

УДК 681.5.01

ББК 3.32.965.32.965.9

**САМООРГАНИЗУЮЩИЕСЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ  
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТОВ, ПОСТРОЕННЫЕ  
НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ**

**Каляев И. А.<sup>1</sup>, Капустян С. Г.<sup>2</sup>**

*(Научно-исследовательский институт многопроцессорных  
вычислительных систем имени академика А.В. Каляева  
Южного федерального университета, Таганрог)*

**Гайдук А. Р.<sup>3</sup>**

*(Технологический институт федерального  
государственного автономного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Южный федеральный университет» в г. Таганроге)*

*Статья посвящена разработке методов самоорганизации в распределенных технических системах. В частности, рассматриваются принципы и методы функционирования самоорганизующихся систем группового управления интеллектуальными роботами. Работа предлагаемого подхода рассматривается на модельном примере перемещения некоторого тела по поверхности группой интеллектуальных роботов. Приводятся результаты моделирования.*

---

<sup>1</sup> Игорь Анатольевич Каляев, директор, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор ([kaliaev@mvs.sfedu.ru](mailto:kaliaev@mvs.sfedu.ru)).

<sup>2</sup> Сергей Григорьевич Капустян, начальник отдела, доктор технических наук ([kap@mvs.sfedu.ru](mailto:kap@mvs.sfedu.ru)).

<sup>3</sup> Анатолий Романович Гайдук, профессор кафедры систем автоматического управления, доктор технических наук, профессор ([gaiduk\\_2003@mail.ru](mailto:gaiduk_2003@mail.ru)).

Ключевые слова: интеллектуальный мобильный робот, группа, групповое управление, система группового управления, самоорганизация, самоорганизующаяся система, кластер.

## **1. Введение**

Проблема группового управления – это глобальная проблема, актуальная для многих сфер жизни. Везде, где существует некоторая группа живых или технических объектов, которые должны совместными усилиями выполнять некоторую работу или решать некоторую задачу, возникает проблема группового управления или группового взаимодействия. Объекты могут быть самой разной природы. Например, это могут быть автономные мобильные роботы, функционирующие в естественной сложной среде, оборудование автоматизированных предприятий, задействованное в выполнении единого технологического процесса, вычислительные устройства распределенной вычислительной системы, решающей сложную задачу, и т.д. В принципе любая техническая система, состоящая из каких-либо отдельных управляемых узлов, может рассматриваться как объект группового управления.

Примеры группового взаимодействия в живой природе – это колонии муравьев, стаи птиц и рыб; в социальной сфере – это, например, строители, осуществляющие сборку жилых конструкций, спортивные (например, футбольные) команды, боевые подразделения, участвующие в боевых действиях, и т.п.

В технической области проблема группового управления наиболее актуальна в робототехнике. Для решения многих практических задач могут эффективно использоваться группы роботов. Например, это задачи, связанные с обследованием крупных объектов и больших территорий, перевозкой или переработкой больших объемов разнородных грузов и т.п. Как правило, при решении таких задач роботы должны функционировать в неорганизованной или плохо организованной, недетерминированной среде.

При групповом использовании роботов различного назначения возникает ряд весьма сложных задач, в первую очередь, связанных с проблемой управления ими и организацией взаимодействия роботов группы между собой для наиболее эффективного достижения цели, поставленной перед группой. В особенности эта проблема относится к интеллектуальным мобильным роботам с автономной системой передвижения и навигации.

Под группой интеллектуальных роботов понимается множество роботов, автономно (без участия человека или с минимальным его участием) функционирующих в некоторой среде, способных воспринимать информацию о среде, реагировать на изменения состояния среды и взаимодействовать друг с другом для решения единой целевой задачи. Взаимодействие – это согласование роботами группы своих действий с помощью связей между ними (поля, электрические сигналы по проводам, механические связи, информационные каналы и т.п.).

Задачу управления роботами группы по достижению групповой цели будем называть задачей группового управления. Суть задачи группового управления заключается в отыскании и реализации таких действий каждого отдельного робота группы, которые приводят к оптимальному, с точки зрения некоторого критерия, достижению общей групповой цели.

## **2. Постановка задачи группового управления**

В общем случае задачу управления группой объектов можно сформулировать следующим образом [6]. Предположим, что некоторая группа, состоящая из  $N$  роботов  $R_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), *воздействует на некоторую среду  $E$  (являющуюся объектом управления для группы)*. Будем считать, что состояние каждого робота  $R_i$  описывается вектором  $\mathbf{S}_i(t) = [s_{1i}, s_{2i}, \dots, s_{li}]^T$ ,  $i = 1, \dots, N$ , а состояние среды – вектором  $\mathbf{E}_i(t) = [e_1, e_2, \dots, e_w]^T$ . Пусть, кроме того, каждый робот  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , может выполнять некоторую совокупность действий  $\mathbf{A}_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}\}$ ,  $i = 1, \dots, N$ , с помощью которых он может изменять как состоя-

ние среды, так и состояния других роботов группы. В общем случае эти изменения во времени определяются системами вида:

$$(1) \quad \dot{\mathbf{S}}_i = F_i(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}), \quad i = 1, \dots, N,$$

$$(2) \quad \mathbf{E} = F(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}).$$

На состояния роботов и среды, а также на действия роботов в конкретных ситуациях, могут налагаться некоторые ограничения, в общем случае определяемые системами неравенств:

$$(3) \quad \mathbf{G}(\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{E}) \leq 0,$$

$$(4) \quad \mathbf{D}(\mathbf{S}_1, \mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{S}_N, \mathbf{A}_N, \mathbf{E}) \leq 0,$$

которым должны удовлетворять допустимые состояния роботов группы и их действия. Целью действий группы роботов является преобразование среды из исходного (текущего) состояния  $\mathbf{E}^0$  в некоторое целевое состояние  $\mathbf{E}^k$  оптимальным образом, например за минимальное время.

В общем случае задача группового управления роботами разбивается на ряд подзадач, среди которых можно выделить следующие:

- определение состава группы, способной эффективно решить целевую задачу;
- распределение функций между роботами для оптимального (или близкого к нему) решения целевой задачи;
- реализация функций отдельными роботами для достижения конечной цели.

Среди известных подходов к решению задачи группового управления роботами можно выделить два диаметрально противоположных подхода [5, 6]. В первом случае эта задача решается одним, сосредоточенным (центральным) устройством управления. Во втором случае решение осуществляется распределенной системой, объединяющей устройства управления отдельных роботов группы. В дальнейшем первый подход будем называть централизованным групповым управлением, а второй подход – децентрализованным групповым управлением.

Если целевая задача заранее известна и должна решаться

группой роботов в заранее известных условиях, то в этом случае до начала функционирования группы с использованием, например, централизованного подхода можно определить состав группы, определить последовательность действий каждого робота группы. Роботы же должны только выполнять каждый свою последовательность действий. Естественно, в этом случае от роботов не требуется никакого интеллекта, достаточно способности адаптироваться к внешней среде для отработки действий.

Если же группа роботов предназначена для решения некоторого круга задач и конкретная задача заранее неизвестна, то решить задачу группового управления описанным выше способом не представляется возможным.

Так как в общем случае для решения конкретной целевой задачи могут использоваться не все роботы группы, то для реализации задачи группового управления должны быть решены следующие подзадачи:

- формирование активной части группы – кластера [6], как совокупности роботов, сформированной для достижения той или иной конкретной цели;
- оптимальное (или близкое к нему) распределение функций между роботами группы, а также перераспределение этих функций при изменении ситуации;
- реализация функций роботами, входящими в кластер.

Решение этих подзадач должно осуществляться группой роботов **самостоятельно**, точнее её *системой группового управления* (СГУ), которая должна быть создана самой группой роботов. То есть здесь можно говорить о самоорганизации группы роботов для решения поставленной целевой задачи. Для этого роботы группы, очевидно, должны обладать достаточным уровнем интеллекта, т. е. быть интеллектуальными.

По способу организации СГУ можно разделить на централизованные и распределенные. Наибольшее распространение в последнее время получают распределенные СГУ, реализующие децентрализованный подход к проблеме управления группой

роботов. Преимущества таких СГУ перед централизованными системами аргументированно обоснованы в работах [5, 6, 10].

Примером использования распределенных СГУ может являться система управления группой мобильных роботов, решающих задачу картографирования местности [15], реализующая мультиагентный подход, основанный на принципах «рыночной экономики» и используемый для организации взаимодействия между роботами группы.

Распределенные СГУ строятся из множества устройств управления (УУ) отдельных роботов группы, объединенных коммуникационными каналами. Тогда для приведенного выше случая можно говорить и о *самоорганизации* СГУ, так как из всего множества компонентов (устройств управления отдельных роботов) в процессе формирования кластера должна быть выделена активная часть, участвующая в процессе управления роботами, входящими в кластер, при решении целевой задачи. Причем состав этой части заранее неизвестен. Ниже будет рассмотрен способ построения СГУ на основе сетевой модели.

Как отмечалось выше, СГУ группы, прежде всего, решает задачу организации кластеров группы, каждый из которых ориентирован на достижение определенной цели. Устройства управления роботов кластера объединяются в СГУ кластера. В свою очередь, УУ роботов кластера, взаимодействуя друг с другом, формируют, также на основе самоорганизации, алгоритм своих действий по достижению цели.

Перейдем к рассмотрению особенностей процесса самоорганизации и самоорганизующихся технических систем.

### **3. Самоорганизация и самоорганизующиеся системы. Состояние вопроса**

Первоначально явления самоорганизации наблюдались в естественных и экспериментальных физико-химических системах: структуры А. Тьюринга, реакции Белоусова-Жаботинского, ячейки Бенара и т.п. [4, 11]. По мнению большинства исследо-

вателей, самоорганизующиеся явления (СО-явления) в естественных системах возникают из-за потери устойчивости предыдущего состояния системы в силу изменившихся внешних условий. Возникающее в соответствии с естественными законами природы новое состояние иногда оказывается «организованной структурой» [11]. В этом случае указанный переходной процесс в естественной системе называется самоорганизующимся. Важнейшей особенностью возникающей «организованной структуры» является её устойчивость в сложившихся условиях. При этом законы природы являются теми детерминирующими факторами, под влиянием которых протекает процесс самоорганизации. Причем, как правило, так, что естественная система в состоянии, соответствующем «организованной структуре», имеет локальный минимум энергии.

Применительно к системам управления проблема самоорганизации впервые была поставлена, по-видимому, У.Р. Эшби в 1959 г. [13], и в дальнейшем рассматривалась в многочисленных работах, например [9, 10, 17] и многих других.

Рассмотрим сначала известные определения этого явления. У.Р. Эшби определял самоорганизацию как «процесс, в ходе которого создается, воспроизводится или совершенствуется организация сложной системы» [13]. Заметим, что в этом определении не отмечаются ни причины, обуславливающие процесс самоорганизации, ни её цели. Констатируется лишь факт образования некоей «организации». Так как самоорганизация протекает в системе, то под «организацией», по-видимому, следует понимать некую упорядоченную структуру, которая создается, воспроизводится или совершенствуется в сложной системе.

В настоящее время часто используется определение М. Бушева (M. Bushev), согласно которому: «самоорганизация представляет собой процесс, в котором глобальные внешние воздействия стимулируют старт внутренних для системы механизмов, которые в свою очередь дают начало специфическим структурам в системе» [14] (рис. 1).



Рис. 1. Самоорганизация по Бушеву

Как видно, в определении Бушева, в отличие от определения У.Р. Эшби, подчеркиваются причины, обуславливающие процесс самоорганизации. Однако оба эти определения представляются неполными, поскольку не содержат главной компоненты процесса самоорганизации – её цели, которая присуща любому процессу, протекающему как в живых, так и в технических системах.

Более корректным, по нашему мнению, является определение самоорганизации по П.К. Анохину, схематически представленное на рис. 2.

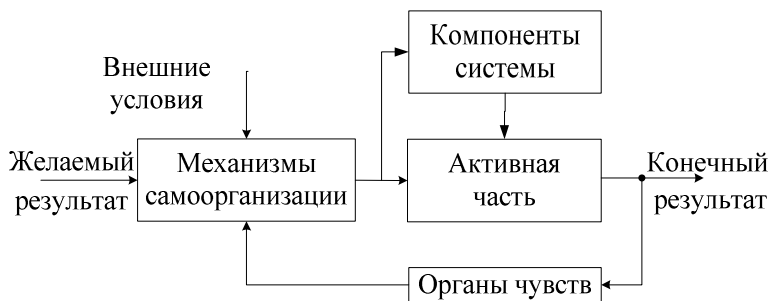


Рис. 2. Самоорганизация по Анохину

Академик Анохин – автор теории функциональных систем, обычно рассматривал живые, биологические системы. Но смысл процесса самоорганизации у него, естественно, тот же. П.К. Анохин считает, что «желаемый результат» является «неотъемлемым и решающим компонентом системы, инструментом, создающим упорядоченное взаимодействие между всеми другими её компонентами». При этом «механизм взаимодействия компонентов заключается в освобождении их от избыточ-



ных степеней свободы, не нужных для получения данного конкретного результата, и, наоборот, в сохранении всех тех степеней свободы, которые способствуют получению результата» [10, с. 30]. Ясно, «что освобождение компонентов от избыточных степеней свободы» и приводит к образованию в процессе самоорганизации в живом организме «активной группы мышц и связанных с ними нейронов», т. е. к образованию все той же «специфической» или «организованной» структуры.

Однако ответ на вопрос, каким образом отбираются «нужные» степени свободы и происходит образование «специфических структур», т. е. в чем заключаются «механизмы самоорганизации», и в этом определении отсутствуют. Отсутствует описание «механизмов самоорганизации» и в других её определениях [9-11].

Довольно подробно вопросы самоорганизации рассматриваются в коллективной монографии [10]. В частности, в главе 12, авторами которой являются С.В. Корниенко и О.А. Корниенко, пожалуй, впервые, проводится чёткое разделение процессов самоорганизации в естественных и технических системах. Авторами вводятся понятия «естественной» и «искусственной» самоорганизации и отмечается, что правила естественной самоорганизации, которая протекает в «естественных системах», определяются соответствующими законами природы. Правила же искусственной самоорганизации, которая протекает в искусственных, технических системах, «задает разработчик системы», руководствуясь моделью управляемого процесса, полученной из тех же естественных законов природы.

Применяя приведенные определения процесса самоорганизации к рассматриваемой группе роботов, очевидно, можно считать, что «глобальными внешними воздействиями» являются конечная цель и условия функционирования группы роботов, а «специфическими структурами» – некоторые совокупности роботов – кластеры, сформированные для достижения той или иной конкретной цели.

В соответствии с терминологией работы [10] исполнительные и сенсорные подсистемы интеллектуальных роботов, как элементов искусственной самоорганизующейся системы (СО-системы), составляют её функциональную часть. Авторы особо подчеркивают, что процесс искусственной самоорганизации может протекать в системе, если она, помимо функциональной части, будет содержать структурную часть, которая «генерирует функциональную часть» [10, с. 309].

Под структурной частью самоорганизующейся группы роботов, очевидно, следует понимать структуру системы управления как группой роботов, так и кластером. Однако каким образом, по каким правилам структурная часть генерирует функциональную часть», авторы не указывают.

С другой стороны, в работе [10] формулируется важное, на наш взгляд, положение о том, что самоорганизация всегда идет в соответствии с «вертикальным» и «горизонтальным» операционными принципами по определённым *локальным правилам самоорганизации*. При этом новые вертикальные уровни возникают тогда, когда «горизонтальное СО-явление» достигает своего предела сложности. Другими словами, для возникновения процесса искусственной самоорганизации в технической системе она должна быть построена в соответствии с определенными правилами – локальными правилами самоорганизации. Повидимому, можно считать, что эти правила играют ту же детерминирующую роль в искусственной самоорганизации, что и законы природы в естественных самоорганизующихся системах.

Из изложенного следует, что для построения самоорганизующейся системы управления некоторым процессом или объектом, прежде всего, необходимо найти или сформулировать локальные правила самоорганизации. Эти правила, с одной стороны, должны быть достаточно общими, чтобы их можно было бы применять во многих случаях. С другой стороны, они должны позволять получать конкретные структуры и алгоритмы формирования управляющих воздействий.

Чтобы сделать процесс искусственной самоорганизации реализуемым в технической системе, примем следующее определение: *самоорганизация в технической системе – это процесс автономного формирования оптимальной структуры и оптимального алгоритма её функционирования в соответствии с поставленной перед системой целью, некоторым критерием качества и внешними условиями.*

Ближайшими к СО-системам управления являются адаптивные системы. Однако в них обычно адаптируются параметры некоторого закона управления [1]. Если же в адаптивной системе изменяется закон (т. е. состав, структура системы) управления, то её обычно называют самоорганизующейся [2, 8, 9, 12, 17].

Применительно к группе интеллектуальных роботов, перед которой поставлены несколько задач, результатом процессов самоорганизации являются, очевидно, СГУ группы, кластеры, система управления каждого из них и алгоритмы функционирования их роботов в той или иной ситуации. Другими словами, в результате процесса самоорганизации, например, в группе роботов, перед которой поставлена одна цель, должны возникнуть: СГУ группы, кластер, система управления этого кластера, совокупность действий роботов кластера по достижению цели и последовательность их выполнения.

Отметим также, что формирование именно оптимальной структуры и оптимального алгоритма функционирования, фактически, обуславливает наличие некоторого критерия качества. Необходимость этого критерия, как и оптимальности, вообще говоря, не является необходимым атрибутом искусственных СО-систем. Он вводится исключительно для сужения возможных структур алгоритмов управления. Критерий качества в искусственной СО-системе, на наш взгляд, является тем фактором, который приводит к устойчивости процесса самоорганизации, т. е. к сходимости структуры СО-системы к некоторой структуре с устойчивым положением равновесия или с устойчивым установившимся движением.

Таким образом, для решения сформулированной выше задачи группового управления в заранее неизвестных условиях, прежде всего, необходимо сформулировать соответствующие локальные правила самоорганизации. Реализация этих правил интеллектуальными роботами группы приведет к возникновению в ней кластера. Именно роботы кластера, также на основе локальных правил самоорганизации, определяют алгоритм действий роботов кластера по достижению поставленной цели.

#### **4. Основные принципы самоорганизации систем группового управления интеллектуальными роботами**

Возвращаясь к задаче группового управления интеллектуальными роботами, подчеркнём, что в исходном состоянии группа представляет собой несколько связанных лишь информационными каналами, но автономных роботов, т. е. имеет практически однородную структуру. Устройства управления роботов информационными каналами объединяются в информационно-вычислительную сеть.

Такая сеть может быть представлена взвешенным графом, вершины которого соответствуют роботам группы  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , а ребра – информационным каналам между ними. Каждой вершине графа может быть присвоен вес  $g_i$ , характеризующий потенциальные возможности соответствующего робота, например, запас энергоресурса. В модели однородной группы, все роботы которой могут выполнять одинаковый набор функций (действий), каждая вершина связана со всеми остальными вершинами, т. е. модель однородной группы – полный граф, как, например, на рис. 3. Для неоднородной группы такое требование не является обязательным.

В соответствии с приведенными выше определениями самоорганизации, для достижения некоторой цели в группе роботов, прежде всего, должен возникнуть кластер, роботы которого ориентированы на достижение конкретной цели и СГУ этого

кластера. Следовательно, алгоритмическое и программное обеспечение устройств управления роботов группы должно обеспечивать возможность протекания процесса самоорганизации. Этот процесс, очевидно, должен быть ориентирован, с одной стороны, на формирование кластера в группе, а с другой стороны, на формирование системы управления этим кластером, т. е. структуры и алгоритма работы вычислительного комплекса роботов данного кластера, ориентированных на достижение поставленной цели.

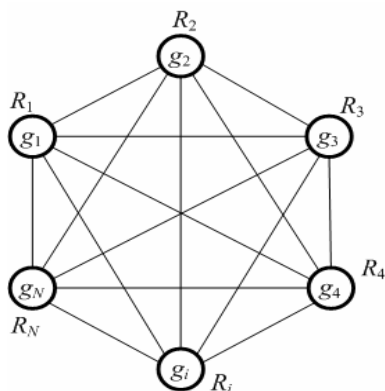


Рис. 3. Граф-модель однородной группы роботов

Ряд алгоритмов формирования кластеров в группе роботов, когда перед ней поставлено несколько целей, предложен в работе [6]. Здесь же для большей ясности будем предполагать, что группе поставлена одна цель.

Состав, численность, техническое и программное обеспечение роботов, включаемых в кластер, определяются, с одной стороны, теми действиями, которые необходимо выполнить для достижения конкретной цели, а с другой стороны – функциональными возможностями роботов группы.

Математически процесс автономного формирования кластера можно описать следующим образом.

Каждый робот  $R_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  группы может выполнить некоторую совокупность действий  $\mathbf{A}_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}\}$ . С другой стороны, для решения некоторой целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  в условиях  $\mathbf{f}_\mu = \{f_{1\mu}, f_{2\mu}, \dots\}$  необходимо выполнить определенную совокупность действий  $\mathbf{T}_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{q\mu}\}$ , причем каждое из них характеризуется некоторыми признаками, например типом, трудоемкостью (расходом энергоресурса), интенсивностью и т.д.

Кроме того, на процесс решения целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  обычно накладывается множество других требований  $\mathbf{Q}_\mu = \{J(\mu), t_{\text{дост}}(\mu), n(\mu), \dots\}$ , связанных с процессом достижения цели. Здесь  $J(\mu)$  – критерий эффективности,  $t_{\text{дост}}(\mu)$  – время достижения цели,  $n(\mu)$  – число роботов в кластере, ориентированном на решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  и т.п.

Целевая задача  $\mathbf{T}_\mu$  может быть представлена ориентированным взвешенным графом, вершины которого соответствуют действиям  $T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{q\mu}$ , которые требуется выполнить для решения данной целевой задачи, а дуги определяют отношения предшествования. Каждой вершине присваивается вес  $\gamma_{j\mu}$ ,  $j = 1, 2, \dots, q_\mu$ , характеризующий, например, трудоемкость соответствующего действия, а исходящим дугам может присваиваться вес  $\tau_{j,k}$ ,  $j, k \in [1, 2, \dots, q_\mu]$ ,  $j \neq k$ , характеризующий допустимое время выполнения соответствующего предшествующего действия, прежде чем выполнять последующее действие. Кроме того, вводятся две дополнительные вершины начала и окончания решения целевой задачи, имеющие нулевой вес. Исходящие дуги вершины «начало» и входящие дуги вершины «окончание» также имеют нулевой вес. Граф не должен иметь циклов. Поэтому если одно и то же действие должно быть выполнено несколько раз, граф должен иметь такое же количество вершин, соответствующих этому действию. Такой граф, фактически, представляет собой сетевую модель решения целевой задачи. Пример такой сетевой модели приведен на рис. 4.

Задача организации кластера для решения целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  может состоять в том, чтобы вершинам графа – модели группы роботов поставить в соответствие вершины графа –

модели целевой задачи таким образом, чтобы было задействовано минимальное число роботов, и при этом время решения целевой задачи было минимальным. В свою очередь эта задача может быть представлена в виде модифицированной задачи о назначении, методы и алгоритмы решения которой распределенными СГУ описаны в работе [6].

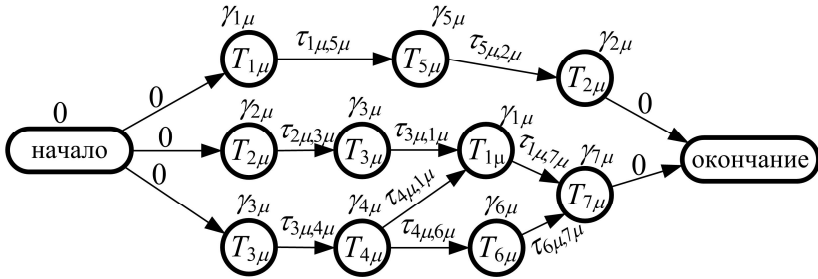


Рис. 4. Пример сетевой модели целевой задачи

В процессе решения этой задачи вершины в модели целевой задачи могут объединяться по некоторым правилам. Например, если робот может выполнить два последовательных действия за время, не большее чем сумма допустимых времен выполнения этих действий, то соответствующие им вершины могут быть объединены в одну вершину. Так, вершины  $T_{2\mu}$  и  $T_{3\mu}$  на рис. 4 могут быть объединены в одну, если  $t_{2\mu} + t_{2\mu} \leq \tau_{2\mu} + \tau_{2\mu}$  для данного робота.

В предельном случае, если все элементы  $T_{v\mu}$ ,  $v = 1, \dots, q_\mu$ , по характеризующим их признакам соответствуют элементам  $A_{ji}$  робота  $R_i$  данной группы, т. е.  $T_{v\mu} \in A_i$ ,  $v = 1, \dots, q_\mu$ , или, другими словами, все действия могут быть выполнены одним роботом за допустимое время, то решение целевой задачи  $T_\mu$  в «проектных» условиях  $\mathbf{f}_\mu^\circ$ , очевидно, может обеспечить один этот робот при наличии соответствующего запаса энергоресурса.

Однако обычно возможностей одного робота недостаточно, и решение целевой задачи  $T_\mu$  могут обеспечить лишь несколько

роботов  $R_i$ , таких, что выполняется следующее условие:

$$(5) \quad T_{v\mu} \in \{\mathbf{A}_{i_1(\mu)}, \mathbf{A}_{i_2(\mu)}, \dots, \mathbf{A}_{i_n(\mu)}\}, \quad v = 1, \dots, q_\mu,$$

где  $n(\mu)$  – число роботов группы, среди множества действий которых имеются все действия  $\mathbf{T}_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p\mu}\}$ , выполнение которых в условиях  $\mathbf{f}^\circ_\mu$  обеспечивает достижение этой цели.

Если каждое действие  $T_{v\mu}$  выполняется одним роботом  $R_i$ , то численность кластера  $K_\mu$ , ориентированного на решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$ , будет равна числу действий  $T_{v\mu}$ , т. е.  $n(\mu) = p_\mu$ . В противном случае  $n(\mu) < p_\mu$ .

Как правило, одно и то же действие  $T_{v\mu}$  выполняется различными роботами  $R_i$  с различной эффективностью. Пусть  $q_{iv}(\mu)$  – это оценка эффективности выполнения роботом  $R_i$  действия  $T_{v\mu}$ . Очевидно, в кластер  $K_\mu$ , ориентированный на решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$ , целесообразно включать те роботы группы  $R_1 \div R_N$ , которые обеспечивают достижение цели с наибольшей эффективностью, т. е. те роботы, для которых выполняется условие

$$(6) \quad J = \sum_{v=1}^{p_\mu} q_{iv}(\mu) \rightarrow \max_{i \in [1, \dots, N]} .$$

При этом число роботов кластера, ориентированного на решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  в проектных условиях  $\mathbf{f}^\circ_\mu$ , должно быть минимальным, т. е.

$$(7) \quad n(\mu) \rightarrow \min .$$

Условия (5)–(7) фактически являются локальными правилами самоорганизации кластера  $K_\mu$ , ориентированного на решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$ . С другой стороны, реализация условий (5)–(7) является алгоритмом формирования этого кластера. При этом роботы преобразуют исходную модель целевой задачи, заменяя веса вершин и дуг, характеризующих трудоемкость и допустимое время выполнения действий, оценками эффективности выполнения действий  $q_{iv}(\mu)$ , которые присваиваются вершинам. Тогда выражение (6) является целевой функцией задачи формирования кластера.



Подчеркнём, что если для некоторой группы условие (5) не выполняется, то данная группа, очевидно, не способна обеспечить решение целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  в условиях  $\mathbf{f}^\circ_\mu$ .

Конечно, для реализации алгоритма, соответствующего условиям (5)–(7), должны быть сформированы множества  $\mathbf{A}_i = \{A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{mi}\}$ , а также  $\mathbf{T}_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p\mu}\}$ ,  $\mathbf{f}^\circ_\mu = \{f^\circ_{1\mu}, f^\circ_{2\mu}, \dots\}$  и  $\mathbf{Q}_\mu = \{J_\mu, t_{\text{дост.}\mu}, n(\mu), \dots\}$ .

Формирование множеств  $\mathbf{A}_i$ , очевидно, не представляет больших сложностей. Поскольку здесь рассматриваются искусственные интеллектуальные роботы, то множество  $\mathbf{A}_i$  определяется назначением и конструкцией робота  $R_i$ , а компоненты  $A_{ji}$  этого множества представлены в техническом паспорте робота  $R_i$ .

Основные проблемы создания СО-систем связаны с формированием целевых множеств  $T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, f^\circ_{1\mu}, f^\circ_{2\mu}, \dots$  и  $J_\mu, t_{\text{дост.}\mu}, n(\mu), \dots$ , содержание которых определяется заранее неизвестной целью. Поэтому существование СО-алгоритмов формирования в реальном времени указанных множеств в общем случае, т. е. при целях произвольного вида, представляется весьма проблематичным.

Ведь даже в живой природе способность выполнения того или иного действия, например, охоты, особь приобретает лишь в результате длительного периода обучения. Судя по результатам новейших исследований, и рефлекторные, врожденные действия живых существ, формируются программным путем – в соответствии с генетическим кодом.

И процесс обучения, и генетический код, очевидно, являются ни чем иным как предыдущим опытом существования живых систем – их знаниями, хранящимися в их памяти или в генетическом коде. Указанные выше локальные правила самоорганизации (искусственной), очевидно, тоже отражают некоторые знания разработчика СО-систем. На основании этого можно предложить следующий подход к построению самоорганизующейся системы управления группой интеллектуальных роботов.

Как отмечалось выше, та или иная группа роботов всегда формируется для достижения *лишь определенного круга* целей (целевых задач)  $\mathbf{T}_\mu \in \Xi$ , где  $\Xi$  – множество целей, на достижение которых ориентирована данная группа роботов. Необходимые для решения каждой конкретной целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$  действия  $T_{v\mu}$ ,  $v = 1, \dots, q_\mu$ , и порядок их выполнения в определенных условиях  $\mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{Q}_\mu$  определяются известными законами природы.

В принципе возможны два подхода к формированию множеств  $\mathbf{T}_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p\mu}\}$ ,  $\mathbf{f}_\mu^\circ$  и модели целевой задачи. Первый – «*III-подход*» – состоит в том, что эти множества формируются методами теории интеллектуальных систем самими роботами в реальном времени [5] на основе соответствующих законов природы. Второй – «*экспертный подход*» – состоит в априорной формулировке этих множеств и модели экспертами также на основе соответствующих законов природы в виде онтологических моделей и запоминании их в базах знаний роботов группы [6, 7]. В дальнейшем будем иметь в виду «*экспертный подход*».

Совокупность действий  $T_{v\mu}$ ,  $v = 1, \dots, q_\mu$ , и последовательность их выполнения в некоторых «*проектных*» условиях  $\mathbf{f}_\mu^\circ$ , разработанные экспертами, фактически представляют собой некоторый алгоритм решения поставленной целевой задачи:

$$(8) \quad \mathbf{L}_\mu(\mathbf{T}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{Q}_\mu) = \{T_{v_1(\mu)}, T_{v_2(\mu)}, \dots, T_{v_n(\mu)}, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{Q}_\mu\}.$$

Этот алгоритм включает  $p_\mu$  действий  $T_{v\mu}$ . Однако действительные условия  $\mathbf{f}_\mu$ , при которых роботам кластера необходимо будет обеспечивать достижение цели, скорее всего, будут отличаться от проектных, т. е.  $\mathbf{f}_\mu \neq \mathbf{f}_\mu^\circ$ . Поэтому алгоритм  $\mathbf{L}_\mu(\mathbf{T}_\mu, \mathbf{f}_\mu^\circ, \mathbf{Q}_\mu)$  должен обладать свойством адаптивности или быть самоорганизующимся, т. е. способным обеспечить выполнение необходимых действий в изменившихся условиях [2, 8, 12, 16, 17].

Таким образом, если алгоритмы  $\mathbf{L}_\mu$  решения всех целевых задач  $\mathbf{T}_\mu \in \Xi$  сформированы и находятся в базе знаний всех роботов группы  $R_1 \div R_N$ , то самоорганизующийся алгоритм

группового управления при решении одной целевой задачи  $\mathbf{T}_\mu$ , поставленной перед группой, заключается в следующем:

- получив целевую задачу  $\mathbf{T}_\mu = \{T_{1\mu}, T_{2\mu}, \dots, T_{p\mu}\}$  в виде ее модели и условия  $\mathbf{f}_\mu, \mathbf{Q}_\mu$ , роботы  $R_1 \div R_N$  на основе соотношений (1)–(3), взаимодействуя друг с другом, формируют кластер  $\mathbf{K}_\mu = \{R_{i1(\mu)}, R_{i2(\mu)}, \dots, R_{in(\mu)}\}$  мощностью  $n(\mu)$ . При формировании кластера могут использоваться алгоритмы коллективного взаимодействия, предложенные в работе [6]. Устройства управления отдельных роботов кластера объединяются в СГУ кластера;

- из своих баз знаний роботы  $R_i \in \mathbf{K}_\mu$  извлекают алгоритм  $L_\mu(\mathbf{T}_\mu, \mathbf{f}_\mu, \mathbf{Q}_\mu)$  и адаптируют его к текущим условиям  $\mathbf{f}_\mu$ ;

- роботы  $R_i \in \mathbf{K}_\mu$  выполняют действия  $A_{i1(\mu)} = T_{v1(\mu)}, A_{i2(\mu)} = T_{v2(\mu)}, \dots, A_{iq(\mu)} = T_{vq(\mu)}$  в соответствии с алгоритмом  $L_\mu(\mathbf{T}_\mu, \mathbf{f}_\mu, \mathbf{Q}_\mu)$ .

Как видно, предлагаемый алгоритм самоорганизующейся системы группового управления интеллектуальными роботами полностью соответствует приведенным выше определениям процесса искусственной самоорганизации.

## 5. Методический пример

Рассмотрим применение изложенного подхода к задаче перемещения группой мобильных роботов твердого круглого тела по горизонтальной поверхности из исходной точки в заданную, целевую точку при отсутствии препятствий [3]. Эта задача является математической моделью процессов перемещения грузов, когда одно или несколько движущих средств соединяются с грузом в одно целое и осуществляют его перемещение в заданную точку за счёт собственных усилий. К примеру, это может быть проводка большого корабля или морской нефтедобывающей платформы одним или несколькими безэкипажными буксирами по свободной морской акватории.

Предположим, к телу  $M$  прикрепилась группа однотипных транспортных роботов  $R_1 \div R_N$ , как показано на рис. 5 для случая  $N=6$ . На этом рисунке  $\varphi_{\text{нц}}$  – угол между осью  $x$  некоторой

системы координат и направлением на цель из точки с координатами  $x_c, y_c$ .

Роботы могут обмениваться информацией по принципу «каждый – всем». При этом они могут передавать информацию о своем текущем состоянии, текущих и планируемых действиях и т.п.

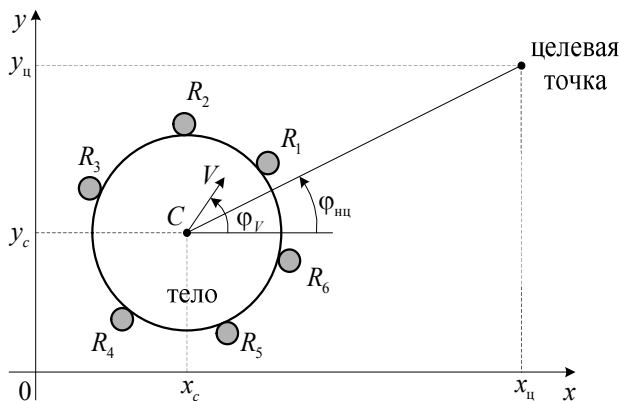


Рис. 5. Тело и группа роботов

Каждый робот  $R_i$  группы может изменять положение тела  $M$  с помощью силы тяги  $P_i$ , действующей под углом  $\varphi_i$  к оси  $x$ , как показано на рис. 6.

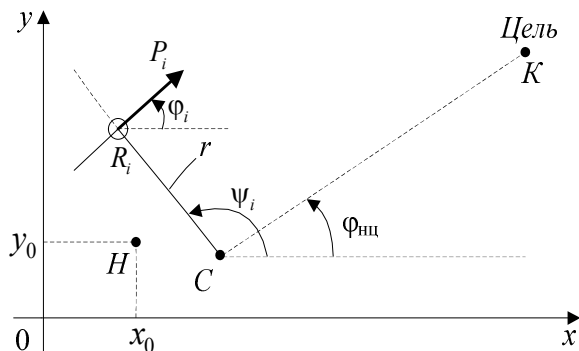


Рис. 6. Система координат

Кроме того, роботы имеют возможность изменять направление (четыре возможных значения) и продолжительность действия этой силы, придавая ей нулевое или максимальное значение. Таким образом, указанные выше множества  $\mathbf{A}_i$  в данном случае определяются выражением  $\mathbf{A}_i = \{P_i, m_i, l_i, \varphi_i\}$ , где

$$(9) \quad P_i = [0, P_0], \quad \varphi = \psi + k \frac{\pi}{2}, \quad k = 0, \pm 1, 2, \quad i = \overline{1, N}.$$

Здесь  $m_i$  – масса робота  $R_i$ ;  $l_i$  – характерный размер, определяющий положение его центра тяжести (точка  $C$ ). Так как в данном случае требуется переместить одно тело, т. е. цель одна, то  $\mu = 1$ . В дальнейшем опустим индекс  $\mu$  в обозначении цели и перейдем к формированию множеств  $\mathbf{T}$  и  $\mathbf{f}^\circ$ .

Поставленная цель и условия её достижения, в соответствии с изложенным выше, описываются множествами:

$$(10) \quad \mathbf{T} = \{\dot{V}(m', r', J', x_0, y_0, x_{ц}, y_{ц}, V_{\text{ном}})\},$$

$$(11) \quad \mathbf{f}^\circ = \{F_{\text{тр}}, M_{\text{тр}}\},$$

где  $\dot{V}(\cdot)$  – ускорение тела;  $m', r', J'$  – масса, радиус и момент инерции тела;  $x_0, y_0, x_{ц}, y_{ц}$  – координаты начальной и конечной (целевой) точки положения центра тяжести тела;  $V_{\text{ном}}$  – заданная скорость перемещения;  $F_{\text{тр}}, M_{\text{тр}}$  – сила и момент трения при движении и поворотах тела  $M$ , определяемые по данным сенсорных систем роботов.

Указанное в (10) действие – придание ускорения  $V$  и скорости телу с целью перемещения его на заданное расстояние, позволяет легко получить математическую модель процесса перемещения тела на основе «экспертного подхода». Согласно закону Ньютона, ускорение можно придать телу только с помощью силы, которая в общем случае вызывает его поступательное и вращательное движение. Эти движения возникают, если равнодействующая превышает силу трения, а создаваемый ею вращающий момент превышает момент сил трения. Соответствующая система нелинейных дифференциальных уравнений с учетом действий всех роботов группы имеет вид

$$(12) \quad m\ddot{x}_c = \sum_{i=1}^N P_i \cos \varphi_i - F_{\text{тр}}(\dot{x}_c),$$

$$(13) \quad m\ddot{y}_c = \sum_{i=1}^N P_i \sin \varphi_i - F_{\text{тр}}(\dot{y}_c),$$

$$(14) \quad J\ddot{\psi} = -\sum_{i=1}^N P_i r \sin(\psi_i - \varphi_i) - M_{\text{тр}}(\dot{\psi}),$$

где  $m$ ,  $r$ ,  $J$ ,  $x_c$  и  $y_c$  – масса, радиус, момент инерции и координаты центра тяжести тела с учетом массогабаритных параметров роботов группы  $R_1 \div R_N$ ;  $\psi_i$  – угол между осью  $x$  и радиусом тела, проведённым в точку на его боковой поверхности, где расположен робот  $R_i$ ;  $F_{\text{тр}}(\dot{x})$ ,  $F_{\text{тр}}(\dot{y})$  и  $M_{\text{тр}}(\dot{\psi})$  – проекции силы трения и момент трения, в общем случае зависящие от скорости тела [3]. Примем, что система уравнений (12)–(14) хранится в базе знаний каждого интеллектуального робота.

Сложность данной задачи группового управления в том, что роботы прикрепляются к телу случайно, не согласовываясь друг с другом и с предстоящим направлением перемещения тела. Однако они имеют возможность определять своё положение, положение тела и целевой точки в указанной системе координат. Кроме того, устройства управления роботов имеют информационные каналы связи друг с другом.

Предположим, что до начала перемещения тело неподвижно, т. е.  $\dot{x}_c(0) = 0$ ,  $\dot{y}_c(0) = 0$ ,  $\dot{\psi}_c(0) = 0$ ; отсутствуют требования к времени набора телом заданной скорости и трение мало, так что условия (5) и (7) выполняются, если кластер, сформированный для перемещения тела, состоит даже из одного робота.

Эффективность действий каждого робота группы в начальный момент времени в данном случае, согласно рис. 6, СГУ оценивает величиной проекции его силы тяги на линию, соединяющую начальную точку  $H(x_0, y_0)$  с целевой точкой.

Другими словами, оценка  $q_i$  (6) эффективности действий каждого робота  $R_i$  определяется выражением

$$(15) q_i = \begin{cases} P_i \cos(\psi_i - \psi_{\text{цц0}}), & \text{если } |\psi_i - \psi_{\text{цц0}}| \leq \frac{\pi}{4}, \\ P_i \sin(\psi_i - \psi_{\text{цц0}}), & \text{если } |\psi_i - \psi_{\text{цц0}}| > \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

Если в группе роботов  $R_1 \div R_N$  имеется робот, который располагается точно на линии, соединяющей начальную точку  $H(x_0, y_0)$ , с целевой точкой, т. е. если при некотором  $i^*$  имеет место равенство  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{цц0}}$ , то в соответствии с условиями (6), (7) и (15) в группе  $R_1 \div R_N$  сформируется кластер, состоящий именно из этого робота, и, соответственно, алгоритм формирования действий этого робота будет формироваться только устройством управления этого робота. С целью большей наглядности дальнейших выкладок, обозначим этот робот символом  $R$ .

Для оценки результативности своих действий роботу  $R$  необходима математическая модель процесса перемещения тела. Поэтому робот  $R$ , пользуясь заданной целевой задачей: «перемещение тела по горизонтальной поверхности» –  $\mathbf{T}$  (10) в условиях  $\mathbf{F}^0$  (11), «извлекает» из базы данных систему уравнений (12)–(14) и «полагает» в ней  $N=1$ ,  $R_i=R$ ,  $P_i=P$ ,  $\varphi_i=\varphi$ , т. е. адаптирует её к сложившимся условиям.

Так как ускорение тела в этом случае создаётся одной радиально направленной силой  $P$ , т. е. при  $\varphi = \psi$ , то направление скорости тела совпадает с направлением силы. С другой стороны, сила трения всегда направлена против скорости, поэтому существует некоторая сила  $F_{\text{тр}}(V_c)$ , при которой  $F_{\text{тр}}(x_c) = F_{\text{тр}}(V_c) \cos \varphi$ ,  $F_{\text{тр}}(y_c) = F_{\text{тр}}(V_c) \sin \varphi$ . Поэтому в случае, когда робот использует свое действие (9) лишь при  $k = 0, \pm 2$ , система уравнений (12)–(14) переходит в систему:

$$(16) m\ddot{x}_c = [P - F_{\text{тр}}(V_c)] \cos \varphi,$$

$$(17) m\ddot{y}_c = [P - F_{\text{тр}}(V_c)] \sin \varphi,$$

$$(18) J\ddot{\psi} = -Pr \sin(\psi - \varphi) - M_{\text{тр}}(\dot{\psi}),$$

где  $V_c = [(\dot{x}_c)^2 + (\dot{y}_c)^2]^{1/2}$  – скорость перемещения тела,  $\dot{\psi} = 0$ .

Из этих выражений следует, что в том случае, когда выполняется условие  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ ,  $i^* \in 1, \dots, N$  и сила трения  $F_{\text{тр}}(V) = 0$ , алгоритм формирования действий робота  $R$  состоит в следующем.

Робот  $R$  кластера определяет угол  $\varphi_{\text{нц0}}$ , задаёт радиальное направление силы тяги  $P = P_0$  в сторону цели, т. е. так, что  $\varphi = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\varphi = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ , до тех пор, пока тело не достигнет заданной скорости  $V_{\text{ном}}$ . В этот момент сила  $P$  полагается равной нулю, после чего тело движется по инерции. При приближении к цели тело тормозится, путем изменения направления силы тяги того же робота, и останавливается.

Подчеркнём, что численные значения всех указанных выше величин, в том числе и начальные значения координат и скоростей тела:  $x_c(0) = x_0$ ,  $y_c(0) = y_0$ ,  $\dot{x}_c(0) = \dot{x}_0$ ,  $\dot{y}_c(0) = \dot{y}_0$ , имеются в базе данных бортовых устройств управления роботом, а угол  $\varphi_{\text{нц0}}$ , определяется роботом  $R$  по данным его сенсорной системы.

Расстояние, с которого начинается торможение, определяется роботом  $R$  при  $F_{\text{тр}}(V) = 0$  по формуле

$$(19) l_{\text{торм}} = \frac{mV_{\text{ном}}^2}{2} P_0,$$

где  $V_{\text{ном}}$  – заданная скорость перемещения тела.

Приведём соответствующий алгоритм действий интеллектуального робота  $R$  по перемещению тела, реализуемый его устройством управления.

### Алгоритм 1

1. Определить угол  $\varphi_{\text{нц0}}$  и найти  $i^*$ , при котором имеет место равенство  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ . При невыполнении сформировать сообщение «Использовать другой алгоритм формирования кластера» и перейти к п. 9; при выполнении – перейти к п. 2.

2. Вычислить  $l_{\text{торм}}$  по (19) и перейти к п. 3.

3. Снять стояночный тормоз, включить силу тяги  $P$  при  $\varphi = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\varphi = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ . Если ускорение тела

$$(20) \dot{V}(t) = \sqrt{(\ddot{x}_c)^2 + (\ddot{y}_c)^2} \approx P_0 / m,$$



после включения силы тяги, перейти к п. 4. В противном случае перейти к алгоритму управления при наличии трения.

4. При выполнении условия

$$(21) \sqrt{(x_{цт} - x_c)^2 + (y_{цт} - y_c)^2} \geq l_{\text{торм}}$$

перейти к п. 5, в противном случае к п. 6.

5. При выполнении условия

$$(22) \sqrt{(\dot{x}_c)^2 + (\dot{y}_c)^2} \geq V_{\text{ном}}$$

положить  $P = 0$  и перейти к п. 4, в противном случае перейти к п. 4.

6. Положить  $\varphi = \varphi_{\text{нц}} + \pi$  или  $\varphi = \varphi_{\text{нц0}}$ ,  $P \neq 0$ , и перейти к п. 7.

7. При выполнении равенства

$$(23) \sqrt{(x_{цт} - x_c)^2 + (y_{цт} - y_c)^2} \geq \delta_{\text{ост}}$$

перейти к п. 8, в противном случае – к п. 7. Здесь  $\delta_{\text{ост}}$  – заданная погрешность приближения тела к целевой точке.

8. Положить силу тяги  $P = 0$ . Включить стояночный тормоз.

9. Конец.

Алгоритмы описанных процессов самоорганизации кластера, состоящего из робота с  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ , и формирования действий робота является полностью является формальным и, легко реализуется системой управления интеллектуального робота в автономном режиме. Скорость и траектория тела при использовании роботом алгоритма 1, полученные путем моделирования в *MATLAB* действий робота по перемещению тела при  $F_{\text{тр}}(V) = 0$ , приведены на рис. 7 и рис. 8.

Таким образом, если в группе роботов (рис. 5) найдется робот  $R_i$  с  $\psi_i = \varphi_{\text{нц0}}$  или  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{нц0}} + \pi$ , и трение будет малым, так что  $\dot{V}(t) \approx P_0/m$ , то процесс самоорганизации в группе роботов, состоит в построении кластера, состоящего из этого робота, извлечения из его базы знаний алгоритма 1 и адаптации его к текущей ситуации. Адаптация заключается в расчете пути торможения по формуле (19).

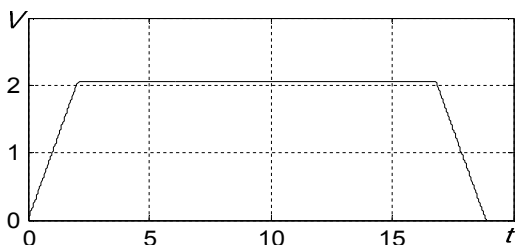


Рис. 7. Скорость тела

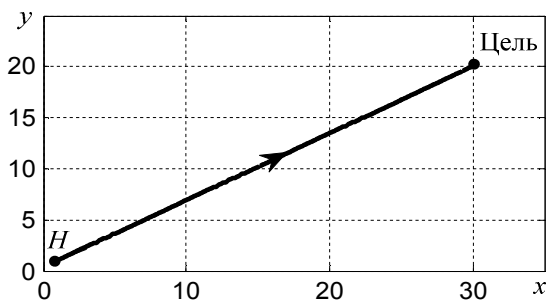


Рис. 8. Перемещение тела одним роботом

Ситуация существенно изменяется, если движение тела происходит с трением. В этом случае в зависимости от характера трения из системы уравнений (12)–(14) робот должен найти другое выражение для определения численного значения  $l_{\text{торм}}$ , предварительно путем пробных движений установив характер трения и его численные характеристики. Кроме того, робот должен сформировать алгоритм поддержания с некоторой точностью заданной скорости  $V_{\text{ном}}$  движения тела.

Поэтому при построении систем группового управления интеллектуальными роботами в рассматриваемом случае перемещения тела предлагается использовать следующие локальные правила (ЛП) самоорганизации.

**ЛП.1.** Если в группе (см. рис. 6) имеется робот  $R_i$  с  $\psi_i = \varphi_{\text{нц0}}$ , включить его в кластер по перемещению тела.

**ЛП.2.** Если трение отсутствует или пренебрежимо мало, т. е. если  $\dot{V}(t) \approx P_0/m$ , то применить алгоритм 1, начиная с п. 2.

**ЛП.3.** Если трение существенно и тяга одного робота  $R_i$  превышает силу трения покоя, т. е. ускорение  $0 < dV(t)/dt < P_0/m$  после включения силы тяги, то сформировать алгоритм управления с трением. Для этого совершить ряд пробных ускорений тела и по результатам наблюдений оценить характер и значение параметров силы трения. При этом могут использоваться следующие выражения:

а) если разность ускорений тела  $dV(t_{j+1})/dt - dV(t_j)/dt \approx 0$ , где  $t_{j+1} > t_j > 0, j = 1, 2, \dots$ , то

$$(24) F_{\text{тр}} = P_0 - m \frac{\dot{V}(t_j)}{t_j}, \quad j = 1, 2, \dots;$$

б) если разность ускорений тела

$$(25) \dot{V}(t_{j+1}) - \dot{V}(t_j) \approx C_v [V(t_{j+1}) - V(t_j)],$$

где  $C_v$  – некоторый коэффициент пропорциональности, то

$$(26) F_{\text{тр}}(t) = w_1 V(t) = m [(\dot{V}(t_{j+1}) - \dot{V}(t_j)) / (V(t_j) - V(t_{j+1}))] V(t),$$

$$j = 1, 2, \dots;$$

в) если разность ускорений тела

$$(27) \dot{V}(t_{j+1}) - \dot{V}(t_j) \approx C_v [V^2(t_{j+1}) - V^2(t_j)],$$

то

$$(28) F_{\text{тр}}(t) = w^2 |V(t)| V(t) =$$

$$= m [(\dot{V}^2(t_{j+1}) - \dot{V}^2(t_j)) / (V^2(t_j) - V^2(t_{j+1}))] |V(t)| V(t),$$

$$j = 1, 2, \dots$$

**ЛП.4.** Если тяга робота  $R_i$  не превышает силу трения покоя, т. е. ускорение  $dV(t)/d$  тела равно нулю после включения силы тяги (т. е.  $dV(t)/dt = 0$  при  $P_i = P$ ), то перейти к формированию нового кластера с несколькими роботами (этот случай здесь не рассматривается).

**ЛП.5.** Если тяга робота  $R_i$  превышает силу трения покоя, т. е.  $dV(t)/dt > 0$  при  $P_i = P$ , то по найденным характеристикам трения

рассчитать значение  $l_{\text{торм}}$ . При этом используются следующие выражения:

случай а)

$$(29) \quad l_{\text{торм}} = \frac{mV_{\text{НОМ}}^2}{2(P_0 + F_{\text{тр}})};$$

случай б)

$$(30) \quad l_{\text{торм}} = \frac{mV_{\text{НОМ}}}{w_1} - \frac{mP_0}{w_1^2} \ln \left( 1 + \frac{w_1 V_{\text{НОМ}}}{P_0} \right);$$

случай в)

$$(31) \quad l_{\text{торм}} = \int_{t_0}^{t_1} \frac{mV_{\text{НОМ}}\lambda - P_0 \text{tg}[\lambda(t - t_0)]}{m\lambda - w_2 V_{\text{НОМ}} \text{tg}[\lambda(t - t_0)]} dt,;$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{w_2 P_0}}{m} \text{tg}[\lambda(t - t_0)],$$

$$t_1 = t_0 + \lambda^{-1} \text{arctg} \left( V_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{w_2}{P_0}} \right),$$

где  $t_0$  – момент начала торможения, т. е. момент первого нарушения неравенства (21);  $t_1$  – момент окончания торможения.

**ЛП.6.** Так как модуль силы тяги робота может принимать лишь два значения либо 0, либо  $P_0$ , то для поддержания заданной скорости (после выполнения условия (22)) применяется следующий алгоритм управления:

$$(32) \quad P(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\varepsilon(t)| \leq \delta_V \\ P_0 \cdot \text{sign} \varepsilon(t), & \text{если } |\varepsilon(t)| > \delta_V, \end{cases}$$

$$\varphi = \begin{cases} \psi, & \text{если } \varepsilon > \delta_V \\ 0, & \text{если } |\varepsilon| \leq \delta_V \\ \psi + \pi, & \text{если } \varepsilon < -\delta_V, \end{cases}$$

где  $\varepsilon(t) = V_{\text{НОМ}} - V(t)$ ,  $V(t) = [(\dot{x}_c)^2 + (\dot{y}_c)^2]^{1/2}$ ,  $\delta_V$  – допустимая ошибка по скорости перемещения тела.

**ЛП.7.** После выполнения правил **ЛП.1–ЛП.6** перейти к реализации алгоритма 1, начиная с пункта 2 с учетом одного из

выражений (29)–(31) для  $l_{\text{торм}}$ , полученного по правилам ЛП.3 и ЛП.5, а также выражения (32).

Если в группе  $R_1 \div R_N$  не окажется робота, для которого выполняется условие  $\psi_i = \varphi_{\text{цц0}}$  или  $\psi_{i^*} = \varphi_{\text{цц0}} + \pi$ , то возникает альтернатива: сначала развернуть тело до указанного выше положения робота, а затем осуществлять движение к цели, или же сначала разогнать тело в некотором направлении  $\psi$ , а затем развернуть его так, чтобы направление скорости совпадало с направлением на цель.

Для выбора соответствующих правил самоорганизации, как и выше, используется критерий (6) оценки качества решения группой роботов задачи перемещения тела. Здесь возможно применение различных критериев: минимизация времени или пути перемещения, минимизация затрат топлива и др. Однако наиболее естественным критерием представляется минимизация времени перемещения тела.

Если применяется критерий минимизации времени перемещения тела и трение отсутствует или пренебрежимо мало, т. е.  $\dot{V}(t) \approx P_0/m$ , то, как показано в работе [3], более эффективными являются следующие действия робота: сначала повернуть тело так, чтобы направление силы тяги робота совпало с направлением на целевую точку, т. е.  $\varphi_i(t) = \varphi_{\text{цц}}(t)$ , а затем осуществлять движение в сторону цели. Поэтому в кластер по перемещению тела в этом случае включается робот  $R_i$ , для которого разность  $|\psi_i - \varphi_{\text{цц}}|$  минимальна, т. е.

$$R = R_{i^*}, \text{ где } i^* = \arg \min |\psi_i - \varphi_{\text{цц}}|.$$

При этом поворот тела целесообразно осуществлять оптимальным по быстрдействию управлением. Если трение отсутствует, то расчетные соотношения для определения моментов переключения направления силы тяги робота приведены в [3]. При наличии трения эти моменты переключения целесообразнее определять методом последовательных приближений с интегрированием уравнений (12)–(14).

При повороте тела одним роботом, кроме вращательного движения тело получает и поступательное перемещение. По-

этому после поворота тела на угол  $|\psi_i - \varphi_{\text{цн}}|$  оно приобретает некоторую линейную скорость. В связи с этим в процессе перемещения тела в направлении цели возникает необходимость коррекции в виде поворота тела на небольшой угол. Этот поворот осуществляется роботом также по алгоритму оптимального по быстродействию управления.

Таким образом, применение локальных правил самоорганизации ЛП.1–ЛП.7 с учетом изложенных замечаний приводит к формированию кластера в группе роботов и соответствующего алгоритма действий роботов этого кластера по перемещению ими тела.

Графики изменения во времени ряда переменных тела (углов: поворота тела  $\psi$ , направления на целевую точку  $\varphi_{\text{цн}}$ , направления линейной скорости  $\varphi_V$ ; угловой  $\omega$  и линейной  $V$  скорости тела и др.), полученные при перемещении тела одним роботом с  $\psi_{i^*} \neq \varphi_{\text{цн}0}$  путём моделирования в *MATLAB*, приведены на рис. 9. На рис. 10 приведена траектория перемещения тела к целевой точке.

Подчеркнем, что все приведенные выше соотношения и условия протекания процесса самоорганизации кластера и алгоритма действий его роботов являются аналитическими, т. е. могут быть выполнены вычислительными устройствами интеллектуальных роботов в автономном режиме с использованием данных, полученных от сенсорных систем роботов.

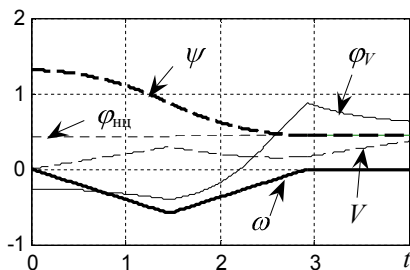


Рис. 9. Поворот тела роботом

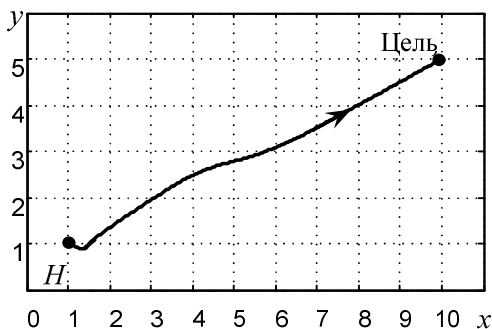


Рис. 10. Траектория перемещения тела

## 6. Анализ результатов

Проведенное исследование позволяет заключить, что процессы естественной самоорганизации определяются исключительно структурой системы, внешними условиями и законами природы. В то же время в процессах искусственной самоорганизации важную роль играют локальные правила самоорганизации. Существенно, что эти правила формулируются разработчиком самоорганизующейся системы. Для систем различных типов эти правила различны и определяются в основном типом элементов системы. При построении локальных правил самоорганизации в системах управления можно использовать известные законы управления, в частности, оптимальные управления и соответствующие критерии качества. Локальные правила самоорганизации являются многовариантными.

В результате переходных процессов в самоорганизующихся системах управления возникают «организованные структуры» – активные части, устойчивые в текущих условиях и ориентированные на достижение конкретного, целевого результата или состояния системы. Эти структуры и определяют целенаправленное движение объектов управления. При изменении условий такие системы «эволюционируют», изменяя свою структуру и переходя в новое устойчивое состояние.

Понятие сетевой модели таких структур в данном случае трактуется двояко: во-первых, это описание информационного взаимодействия элементов распределенной СГУ, представляющей собой информационно-вычислительную сеть, а во-вторых, это представление целевой задачи группы роботов в виде сетевой модели (сетевого графика). При «наложении» сетевой модели целевой задачи на сеть СГУ группы роботов, образуется СГУ кластера, как некоторой активной части группы роботов, предназначенной для решения конкретной целевой задачи.

## **7. Выводы**

1. Предложенный подход к самоорганизации систем группового управления интеллектуальными роботами заключается в том, что в группе роботов для решения поставленной целевой задачи формируется активная часть – кластер, роботы которого способны наиболее эффективно решить целевую задачу. При этом роботы группы руководствуются некоторыми локальными правилами самоорганизации, хранящимися в их памяти.

2. Результаты моделирования предложенных правил самоорганизации в группах интеллектуальных роботов на примере задачи перемещения некоторого тела подтверждают их работоспособность и эффективность.

3. Предложенный принцип самоорганизации систем группового управления интеллектуальными роботами отличается общностью подхода и может быть использован для решения проблемы самоорганизации других типов технических систем, например, информационно-управляющих систем сложных технических объектов, распределенных вычислительных систем, *Grid*-структур и т.д.



## Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А.Г. *Оптимальные и адаптивные системы*. – М.: Высшая школа, 1976. – 262 с.
2. ГАЙДУК А.Р. *Алгоритмическое обеспечение самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2002 – №3. – С. 56–63.
3. ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г., ШАПОВАЛОВ И.О. *Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009 – №7.
4. ДАНИЛОВ Ю.А. *Лекции по нелинейной динамике*.– М.: ПОСТМАРКЕТ, 2001. – 184 с.
5. КАЛЯЕВ И.А., ЛОХИН В.М., МАКАРОВ И.М. и др. *Интеллектуальные роботы* / Под общей ред. Е.И. Юревича. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.
6. КАЛЯЕВ И.А., ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г. *Методы и модели коллективного управления в группах роботов*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
7. КОЛЧИН А.Ф., ЕЛИСЕЕВА Н.В. *Представление модели знаний специалиста-проектировщика на основе онтологического подхода* // Информационные технологии в проектировании и производстве – 2006 – №3. – С. 66–69.
8. КРАСОВСКИЙ А.А., НАУМОВ А.И. *Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта* // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001 – №6. – С. 69–75.
9. НОВИКОВ Д.А. *Математические модели организации и функционирования команд*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с.
10. *От моделей поведения к искусственному интеллекту* / Под ред. В.Г. Редько. – М.: КомКнига, 2006. – 456 с.
11. ПРИГОЖИН И., КОНДЕПУДИ Д. *Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур*. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

12. ФРАДКОВ А.Л. *Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы*. – М.: Наука, 1990. – 296 с.
13. ЭШБИ У.Р. *Введение в кибернетику*. – М.: КомКнига, 2006. – 432 с.
14. BUSHEV M. *Synergetics: Chaos, Order, Self-Organization*. – Singapore: World Scientific Publisher. 1994.
15. GOLDBERG D., CICIRELLO V., DIAS M.B., SIMMONS R., SMITH S., STENTZ A. *Market-Based Multi-Robot Planning in a Distributed Layered Architecture / Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata: Proceedings from the 2003 International Workshop on Multi-Robot Systems, Kluwer Academic Publishers*. – 2003. – Vol. 2, – 27–38.
16. KOHONEN T. *Self-Organization and Associativ Memory*. – Berlin: Springer-Verlag, 1984.
17. SARIDIS G.N. *Self-Organization Control Stochastic Systems*. – New York: Marcel Dekker, 1977.

## **SELF-ORGANIZING DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS OF INTELLECTUAL ROBOT GROUPS CONSTRUCTED ON THE BASIS OF NETWORK MODEL**

**Igor Kaliaev**, Academician A.V. Kaliaev Scientific Research Institute of Multiprocessing Computing Systems of Southern Federal University, Taganrog, Director, Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences, professor ([kaliaev@mvs.sfedu.ru](mailto:kaliaev@mvs.sfedu.ru)).

**Sergey Kapustjan**, Academician A.V. Kaliaev Scientific Research Institute of Multiprocessing Computing Systems of Southern Federal University, Taganrog, Chief of department, Doctor of Sciences, ([kap@mvs.sfedu.ru](mailto:kap@mvs.sfedu.ru)).

**Roman Gajduk**, Technology Institute of Southern Federal University in Taganrog, Professor of Automatic Control Systems Chair, Doctor of Sciences, professor ([gaiduk\\_2003@mail.ru](mailto:gaiduk_2003@mail.ru)).

*Abstract: This article develops the methods of self-organization in distributed technical systems. In particular, principles and operation routines of self-organizing control systems for intellectual robot groups are studied. The approach is illustrated by the model example of moving some body in a surface by the group of intellectual robots. The results of simulation are presented.*

Keywords: intellectual mobile robot, group, group control, group control system, self-organization, self-organizing system, cluster.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Д. А. Новиковым*