам для команд представлены в таблице 1, вычисленные значения объемов работ участникам неоднородной смешанной команды – в таблице 2.

Таблица 1. Характеристики команд.

Сценарий	Значение переменных						
	n	m	q	V_h	V_b	r_h	r_b
№ 1	3	3	3	100 100 100	100 100 100	0,08 0,24 0,12 0,05 0,9 0,95 0,9 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	100 100 100	100 100 100	0,3 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	60 100 70	50 100 20	0,58 0,23 0,46 0,97 0,62 0,68 0,4 0,37 0,8 0,1 0,26 0,34	0,52 0,23 0,04 0,89 0,14 0,72
№ 4	3	3	3	100 100 100	100 100 100	0,56 0 0 0 0,7 0 0 0 0,82	0,93 0 0 0 0,58 0 0 0 0,88
№ 5	2	4	3	50 90 30	50 100 60	1 0 0 0,87 0 0	0 2 0 0 0 0 2,61 0 3 0 0 2,52

Таблица 2. Результаты моделирования распределения объема работ в неоднородной смешанной команде.

Сценарий	Значение переменных					
	x_h			x_b		
№ 1	0,01	0,14	0,04	0	0	199,81
	0,01	1,66	1,82	196,52	0	0
	1,04	0,17	0,02	198,77	0	0
№ 2	0,24	1,5	0,1	1,28	0	196,88
	0,5	0,78	0,01	1,11	197,59	0
	0,23	0,24	0,11	0,32	0	199,09
№ 3	0,64	0,11	0,4	1,78	107,07	0
	0,44	0,52	0,18	1,15	0	198,71
	0,88	0,01	0,1	0,16	0	88,86
№ 4	0,34	0	0	199,66	0	0
	0	0,83	0	0	199,17	0
	0	0	0,76	0	0	199,24
№ 5	0,49	0	0	0	99,51	0
	0	0,29	0	0	0	189,71
	0	0	0	90	0	0

5.1. Анализ полученных результатов и формирование состава КРТС. Согласно расчетам, представленным в таблице 2, во всех сценариях коботам назначался больший объем работ, чем людям. Это связано с отличиями в типах функций 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 разницы значений эффективности по конкретному виду работ.

Результаты моделирования по сценариям 4-5, где любой участник команды может выполнять только одну работу (т.е. некоторые 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 его 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 эффективно-

сти получил весь объем данной работы, хотя этот объем мог быть распределен между двумя роботами.

Особенностью полученных результатов моделирования является то, что вышеуказанные значения назначаемых объемов работ можно использовать не только на этапе первоначального распределения работ разных видов среди участников КРТС (в ходе первичной постановки задач на выполнение работ), но и, в первую очередь, осуществлять целенаправленный подбор состава команды для выполнения конкретных работ с учетом значений эффективности для каждого вида работ и всех агентов в команде. Кроме того, гибкость созданной модели позволяет перераспределять требуемый для выполнения объем работ среди участников при изменении состава команды (например, в случае выхода из строя робота или неспособности человека делать конкретный вид работ) и/или значений эффективности для агентов в составе КРТС, в том числе с учетом уже сделанного объема работ конкретных видов.

6. Заключение. Актуальность настоящей работы заключается в недостаточной исследованности вопросов формирования смешанных неоднородных команд, состоящих из людей и роботов (т.е. гетерогенных групп из участников различных типов) и распределения задач в них с учетом специфики разнородности членов команды, а также обязательных требований безопасного взаимодействия участников, присутствующих в КРТС. Рассматриваются частные случаи задачи, в том числе при различных функциях затрат у разных видов 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.

В ходе моделирования людям в КРТС назначался сравнительно малый объем работы, в то время как роботы выполняли ее основную часть. Это связано как различиями в используемых функциях затрат, так и с отсутствием в модели минимального значения объема работ, который может быть назначен участнику с ненулевым значением эффективности. Кроме того, актуальной является задача более равномерного распределения объемов работ среди участников одного типа.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости введения в модель дополнительных условий и доработок. В частности, в результате моделирования определенный объем работы не обязательно должен назначаться всем участникам. Вместо этого планируется программно реализовать процедуру выбора определенного состава

участника из числа доступных (в том числе на основании более высоких значений эффективности выполнения конкретных видов работ) с обязательным соблюдением требования наличия в составе исполнителей для каждого вида работ не менее одного кобота и не менее одного человека (для сохранения самой сути КРТС как комплексной системы взаимодействия людей и роботов). Также планируется добавить временную составляющую затрат на выполнение работ участниками команды и реализовать изменение величины эффективности участников КРТС во времени, добавить возможность введения простоев в работе по конкретным участникам и моделировать отказы коботов и сопутствующие им снижение эффективности, связанное с затратами на проведение ремонта (учет фактора надежности робототехнических систем), а также предусмотреть возможность распределения объемов работ в случае зависимости функции затрат участников одного типа от числа назначенных на этот же вид работ агентов другого типа. Кроме того, требуется внедрение в модель функции дохода агентов, т.е. пользы (награды), получаемой агентами при выполнении работ, в том числе в условиях нарастания получаемой агентами выгоды с увеличением объема выполненных работ.

Введение соответствующих дополнений и условий в модель и проведение расчетов будет являться предметом дальнейших исследований по тематике распределения задач в неоднородных смешанных командах в КРТС.

Литература

1. Anandan T. Safety and control in collaborative robotics. Published on: Aug. 2013. vol. 6. pp. 1-4.
2. Ермишин К.В., Ющенко А.С. Коллаборативные мобильные роботы – новый этап развития сервисной робототехники / Ермишин К.В., Ющенко А.С. // Робототехника и техническая кибернетика. №3 (12). Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2016. С. 3-9.
3. Galin R., Meshcheryakov R. (2021) Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies,. Springer, Singapore. vol. 187.
4. Galin R., Meshcheryakov R., Kamesheva S. (2020) Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 12336.
5. Robot or cobot: The five key differences. Hannover Messe, 18 October 2016. URL: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Дата обращения 20.08.2021).
6. Лопота А.В. Программы развития робототехники / Лопота А.В., Спасский Б.А // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 9. № 1. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК. 2021. С. 5-16.

7. Ермолов И.Л. Стратегические вопросы развития российской робототехники // *Инновации*. 2020. №. 2. С. 43-46.
8. Mihelj M. et al. (2019) Collaborative Robots. In: *Robotics*. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
9. Саламатов Ю.П. Система законов развития техники (Основы теории развития Технических систем). Institute of Innovative Design. Красноярск. 1996.
10. ГОСТ Р ИСО 8373-2014. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения (2014) // Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Москва: Стандартинформ.
11. Юревич Е.П. Функциональные схемы роботов трех поколений. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1974. № 6.
12. Ющенко А.С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т. 18. №. 12. С. 812-819.
13. Franklin C.S. et al. Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace. In: *Journal of Safety Research*. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands (2020). vol. 73. pp. 1-8.
14. Konz S. *Work design: industrial ergonomics*. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons. Inc. 1990.
15. Galin R., Meshcheryakov R. (2020) Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) *Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms*. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. vol 272.
16. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. *Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages* (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994). Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag. 1995. pp. 1-22.
17. Wooldridge M., Jennings N. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. The Knowledge Engineering Review. 1995. vol. 10. № 2. pp. 115-152.
18. Тимофеев А.В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // *Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий*. СПб.: СПИИРАН. 1999. С. 71-81.
19. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. (2018) Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics*. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 11097.
20. Гайдук А.Р., Каляев И.А., Капустян С.Г. Управление коллективом интеллектуальных объектов на основе стайных принципов // *Вестник ЮНЦ РАН*. Т. 1. (2). 2005. С. 20-27.
21. Beer M. *Organization Change and Development: A System View*. London: Scott-Glenview: Foresman & Co. 1980.
22. Новиков Д.А. *Теория управления организационными системами*. 3-е изд. М.: Издательство физико-математической литературы. 2012. 604 с.
23. Тарасов В.Б. *От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика*. М.: Эдиториал УРСС. 2002.
24. Kotenko I., Ulanov A. Agent-based simulation of DDOS attacks and defense mechanisms. *Journal of Computing*. 2005. vol. 4. № 2.
25. Ren W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control. Brigham: Brigham University. 2004.
26. Hilmi I., Sariff N. *A Survey and Analysis of Cooperative Multi-Agent Robot Systems: Challenges and Directions*. Applications of Mobile Robots. 2019.

27. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. Монография. 2009.
28. Darintsev O., Yudinsev B., Alekseev A., Bogdanov D., Migranov A. Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control, *Procedia Computer Science*. 2019. vol. 150. pp. 687-694.
29. Lavendelis E. et al. Multi-agent robotic system architecture for effective task allocation and management. *Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing & Automatic*. 2012. pp. 22-24.
30. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
31. Белов М.В., Новиков Д.А. Методология комплексной деятельности. М.: Ленанд, 2018. 320 с.
32. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. М.: Издательство физико-математической литературы. 2008. 184 с.
33. Бронштейн М. Управление командами для «чайников». М.: Вильямс. 2004.
34. Ющенко А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2019. Т. 7. № 2. С. 85-93.
35. Malik A., Bilberg A. (2019), Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot*. vol. 46. №. 4, pp. 471-480.
36. Wang W., Li R., Diekel Z. et al. Robot action planning by online optimization in human-robot collaborative tasks. *Int J Intell Robot Appl* 2. 2018. pp. 161–179.
37. Галин Р.Р., Серебрянный В.В., Тевяшов Г.К., Широкий А.А. Взаимодействие человека и робота в коллаборативных робототехнических системах. *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. № 24(4). С.180-199.
38. Shi P., Yan B. A Survey on Intelligent Control for Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Jan. 2021. vol. 51. № 1. pp. 161-175.
39. Nazarova A., Zhai M. (2019) Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems. In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. vol. 174.
40. Jiménez A., García-Díaz V., Bolaños S. A Decentralized Framework for Multi-Agent Robotic Systems. *Sensors*. 2018. №18. P. 417.
41. Иванов Д.Я. Распределение ролей в коалициях роботов при ограниченных коммуникациях на основе роевого взаимодействия // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2019. №. 78.
42. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Информатика и автоматизация*. 2018. Т. 5. №. 60. С. 39-63.
43. Лохин В.М., Манько С.В., Александрова Р.И., Диане С.А., Панин А.С. Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2015. 16(8). С. 545-555.
44. Губко М.В., Новиков Д.А. Теория игр в управлении организационными системами. М.: Синтер. 2002.

Галин Ринат Романович — научный сотрудник, лаборатория киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: коллаборативная робототехника, технологии многоагентных систем, системный анализ, моделирование робототехнических систем. Число научных публикаций — 19. rinat.r.galin@yandex.ru; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +79957972772.

Широкий Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятностей, применение математического моделирования в технических системах. Число научных публикаций — 28. shiroky@ipu.ru; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

Магид Евгений Аркадьевич — заведующий лабораторией интеллектуальных робототехнических систем, Казанский федеральный университет. Область научных интересов: поисково-спасательная робототехника, мобильная робототехника, планирование пути, роботизированные команды, взаимодействие человека и робота. Число научных публикаций — 200. dr.e.magid@ieee.org; Кремлевская, 35, 420008, Казань, Россия; р.т.: +78432213433.

Мещеряков Роман Валерьевич — заведующий лабораторией киберфизических систем, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: теория управления, методы и системы защиты информации, применение методов математического моделирования технических систем, системный анализ, моделирование формирования эмпирического знания. Число научных публикаций — 150. mrv@ieee.org; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

Мамченко Марк Владиславович — научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Область научных интересов: навигационные системы, групповое управление, управление беспилотными авиационными системами. Число научных публикаций — 28. markmamcha@gmail.com; Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия; р.т.: +74951981720.

Поддержка исследований. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00331). Работа третьего автора выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

R. GALIN, A. SHIROKY, E. MAGID, R. MESHCHERYAKOV, M. МАМЧЕНКО
**EFFECTIVE FUNCTIONING OF A MIXED HETEROGENEOUS
TEAM IN A COLLABORATIVE ROBOTIC SYSTEM**

Galin R., Shiroky A., Magid E., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Effective Functioning of a Mixed Heterogeneous Team in a Collaborative Robotic System.

Abstract. The study describes a collaborative robot (cobot) as one of the types of intelligent robotics and its distinctive features compared to other types of robots. The paper presents a collaborative robotic system as a single complex system in which actors of different types – cobots and human workers – perform collaborative actions to achieve a common goal. Elements of a collaborative robotic system, as well as processes and entities that directly influence it are represented. The key principles of Human-Robot Collaboration are described. A collaborative robotic system is analyzed both as a multi-agent system and as a mixed team, whose members are heterogeneous actors. The relevance of the work lies in a weak level of research on issues of formation of mixed teams of people and cobots and distribution of tasks in such teams, taking into account features of these two types of participants and requirements of their safe collaboration. This work focused on a formation of mixed teams of elements of a single complex human-cobot system, the distribution of tasks among the members of such teams, taking into account the need to minimize costs for its participants and the heterogeneity of the team. As part of the study, the problem of forming a mixed heterogeneous team of people and cobots, and distribution of work among its members, as well as the corresponding mathematical description are presented. Specific cases of the problem, including different cost functions of different types of participants, a limited activity of the team's members, the dependence of the cost function of the participants of one type on the number of participants of another type, as well as an arbitrary number of works assigned to the team's members are considered.

Keywords: collaborative robot, multi-agent system, mixed heterogeneous team, human-robot interaction.

Galin Rinat — Researcher, Laboratory of cyberphysical systems, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: collaborative robotics, technologies of multi-agent systems, system analysis, modeling of robotic systems. The number of publications — 19. rinat.r.galin@yandex.ru; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +79957972772.

Shiroky Alexander — Ph.D., Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: mathematical statistics, probability theory, application of mathematical modeling in technical systems. The number of publications — 28. shiroky@ipu.ru; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

Magid Evgeni — Head of laboratory of intelligent robotic systems, Kazan Federal University. Research interests: search and rescue robotics, mobile robotics, path planning, group interaction of robots, human-robot interaction. The number of publications — 200. DR.E.MAGID@ieec.org; 35, Kremlevskaya, 420008, Kazan, Russia; office phone: +78432213433.

Meshcheryakov Roman — Head of laboratory of cyberphysical systems, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: control theory, methods and systems of information protection, application of methods of

mathematical modeling of technical systems, system analysis, modeling of empirical knowledge formation. The number of publications — 150. MRV@iecc.org; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

Mamchenko Mark — Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Research interests: navigation systems, swarm behavior and management, control of unmanned aerial systems. The number of publications — 28. MARKMAMCHA@gmail.com; 65, Profsoyuznaya, 117997, Moscow, Russia; office phone: +74951981720.

Acknowledgements. The reported study was partially funded by RFBR according to the research project No. 19-08-00331. The third author acknowledges the support of the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program.

References

1. Anandan T. Safety and control in collaborative robotics. Published on: Aug. 2013. vol. 6. pp. 1-4.
2. Ermishin K.V., Yushenko A.S. [Collaborative mobile robots – a new stage of development of service robotics]. Robototekhnika i tehničeskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. Saint-Petersburg: CNII RTK. 2016. vol. 3. № 12. pp. 3-9. (In Russ.).
3. Galin R., Meshcheryakov R. (2021) Collaborative Robots: Development of Robotic Perception System, Safety Issues, and Integration of AI to Imitate Human Behavior. In: Ronzhin A., Shishlakov V. (eds) Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings". Smart Innovation, Systems and Technologies, Springer, Singapore. vol. 187.
4. Galin R., Meshcheryakov R., Kamesheva S. (2020) Distributing Tasks in Multi-agent Robotic System for Human-Robot Interaction Applications. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 12336.
5. Robot or cobot: The five key differences. Available at: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>. (Accessed 20.08.2021).
6. Lopota A.V. [Programs of development of robotics] Robototekhnika i tehničeskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. Saint-Petersburg: CNII RTK. 2021. vol. 9. № 1. pp. 5-16. (In Russ.).
7. Ermolov I.L. [Strategic issues of the development of Russian robotics] Innovatsii [Innovations]. 2020. vol. 2. pp. 43-46. (In Russ.).
8. Mihelj M. et al. (2019) Collaborative Robots. In: Robotics. Springer, Cham. DOI:10.1007/978-3-319-72911-4_12.
9. Salamatov Yu.P. Sistema zakonov razvitiya tehniki [System of laws of technological development]. Krasnoyarsk: Institute of Innovative Design. 1996. P. 174 (In Russ.).
10. GOST R ISO 8373-2014. [Robots and robotic devices. Terms and definitions]. M.: Gosstandart Rossii. 2014. (In Russ.).
11. Yurevich E.P. [Functional schemes of three generations of robots]. Tehničeskaya kibernetika [Technical cybernetics]. 1974. vol. 6. pp. 51-55. (In Russ.).
12. Yushenko A.S. [Collaborative robotics: current state and new challenges]. Mehatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, management]. 2017. vol. 18. № 12. pp. 812-819. (In Russ.).
13. Franklin C. et al. Collaborative robotics: New era of human-robot cooperation in the workplace. In: Journal of Safety Research. Elsevier Ltd., Amsterdam, Netherlands. 2020. vol. 73. pp. 1-8.

14. Konz S. Work design: industrial ergonomics. Third Edition. Scottsdale, Arizona: Publishing Horizons. Inc. 1990.
15. Galin R., Meshcheryakov R. (2020) Human-Robot Interaction Efficiency and Human-Robot Collaboration. In: Kravets A. (eds) Robotics: Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms. Studies in Systems, Decision and Control, Springer, Cham. vol 272.
16. Wooldridge M., Jennings N. Agent Theories, Architectures and Languages: a Survey. Intelligent Agents: ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994. Ed. by M.Wooldridge, N.Jennings. Berlin: Springer Verlag. 1995. pp. 1-22.
17. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice. The Knowledge Engineering Review. 1995. Vol.10. №2. pp. 115-152.
18. Timofeev A.V. [Multi-agent and intelligent management of complex robotic systems]. Teoreticheskie osnovy i prikladnye zadachi intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij [Theory and Applications of Intelligent Information Technologies] Saint-Petersburg: SRIIRAN. 1999. pp. 71-81. (In Russ.).
19. Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A. (2018) Multi-agent Robotic Systems in Collaborative Robotics. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) Interactive Collaborative Robotics. ICR 2018. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. vol. 11097.
20. Gaiyduk A.R., Kalyaev I.A., Kapustyan S.G. [Management of a group of intelligent objects based on swarm principles]. Vestnik YUNC RAN [Bulletin of the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences]. 2005. vol. 1. № 2. pp. 20-27. (In Russ.).
21. Beer M. Organization Change and Development: A System View. London: Scott-Glenview: Foresman & Co. 1980.
22. Novikov D.A. Teoriya upravleniya organizacionnymi sistemami [Organizational systems management theory]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. 2012. P. 604. (In Russ.).
23. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnyh sistem k intellektual'nym organizაციyam: filosofiya, psihologiya, informatika [From multi-agent systems to intelligent organizations: philosophy, psychology, computer science]. Moscow: Editorial URSS. 2002. P. 352. (In Russ.).
24. Kotenko I., Ulanov A. Agent-based simulation of DDOS attacks and defense mechanisms. Journal of Computing. 2005. vol. 4. № 2.
25. Ren W. Consensus seeking, formation keeping and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control. Brigham: Brigham University. 2004.
26. Hilmi I., Sariff N. A Survey and Analysis of Cooperative Multi-Agent Robot Systems: Challenges and Directions. Applications of Mobile Robots. 2019.
27. Kalyaev I.A., Gaiyduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov [Models and algorithms for collective management in robotic groups]. Moscow: FIZMATLIT. 2009. P. 280. (In Russ.).
28. Darintsev O., Yudinsev B., Alekseev A., Bogdanov D., Migranov A. Methods of a Heterogeneous Multi-agent Robotic System Group Control, Procedia Computer Science. vol. 150. 2019. pp. 687-694.
29. Lavendelis E. et al. Multi-agent robotic system architecture for effective task allocation and management. Recent Researches in Communications, Electronics, Signal Processing & Automatic. 2012. pp. 22-24.
30. ISO/TC 299 Robotics – “ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices – Collaborative robots”.
31. Belov M.V., Novikov D.A. Metodologiya kompleksnoj deyatel'nosti [Methodology of complex activity]. Moscow: Lenand. 2018. P. 320. (In Russ.).

32. Novikov D.A. Matematicheskie modeli formirovaniya i funkcionirovaniya komand [Mathematical models of formation and operation of teams]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury. 2008. P. 184. (In Russ.).
33. Bronshtein M. Upravlenie komandami dlya «chajnikov» [Teams management for dummies]. Moscow: Vilyams. 2004. P. 256. (In Russ.).
34. Yushenko A.S. [Ergonomic Problems of Collaborative Robotics]. Robototekhnika i tehniicheskaya kibernetika [Robotics and technical cybernetics]. 2019. vol. 7. № 2. pp. 85-93. (In Russ.).
35. Malik A., Bilberg A. (2019), Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot*. vol. 46. №. 4, pp. 471-480.
36. Wang W., Li R., Diekel Z. et al. Robot action planning by online optimization in human-robot collaborative tasks. *Int J Intell Robot Appl* 2. 2018. pp. 161–179.
37. Galin R.R., Serebrennii V.V., Tevyashov G.K., Shirokiy A.A. [Human-robot interaction in collaborative robotic systems]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Southwest State University]. 2020. vol. 24. № 4. pp.180-199. (In Russ.).
38. Shi P., Yan B. A Survey on Intelligent Control for Multiagent Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. Jan. 2021. vol. 51. № 1. pp. 161-175.
39. Nazarova A., Zhai M. (2019) Distributed Solution of Problems in Multi Agent Robotic Systems. In: Gorodetskiy A., Tarasova I. (eds) *Smart Electromechanical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. vol 174.
40. Jiménez A., García-Díaz V., Bolaños S. A Decentralized Framework for Multi-Agent Robotic Systems. *Sensors*. 2018. №18. P. 417.
41. Ivanov D.Ya. [Distribution of roles in robot coalitions with limited swarm-based communication]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Large-Scale Systems Control: Proceedings]. 2019. vol. 78. pp. 23-45. (In Russ.).
42. Pshihopov V.H., Medvedev M.Yu. [Group Management of Mobile Robot Movement in an Uncertain Environment using Unstable Modes]. *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Sciences and Automation]. 2018. vol. 5. № 60. pp. 39-63. (In Russ.).
43. Lohin V.M., Man'ko S.V., Aleksandrova R.I., Diane S.A., Panin A.S. [Mechanisms of intelligent feedback, knowledge processing and self-learning in autonomous robot management systems and multi-agent robotic groups]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, management]. 2015. vol. 16(8). pp. 545-555. (In Russ.).
44. Gubko M.V., Novikov D.A. *Teoriya igr v upravlenii organizatsionnymi sistemami* [Game Theory in the Management of Organizational Systems]. Moscow: Sinteg. 2002. P. 138. (In Russ.).