

**В. В. Серебрянный**, канд. техн. наук,  
зав. кафедрой "Робототехнические системы и мехатроника", vsereb@bmstu.ru,  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

## Коллаборативные мультиагентные системы — альтернатива полной автоматизации производства

*Предложен подход, отвечающий современным экономическим трендам и являющийся альтернативой полной автоматизации процессов, основанный на использовании коллаборативных мультиагентных систем (КМАС). В данной концепции люди и роботы рассматриваются как агенты в едином сенсорно-информационном поле, являющиеся исполнителями поставленных задач в рамках достижения целей функционирования коллаборативной мультиагентной системы.*

*Актуальность КМАС обусловлена тем, что возможности промышленного использования полностью автоматизированных многокомпонентных систем ограничены финансовой и инфраструктурной неготовностью различных производств к переходу на полностью безлюдные технологии. Предлагаемый подход сочетает самые последние, но остающиеся вполне окупаемыми достижения техники наряду с высококвалифицированным трудом человека. Использование КМАС будет экономически оправдано при изготовлении продукции малыми сериями, в условиях быстрой сменяемости продуктовых линеек, а также наличия дефицита персонала. В статье показано, что такой подход может позволить существенно снизить затраты на автоматизацию, обеспечив при этом выполнение заданных показателей производства.*

*Данный подход позволяет по-новому взглянуть на человека, рассматривая его и робота как равноценных партнеров внутри коллаборативной системы в рамках выполнения поставленных задач. В работе сформулированы и представлены основные понятия и отличительные характеристики КМАС, даны обоснования их применения.*

*Создание нового класса КМАС требует решения ряда проблем, связанных со взаимодействием человека и робота. Рассмотрены вопросы, связанные с работой человека внутри коллаборативной системы, с рациональным разделением функций человека и автоматизированной производственной системы в соответствии с необходимым уровнем коллаборации. Включение человека с его психоэмоциональными и физическими особенностями как равноценного агента КМАС обуславливает трудности формализации КМАС, связанные с необходимостью учета этих особенностей, создания сенсорно-информационной системы. В работе рассмотрены возможные способы формализации КМАС и подходы к управлению.*

**Ключевые слова:** автоматизация производств, коллаборативная робототехника, мультиагентное управление, сенсорно-информационная сеть

### Введение

Повышение производительности производства в различные периоды истории человечества происходило за счет удельного роста ручного труда, вкладываемого в создание производимого продукта. При росте спроса на некоторый продукт возникала необходимость его массового тиражирования. Несовершенство технологии производства при этом приводило к определенным издержкам. Примером может служить перемещение рабочих при изготовлении какого-либо технического устройства и ожидания очереди для доступа к нему на конечном этапе производства для проведения своих операций. Радикальным средством для устранения подобного неэффективного процесса явилось введение конвейерной линии. Удельная производительность труда резко возросла

за счет ликвидации временных потерь на дополнительные перемещения и ожидания рабочих. При этом, если раньше продукт создавался одним мастером или очень ограниченным кругом участников, являющихся носителями всех знаний и умений по созданию этого продукта, то затем процесс создания изделия распался на отдельные технологические операции, следующие друг за другом. Значимость труда отдельного исполнителя резко упала. Человек теперь выполнял в ритме работы конвейера простые, монотонные операции. По существу, он превратился в придаток автоматизированной системы. Возможности человека уже не находили применения, а его труд, монотонный и малоквалифицированный, приводил к быстрой потере здоровья и трудоспособности, отрицательно влиял на психику рабочего. Дальнейшее совершенствование технологии производства, связанное

с декомпозицией технологических процессов на более простые составляющие с представлением всех сложных процессов в виде взаимосвязанных конечных операций, привело, в свою очередь, к автоматизации всего технологического процесса.

Развитие автоматизации полностью соответствует основному принципу диалектики: "теза — антитеза — синтез". Действительно, тезой можно считать ручной труд, который на заводах Форда в начале 20-го века был дополнен конвейером. Антитезой стала глобальная автоматизация, ставящая целью полное вытеснение человека из процесса производства. К концу 20-го века в Европе появляются полностью роботизированные цеха и целые предприятия, в том числе, в автомобильном производстве. По существу, современная техника позволяет решить любую задачу автоматизации с использованием роботов, новых технологий и способов обработки информации [1]. Иногда этот процесс называют цифровизацией производства, имея в виду использование компьютерных устройств и современных средств передачи информации. Однако здесь уже возникают ограничения экономического характера. Новые технологии удорожают производство и, начиная с некоторого уровня, становятся экономически не выгодными. Само собой, эта "граница автоматизации" все время меняется с развитием техники и с изменением потребностей общества. Но она объективно существует [2].

При этом необходимо помнить, что решения по автоматизации всегда сопряжены со значительными финансовыми затратами, связанными с проектированием, изготовлением и внедрением средств автоматизации. В ряде случаев подобные инвестиции, направленные на перевод производства на более высокий уровень, оправданы. В других же случаях, например, для малых предприятий или при ограниченном размере партии выпускаемой продукции, они окупаться не будут. При этом требования рынка по качеству продукции, скорости ее выхода в продажу, повторяемости изделий диктуют условия непрерывного развития производственных систем.

Возвращаясь к диалектике развития производства, можно предположить, что синтезом послужат коллаборативные мультиагентные системы (КМАС), в которых применяются самые последние, но остающиеся вполне окупаемыми, достижения техники наряду с высококвалифицированным трудом человека. Подход на основе КМАС является новым подходом

к автоматизации производств, отвечающим современным экономическим тенденциям.

В данной статье сформулированы и представлены основные понятия и отличительные характеристики КМАС, даны обоснования их применения с учетом отсутствия в некоторых случаях альтернативных вариантов построения производственных систем. Рассмотрены вопросы, связанные с работой человека внутри коллаборативной системы, приведены возможные способы формализации КМАС и подходы к управлению.

### **Определение и основные характеристики КМАС**

В последнее время в робототехнике возникло новое бурно развивающееся направление — коллаборативная робототехника (КР) [3, 16]. Первоначально под коллаборативной робототехнической системой (КРТС) понимали производственные системы, в которых люди и роботы работают в одном рабочем пространстве. Однако в дальнейшем область применения КРТС в промышленности расширилась. К КРТС можно отнести и автоматические транспортные средства (робокары), которые также функционируют в одном рабочем пространстве с людьми. Сюда же относятся различные автоматизированные средства поддержки работы человека, в том числе, манипуляционные средства загрузки технологического оборудования, роботизированные системы технической диагностики, различные манипуляторы-ассистенты рабочих.

КМАС определяют более широкий класс производственных систем, чем КРТС. Введем определение КМАС.

*Определение.* КМАС — это производственные компьютеризированные и роботизированные системы, образованные несколькими взаимодействующими агентами, в которых люди и роботы функционируют в рамках одного технологического процесса, выполняя в нем одновременно каждый свои собственные функции для решения общих задач.

Заметим, что робот и человек являются равноценными агентами КМАС. Действительно, оператор роботизированной гибкой производственной системы (ГПС), взаимодействуя с вычислительными средствами, выполняя задачи контроля и организации всего производственного цикла, включающего и манипуляционные роботы, и традиционные ме-

ханообработывающие ГПС, и внутрицеховой транспорт, также является частью производственной коллаборативной системы, но более высокого уровня по сравнению с оператором КР, где человек, являясь субъектом системы, выполняет технологические операции в зоне работы робота и одновременно с ним.

Выделим основные требования к КМАС:

1) возможность выполнения этой системой части функций, например, оперативного управления системой, постановки новых задач и т.п., ранее выполнявшихся человеком, что, в свою очередь, предполагает использование элементов искусственного интеллекта при решении задач управления и обработки информации;

2) доступность работы с ней человека, учет его объективных психофизиологических возможностей;

3) безопасность работы с КМАС, как физическая и психологическая по отношению к человеку, так и информационная по отношению к системе в целом.

Еще раз подчеркнем, что возможности промышленного использования полностью автоматизированных систем, состоящих из многокомпонентных робототехнических систем или групп роботов в рамках программ модернизации экономики РФ ограничена финансовой и инфраструктурной неготовностью производств к переходу на полностью безлюдные технологии и отсутствием отечественной технологической базы для изготовления прецизионных элементов конструкции робототехнических систем.

Заметим, что этот вывод справедлив не только для промышленного производства, но, возможно, в большей мере и для решения специальных задач (при одновременном и "равноправном" участии людей и роботов в операциях силовых ведомств, МЧС), задач сельского хозяйства, горнодобывающей промышленности, роботизированного транспорта и т.п.

Конечно, применительно к промышленному производству это положение не является абсолютным. Если технологический процесс полностью декомпозируется на простые операции, и при этом не предъявляются высокие требования к сложности и уникальности технических систем, предназначенных для реализации этих процессов, а все этапы производства автоматизируемы с помощью апробированных и оптимизированных решений, то участков, требующих вмешательства человека, может не быть вообще, и полная автоматизация вполне оправданна. Например, это воз-

можно при производстве и монтаже печатных плат или сварке кузовов легкового автомобиля.

Однако при изготовлении продукции малыми или единичными сериями и необходимости в быстрой сменяемости продуктовых линеек коллаборативный подход будет экономически оправдан. Кроме того, комбинирование вышеуказанных факторов с устойчивым дефицитом рабочих кадров, а также ухудшением ситуации с высококвалифицированными специалистами в связи с тяжелой демографической ситуацией делают КМАС одним из лучших технологических решений.

### **Место человека в коллаборативной мультиагентной системе**

Одна из основных задач, возникающих при разработке промышленных КМАС, состоит в рациональном разделении функций человека и автоматизированной производственной системы.

В общем случае участие человека в производственном процессе оправданно при выполнении отдельных сложных операций, допускающих определенную вариативность действий и требующих осведомленности о состоянии других вовлеченных в выполнение операции процессов, например, при выполнении заклепочных операций при монтаже фюзеляжа летательных аппаратов на среднесерийном производстве, так как для подобного производства системы автоматизированной клепки не окупаются из-за высокой стоимости при малой серийности производства [4]. Примеры коллаборативных производств уже известны в электронной промышленности, где относительно дешевые роботы с достаточной точностью повторяемости операций выполняют простейшие подготовительные операции и облегчают человеку выполнение особо ответственных операций [5, 17]. При выполнении ответственных операций роботы могут ассистировать рабочему после обучения в режиме податливости приводов в звеньях манипулятора. Манипуляционные роботы подают, удерживают и ориентируют собираемые детали, выполняют технологические операции. Здесь примером могут служить операции нанесения герметиков на криволинейные поверхности.

На упомянутых производствах коллаборативные роботы функционируют в том же рабочем пространстве, что и человек. Это требует дополнительных решений в области обеспече-

ния безопасности человека в рабочем пространстве робота. Необходимо обеспечить безопасность и остального технологического оборудования в этом пространстве. Задача обеспечения отсутствия столкновения с роботом в настоящее время чаще всего решается путем организации силомоментного оцувствления приводов манипулятора, что позволяет автоматически остановить робот при неожиданном возрастании нагрузки, а также за счет тактильного оцувствления элементов конструкции роботов. Внедрение подобных систем требует анализа технологии производства и учета экономических факторов, связанных либо с усложнением средств автоматизации, либо с учетом привлечения высококвалифицированных рабочих.

Таким образом, первая проблема организации коллаборативного производства заключается в выделении тех участков технологического цикла, на которых целесообразно участие человека как исполнителя. Здесь возможны различные решения в зависимости от характера выполняемых операций. Например, в работе [6] рассматриваются пять вариантов взаимодействия ("коллаборации") человека с промышленным роботом (рис. 1, см. вторую сторону обложки).

Самый распространенный вид взаимодействия человека и промышленного робота — это функционирование в разделенном пространстве, где робот физически огражден от человека. По мере роста занимаемого человеком объема в пространстве функционирования робота повышаются требования к системам безопасности, включающие в себя системы обнаружения и мониторинга контакта робота с человеком [12, 17]. Чем выше уровень взаимодействия, тем выше потенциальная опасность для исполнителя. Это требует введения дополнительных устройств и программно-аппаратных решений для обеспечения безопасности. Заметим, что простая остановка манипулятора в случае опасности не всегда является оптимальным решением. Она нарушает нормальный ход технологической операции и увеличивает время ее выполнения, что может привести к сбою и другим операциям, связанных с ней в соответствии с алгоритмом технологического процесса в целом. Здесь нужны программные и аппаратные средства, контролирующие ход операции и при необходимости перепланирующие траекторию движения робота без его остановки, в том числе супервизорные системы.

При планировании коллаборативного технологического процесса необходимо учиты-

вать и объективные возможности самого человека — физические и когнитивные [13, 14]. Эти возможности суть ограничения, которые свойственны человеку в силу его биологической природы и не могут быть преодолены за счет обучения, тренировки. Отчасти они достаточно хорошо изучены и формализованы в эргономических стандартах техники. К ним относятся ограничения производственной деятельности человека различной природы, позволяющие избежать переутомления: физического — усталости; умственного — утомления от сложности решаемых задач или от монотонности работы; эмоционального — напряженности, связанной с ответственностью работы. Следствием утомления является увеличение вероятности ошибок, снижение качества выполнения операций и увеличение длительности их выполнения [10].

Таким образом, можно отметить, что деятельность человека в составе коллаборативной системы всегда включает две составляющие — предметную и когнитивную. К последней относятся такие области инженерной психологии, как оценка внимания, восприятия информации человеком, способов принятия решения и самоанализа результатов своей деятельности. Эргономики КМАС пока не существует, поскольку исследования особенностей работы человека в составе КС с инженерно-психологических позиций практически не проводились. Тем не менее, проектирование КМАС должно в полной мере учитывать, во всяком случае, те эргономические ограничения, которые достаточно хорошо изучены и сформулированы в виде эргономических рекомендаций и нормативов [7].

Оценка предметной составляющей производственной деятельности человека может проводиться с использованием технического зрения и специальной аппаратуры, регистрирующей такие показатели, как утомляемость, концентрация внимания, напряженность работы. Различные типы миодатчиков и пульсометров позволяют определить параметры физического состояния конкретного человека, косвенно определяющие степень физической усталости. Индикатором эргономических ограничений когнитивного характера является его психоэмоциональное состояние. Методы, использующие техническое зрение и машинное обучение для определения психоэмоционального состояния человека по мимике лица и позе, стали возможны в режиме реального времени [8]. Учитывая требуемую степень коллаборативности, напри-

мер по классификации согласно рис. 1 (см. вторую сторону обложки), возможно выдвигать требования и к необходимости оперативного анализа психоэмоционального состояния человека. В наиболее простом случае, когда задачи, выполняемые человеком, и задачи, выполняемые роботом, требуют только синхронизации этапов выполнения задач, можно ограничиться информацией о начале и конце выполнения задач. При взаимодействии более высокого уровня (рис. 1), потребуется синхронизация совместных действий человека и робота в реальном времени.

### Проблемы формализации КМАС

Итак, основная особенность КМАС состоит в том, что ее элементами являются не только технические устройства — роботы, станки, технологическое оборудование, но и люди со свойственными им ограничениями. Это определяет особенности математического описания такой системы. Одним из вариантов математических аппаратов, описывающих состояния исполнительных элементов подобных систем и систему управления, может быть вариант в конечных автоматов и сетей и управляющих автоматов соответственно, а моделирование систем можно проводить, например, с помощью сетей Петри [18], вводя допущение об описании технологических операций человека как автомата с конечным числом состояний. Однако использование подобного математического аппарата при моделировании производства, в котором используются КМАС, возможно, если в конкретном технологическом процессе на тех участках, где участие человека целесообразно, задачи человеком и роботом выполняются последовательно, и этапы выполнения могут быть представлены дискретными состояниями человека и робота.

Для более сложных случаев (уровни кооперации и непосредственной коллаборации (рис. 1, см. вторую сторону обложки)) необходимо рассмотреть возможность использования иных подходов, включающих и модель деятельности человека в КМАС. Такая модель должна учитывать:

- значимые свойства конкретного исполнителя;
- особенности поведения оператора КМАС для заданного участка производства;
- допустимые с точки зрения технологии производства отклонения параметров этой модели;
- возможности обучения будущих операторов производства с использованием КМАС;

- требования к психофизиологическим характеристикам операторов КМАС.

Для определения возможности измерения состояний человека необходимо формализовать отношение человека с внешней средой, в контексте его функционирования как агента КМАС и субъекта сенсорно-информационной сети. Целенаправленное изменение конфигурации пространства или собственного положения человека в пространстве за фиксированный промежуток времени можно назвать действием, что не противоречит общепринятому определению деятельности как движения, выполняющего определенную цель [11].

Действие применительно к робототехнике — это элементарная операция (элементарное действие), например: взять объект, положить, захватить, сориентировать и т.п. Деятельностью назовем совокупность действий, направленных на решение общей задачи. Применительно к робототехнике деятельность — это сложная операция, например: обойти препятствие, захватить объект сложной формы, извлечь определенный объект из завала, обработать сложную поверхность.

В момент совершения действия человек обладает однозначным положением в пространстве и однозначной конфигурацией тела, находится на какой-то стадии завершения действия и реализации своей деятельности, обладает психоэмоциональным и физическим состоянием. Для оптимальности принимаемых решений о необходимости осуществления каких-либо действий в КМАС данные о состоянии человека в сенсорно-информационной сети должны как-то определяться.

Человек в составе КМАС может иметь информацию о работе "соседей", с которыми он связан в технологическом цикле. Если при этом допустить, что оператор может и общаться с ними (с операторами соседних коллаборативных ячеек), минуя центральный пост, на который, конечно, информация об этом общении передается, то термин "деятельность" представляется уже вполне оправданным применительно к участку, содержащему КМАС, т.е. к участку коллаборативного производства. Этот участок производства приобретает определенную самостоятельность и свойство самоорганизации, производство же в целом — структуру гибридного характера, сочетающую централизацию на уровне управления участками КМАС с децентрализацией на уровне отдельных участков производства. Производство

приобретает гибкость как в обычном смысле — при оперативном изменении условий производства, технических заданий, требований и т.п., так и в отношении людей, занятых на этом производстве в составе КМАС.

Отметим, что для производственного применения КМАС все рабочие места должны быть оборудованы дополнительной аппаратурой — датчиками, системами связи и предоставления информации, узлами адаптации и др. Эта аппаратура образует информационную сеть, наложенную на собственно рабочие места, коллаборативные ячейки, и обеспечивающую гибкость системы в указанном смысле. Магнитные и инфракрасные метки с использованием специальных камер позволяют определить положение человека в пространстве. Задача разделяется на несколько уровней:

- определение положения человека в поле функционирования КМАС;
- локализация положения человека относительно элементов КМАС;
- определение взаимного положения отдельных частей КМАС;
- планирование перемещений в рамках постановки задач;
- прогнозирование перемещений в рамках системы мониторинга и оптимизации процессов.

Обычно производство включает как роботизированные рабочие места, включая КМАС, так и обычные рабочие места. Поэтому концепцию гибкого в обоих смыслах производства можно обобщить и на обычное производство, которое включает КМАС. Тогда обычное рабочее место, например, токарный станок, за которым работает станочник, можно включить в информационно-аппаратную сеть, снабдив рабочее место дополнительной аппаратурой, регистрирующей все параметры изделий (заготовок), поступающих на "вход" и получаемых "на выходе", плюс параметры, характеризующие работу человека на данном оборудовании, прежде всего, время и качество продукции (рис. 2, см. вторую сторону обложки).

При этом и основной принцип коллаборативности — взаимная адаптация человека и технологического процесса — можно будет применить не только к КМАС, но и к любому автоматизированному производству, соблюдая отношения между элементами сенсорно-информационной сети КМАС, как показано на рис. 2. Основным элементом, обеспечивающим адаптивность робототехнических средств и

оптимальность принимаемых решений, является система искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 2) в виде экспертной системы управления на базе алгоритмов машинного обучения. Возможно, это и есть современный путь к модернизации производства не только за счет автоматизации, роботизации — не устранение человека из производственного процесса, а взаимная адаптация человека и производственного процесса, повышающая не только качество продукции, но и качество труда.

Применение коллаборативных роботов, взаимодействующих с людьми и между собой, ставит задачу разработки новых систем управления группами роботов в рамках мультиагентной среды. Основные требования к элементам системы управления подобной системой представлены в работе [5]. Общая архитектура системы управления для групп роботов оказывает значительное влияние на надежность и масштабируемость системы. Архитектура системы управления группой роботов должна учитывать взаимодействие роботов, роботов и людей, тот факт, как поведение группы будет генерироваться на основе поведения отдельных роботов в команде, а решение общепроизводственных задач является сложной композицией из действий людей и роботов.

Известные архитектуры систем управления группами роботов — централизованные, иерархические, децентрализованные и гибридные — имеют реализации для детерминированных безлюдных сред [9, 12, 19, 20].

Для коллаборативных систем эффективность применения тех или иных способов управления требует дополнительного обоснования.

На наш взгляд, гибридные схемы управления являются наиболее эффективными в рамках КМАС. Гибридные архитектуры систем управления сочетают локальное тактическое управление со стратегическим высокоуровневым управлением, что позволяет внести дополнительный уровень безопасности, за счет принятия решений в реальном времени на локальном уровне с сохранением возможности при необходимости централизованно распределять ресурсы и назначать глобальные цели. Поскольку на производствах нет нужды в полной автономности, а коллаборативность при этом обуславливает недетерминированность среды, что ставит высокие требования к скорости реакции роботов, то речь идет о коллаборативной гибридной архитектуре системы управления [2]. Гибридные архитектуры яв-

ляются наиболее привлекательными для реализации системы управления мультиагентной сети коллаборативных роботов ввиду возможности реализации реактивных и проактивных моделей поведения агентов с учетом адаптивности к изменениям среды и реализации "когнитивных" свойств агентов при распределении задач и их реализации.

Условия промышленного производства позволяют реализовать дополнительный уровень контроля и управления в виде сенсорно-информационной сети. Сенсорно-информационная сеть позволит реализовать диспетчеризацию задач между коллаборативными роботами и людьми.

Сенсорно-информационная сеть состоит из главного управляющего узла сети, пассивных узлов и активных агентов и каналов обмена информацией между узлами (агентами) (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Пассивные узлы отвечают только за предоставление информации — это устройства мониторинга взаимодействия агентов сети, мониторинга внутреннего состояния агентов сети и состояния внешней среды. Активные агенты совершают действия, направленные на решение производственных задач — это роботы и люди.

### Заключение

В данной статье представлен новый подход к автоматизации, основанный на одновременном использовании труда людей и роботов в единой системе в рамках решения целевой задачи, — КМАС. В работе введены основные понятия и определения, рассмотрены основания для проведения исследований в области интеграции КМАС в производственные процессы и иные типы деятельности. Показано, что необходимость создания КМАС продиктована экономическими показателями как важнейшим фактором при разработке промышленных систем. Но не менее важным является тот факт, что появление и разработка таких систем открывает широкий пласт для научных исследований. Предложенный метод представления человека как агента КМАС требует дальнейшей разработки методов формализации динамики процессов, алгоритмов и программно-аппаратных средств для определения состояния человека, целеполагания и целераспределения, оценки качества, а также разработки сенсорно-информационной сети и алгоритмов управле-

ния, учитывающих функционирование в рамках системы агентов различной природы.

### Список литературы

1. **Crisman Jill D.** Grand challenges for robotics and automation: The 1996 ICRA panel discussion // *IEEE Robotics Automat. Mag.* 1996. N. 3, 4. P. 10—16.
2. **Shereuzhev M., Serebrenny V.** Industrial collaborative multi-agent systems: main challenges // *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*. Springer, 2019.
3. **Ющенко А. С.** Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2017. Т.18, № 12. С. 812—819.
4. **Serebrenny V. V.** et al. Technological Collaborative Robotic Systems // *AIP Conference proceedings*. 2019.
5. **Akella P.** et al. Cobots for the automobile assembly line // *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. ICRA*. 1999.
6. **Kolbeinsson A., Lagerstedt E., Lindblom J.** Classification of Collaboration Levels for Human-Robot Cooperation in Manufacturing // *Advances in Manufacturing Technology XXXII: OS Press*, 2018.
7. **Ющенко А. С.** Эргономические проблемы коллаборативной робототехники // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2019. Т. 7, № 2.
8. **Yuschenko A. S., Konyshev D. V., Vorotnikov S. A., Zhonin A. A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication // *Springer, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 9812. ICR-2016. P. 133-142.
9. **Назарова А. В., Рыжова Т. П.** Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение"*, 2012.
10. **Мунипов В. М., Зинченко В. П.** Эргономика: человеко-ориентированное проектирование техники, программных средств и среды. М.: Лотос, 2001.
11. **Ломов Б. Ф.** Методологические и теоретические проблемы психологии. М.: Наука, 1999. 163 с.
12. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.
13. **Islam Md Jahidul, Mo Jiawei, Sattar Junaed.** Robot-to-Robot Relative Pose Estimation using Humans as Markers, 2019, arXiv:1903.00820 [cs.RO].
14. **Ермакова Е. С.** Изучение диалектических структур мышления в психологии // *Вестник ЛГУ им. А. С. Пушкина*. 2010. Т. 2.
15. **Анохин П. К.** Философские аспекты теории функциональной системы. М.: Наука, 1978.
16. **Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A.** Multi-agent robotic systems in collaborative robotics // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. Vol. 11097 LNAI. DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3\_28
17. **Peshkin M. A., Colgate J. E., Wannasuphprasit W., Moore C. A., Gillespie R. B., Akella P.** Cobot architecture // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 2001. Vol. 17, N. 4. P. 377—390. doi: 10.1109/70.954751.
18. **Figat M., Zieliński C.** Methodology of Designing Multi-agent Robot Control Systems Utilising Hierarchical Petri Nets // *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2019.
19. **Юревич Е. И.** О проблеме группового управления роботами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2004. № 2. С. 9—13.
20. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems // *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue. Karlsruhe-Ufa: USATU*, 1998. P. 119—124.

# Collaborative Multiagent Systems — an Alternative to Full Automation of Production

V. V. Serebrenny, vsereb@bmstu.ru,

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Corresponding author: **Serebrenny V. V.**, PhD, Head of Department "Robotic Systems and Mechatronics", Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation, e-mail: vsereb@bmstu.ru

Accepted on February 25, 2020

## Abstract

The paper proposes a new approach as an alternative to full automation of processes that meets current economic trends — collaborative multi-agent systems. In this concept, people and robots are considered as agents in a single sensory-information field, who perform tasks to achieve the goals of the collaborative multi-agent system. The urgency of collaborative multi-agent systems results from the fact that the industrial use of fully automated multicomponent systems is limited by the financial and infrastructural unavailability of various industries to switch to completely unmanned technologies. The proposed approach combines the latest, but remaining quite recouped, technological advances along with highly skilled human labor. The use of collaborative multi-agent systems will be economically justified in the manufacture of products in small batches, in the conditions of rapid change of product lines, as well as the presence of staff shortages. The article shows that such an approach can significantly reduce automation costs, while ensuring that the specified production indicators are met. This approach allows taking a fresh look at a human, considering him and a robot as equal partners within a collaborative system. The basic concepts and distinctive characteristics of collaborative multi-agent systems are formulated and presented in the work, justifications for their use are given. Creating a new class of collaborative multi-agent systems requires solving a number of problems associated with the interaction of man and robot. The article considers issues related to the work of a person within a collaborative system, with a rational separation of human functions and an automated production system, in accordance with the necessary level of collaboration. The inclusion of a person with his psychoemotional and physical characteristics as an equivalent agent of a multi-agent system causes difficulties in formalizing collaborative multi-agent systems associated with the need to take these features into account and create a sensory-information system. The inclusion of a person with his psychoemotional and physical characteristics as an equivalent agent of a multi-agent system causes difficulties in formalizing collaborative multi-agent systems associated with the need to take these features into account and create a sensory-information system. The paper discusses ways to formalize a collaborative multi-agent system and management approaches.

**Keywords:** automation of production, collaborative robotics, multi-agent control, sensor-information network

For citation:

**Serebrenny V. V.** Collaborative Multiagent Systems — an Alternative to Full Automation of Production, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 7, pp. 404—411.

DOI: 10.17587/mau.21.404-411

## References

1. **Crisman Jill D.** Grand challenges for robotics and automation: The 1996 ICRA panel discussion, *IEEE Robotics Automat. Mag.*, 1996, no. 3, 4, pp. 10—16.
2. **Shereuzhev M., Serebrenny V.** Industrial collaborative multi-agent systems: main challenges, *Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings"*, Springer, 2019.
3. **Yuschenko A. S.** Collaborative robotics: state and new challenges, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 8—13 (in Russian).
4. **Serebrenny V. V.** et al. Technological Collaborative Robotic Systems, *AIP Conference proceedings*, 2019.
5. **Akella P. et al.** Cobots for the automobile assembly line, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA*, 1999.
6. **Kolbeinsson A., Lagerstedt E., Lindblom J.** Classification of Collaboration Levels for Human-Robot Cooperation in Manufacturing, *Advances in Manufacturing Technology XXXII*, OS Press, 2018.
7. **Yuschenko A. S.** Ergonomic problems of collaborative robotics, *Robotics and technical cybernetics*, 2019, vol. 7, no. 2 (in Russian).
8. **Yuschenko A. S., Konyshov D. V., Vorotnikov S. A., Zhonin A. A.** Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication, Springer, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 9812, ICR-2016, pp. 133—142.
9. **Nazarova A. V., Ryzhova T. P.** Methods and algorithms for multi-agent control of a robotic system, *Bulletin of Bauman MSTU*, 2012 (in Russian).
10. **Munipov V. M., Zinchenko V. P.** Ergonomics: Human-Oriented Engineering, Software, and Environment Design, Lotos, Moscow, 2001 (in Russian).
11. **Lomov B. F.** Methodological and theoretical problems of psychology, Moscow, Nauka, 1999, c.163 (in Russian).
12. **Kaliaev I. A., Gayduk A. R., Kapustian S. G.** Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, Fizmatlit, 2009 (in Russian).
13. **Islam Md Jahidul, Mo Jiawei, Sattar Junaed.** Robot-to-Robot Relative Pose Estimation using Humans as Markers, 2019, arXiv:1903.00820 [cs.RO].
14. **Ermakova E. S.** The study of the dialectical structures of thinking in psychology, *Bulletin of Leningrad State University named after A. S. Pushkin*, vol. 2, 2010 (in Russian).
15. **Anokhin P. K.** Philosophical aspects of the theory of a functional system. Nauka, Moscow, 1978 (in Russian).
16. **Vorotnikov S., Ermishin K., Nazarova A., Yuschenko A.** Multi-agent robotic systems in collaborative robotics, *Lecture Notes in Computer Science*, 2018, vol. 11097 LNAI, DOI: 10.1007/978-3-319-99582-3\_28.
17. **Peshkin M. A., Colgate J. E., Wannasupphrasit W., Moore C. A., Gillespie R. B., Akella P.** Cobot architecture, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, vol. 17, no. 4, pp. 377—390, doi: 10.1109/70.954751.
18. **Figat M., Zieliński C.** Methodology of Designing Multi-agent Robot Control Systems Utilising Hierarchical Petri Nets, *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019.
19. **Yurevich E. I.** About the problem of group control of robots, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2004, no. 2, pp. 9—13 (in Russian).
20. **Timofeev A. V.** Intelligent Control and Operations Research for Multi-Agent Robot Systems, *International Autonomous Systems: Intern. Scientific Issue*, Karlsruhe-Ufa, USATU, 1998, pp. 119—124.