УДК 004.942:519.713.4 DOI: 10.18698/2308-6033-2018-4-1754

Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств

© В.А. Алексеев, Д.С. Яковлев, А.А. Тачков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен подход к моделированию иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств. Приведен обзор существующих структур систем управления группами таких средств. Указаны основные недостатки систем управления, использующих только централизованный или децентрализованный подход при взаимодействии подгрупп наземных робототехнических средств. Предложено применение комбинированной структуры иерархической системы управления, отдельные уровни которой могут быть представлены в виде конечно-автоматных управляющих сетей. Приведена математическая постановка задачи моделирования подобной системы. Имитационная модель системы управления реализована в среде MATLAB, привязка к ландшафту и трехмерная визуализация движения наземных робототехнических средств осуществлена с помощью геоинформационной системы «Панорама». Результаты моделирования приведены на примере работы группы из десяти робототехнических средств. Сделан вывод о целесообразности применения комбинированной структуры системы группового управления наземными робототехническими средствами.

Ключевые слова: *централизованная система управления, децентрализованная система управления, иерархическая система управления, наземное робототехническое средство, конечно-автоматная управляющая сеть, геоинформационная система «Панорама»*

Введение. В настоящее время активно ведутся работы, посвященные проблемам группового управления распределенными техническими системами, в частности системами, в состав которых входят наземные робототехнические средства (НРТС) [1–4]. Основной тенденцией группового управления в области экстремальной робототехники является попытка достижения автономного решения задач, поставленных перед группой НРТС. Термин «автономность» в данном контексте следует считать достаточно условным, так как для задач военной робототехники присутствие оператора — обязательное условие для успешного выполнения стоящих перед группой НРТС задач [5].

В работе [5] рассмотрен подход к формализации тактических задач для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения (НРТК ВН), который позволяет оператору с помощью геоинформационной системы (ГИС) формировать и корректировать задачи для группы, а также представлено формальное описание системы оператор — группа НРТК ВН в рамках теоретико-множественного подхода. Однако в указанной работе не был рассмотрен вопрос организации

управления группой НРТС и, соответственно, моделирования действий группы как объекта управления.

Следует отметить, что при организации группового управления необходимо обеспечить взаимодействие территориально распределенных средств (абонентов) через коммуникационную среду. Качественное обеспечение такой сложной процедуры управления возможно лишь за счет использования принципа иерархической многоуровневой организации системы [6]. Согласно этому принципу, все функции управления взаимодействием абонентов системы распределены по уровням. Каждый уровень предоставляет для использования следующему более высокому в иерархии уровню определенный сервис (набор результатов, полученных при реализации функций данного уровня). Уровни организуются таким образом, чтобы обеспечивалась их функциональная независимость и прозрачность нижних уровней по отношению к данным, поступающим с более высокого уровня.

Настоящая статья посвящена вопросу моделирования иерархической системы управления группой НРТС и является логическим продолжением работы [5], развивая подход к организации управления в распределенных технических системах.

Постановка задачи. Один из этапов синтеза системы управления группой НРТС заключается в выборе структуры системы, отвечающей указанным выше требованиям и удовлетворяющей ограничениям по быстродействию, количеству управляемых объектов и функциональной гибкости.

Традиционно системы группового управления по типу структуры принято подразделять на централизованные и децентрализованные. Система управления, имеющая централизованную структуру, состоит из центрального устройства управления и совокупности НРТС. Центральное устройство управления осуществляет сбор информации с каждого НРТС и на основе полученной информации ставит задачу для каждого средства. Примерами проектов, в которых реализована такая структура системы управления, могут служить поиск маршрута группой наземных роботов [7], распределение задач в группе роботов [8], распределение ресурса в сенсорной сети [9]. Основным достоинством централизованной структуры управления является простота организации и алгоритмизации. К недостаткам можно отнести неспособность отдельных средств обмениваться между собой информацией и принимать решения в рамках элементарных задач. В результате этого такая система может работать только в стационарных средах [10], т. е. заранее известных и неизменяемых. Кроме того, система обладает низкой робастностью: при выходе одного объекта из строя нарушается вся работа системы без перераспределения ролей и требуется коррекция задачи оператором [11].

Децентрализованная система управления НРТС лишена подобных недостатков и предоставляет возможность межгруппового обмена для достижения поставленной цели. Взаимодействие объектов в системах с децентрализованной структурой рассмотрено в ряде работ, посвященных, например, расширенному венгерскому методу распределения задач [12], использованию мнения каждого объекта в решении общей задачи [13], методам управления, учитывающим потери в составе группы [14], применению генетических алгоритмов [15]. Однако имеются и недостатки децентрализованного подхода. Во-первых, для работы подобных систем необходимы помехозащищенные скоростные радиоканалы, во-вторых, существует методологическая сложность в формировании функционала, отражающего эффективность действий отдельных НРТС, на основе которого группа может корректировать свое поведение.

По мнению авторов, для группы НРТС рациональным решением будет применение комбинированной структуры системы управления, аналогичной системе, описанной в работе [16]: задачу ставит оператор, ее выполнение контролируется на верхнем уровне, но отдельные подзадачи в подгруппах могут выполняться автономно, без участия оператора с использованием внутригруппового взаимодействия НРТС и учетом пропускной способности каналов связи. Поскольку взаимодействие осуществляется путем взаимного обмена сообщениями, поведение НРТС можно представить множеством последовательностей элементарных событий, каждое из которых характеризует прием и передачу сообщения. Каждая такая последовательность элементарных событий может рассматриваться как автоматное событие, поэтому, согласно работе [6], наиболее приемлемой моделью при описании взаимодействия между элементами распределенной системы является конечный автомат.

В то же время при комбинированном подходе к построению структуры системы управления предполагается, что именно оператор ставит задачу для группы НРТС и контролирует ход ее выполнения. В настоящее время существует ряд программных средств, с помощью которых оператор формализует задачу для группы НРТС. Например, одно из программных средств базируется на использовании графического редактора ГИС [5]. Также ГИС позволяет организовать обратную связь, обеспечивая оператора визуальной информацией о положении, пространственной ориентации и состоянии всех доступных ему НРТС.

Общая структура системы группового управления подробно описана в работе [5]: оператор получает задачу от вышестоящего уровня управления и с помощью тактических знаков в ГИС формирует ре-

шение для группы НРТС (рис. 1). Это решение посредством специального транслятора преобразуется в сеть Петри, и на ее основе осуществляется синтез управляющих конечных автоматов как для отдельных НРТС, так и подгрупп.

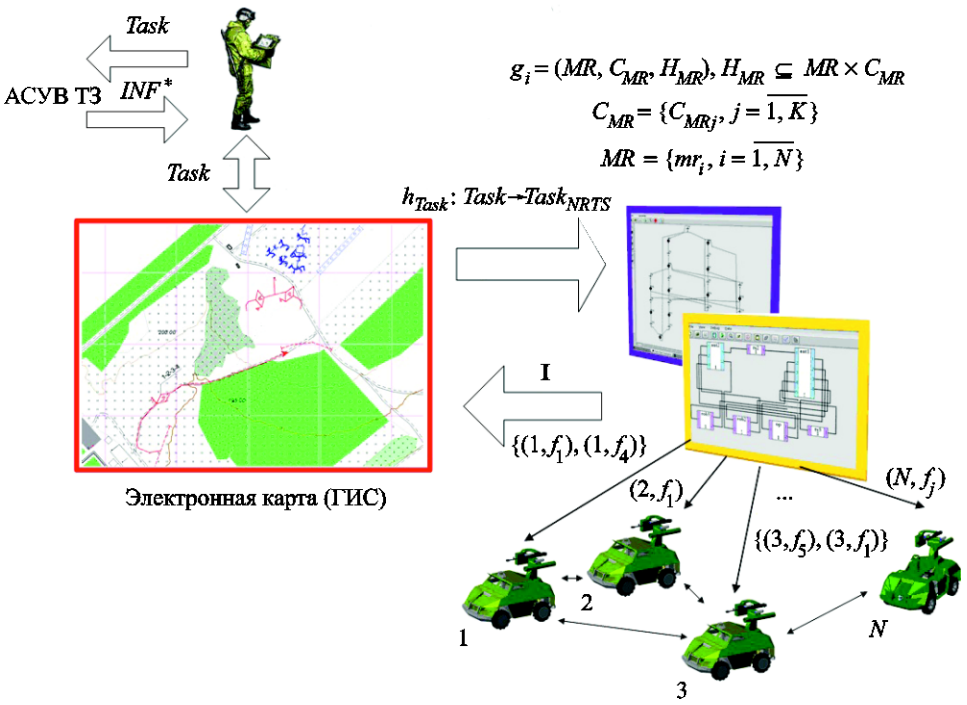


Рис. 1. Графическое пояснение к постановке задачи:
АСУВ ТЗ — автоматизированная система управления тактического звена; *INF** — информация, поступающая оператору от АСУВ ТЗ; *Task* — тактическая задача; **I** — информация, поступающая от группы НРТС

Задачу моделирования подобной системы управления группой НРТС можно представить следующим образом. Пусть каждое НРТС из множества $MR = \{mr_i,\ i = \overline{1,N}\}$ доступных оператору средств способно выполнять ряд элементарных действий f_i типа «движение по траектории», «перемещение в указанный район», «ведение разведки в указанном секторе» и др. Соответствие между каждым НРТС и действиями задается в виде

$$e = (MR, F, E),\ \ E \subseteq MR \times F,$$

где $F = \{f_i,\ i = \overline{1,m}\}$ — множество элементарных действий, которые могут выполнять НРТС.

Каждое *i*-е действие характеризуется множеством параметров

$$P_I^{(i)} = \left\{ p_{Ij}^{(i)},\ j = \overline{1, l^{(i)}} \right\},$$

где $l^{(i)}$ — количество параметров *i*-го действия.

Множество всех параметров индивидуальных элементарных действий

$$P_I = \bigcup_{i=1}^{m} P_I^{(i)}.$$

Аналогично множество элементарных групповых задач типа «инициализация подгруппы», «объединение подгрупп НРТС в группу», «движение строем» может быть представлено как

$$G = \left\{ g_i, i = \overline{1, n} \right\},$$

где $g_i = (MR, C_{MR}, H_{MR})$ — *i*-я элементарная групповая задача ($H_{MR} \subseteq MR \times C_{MR}$); $C_{MR} = \left\{ C_{MR\,j},\ j = \overline{1, K} \right\}$ — множество групповых алгоритмов.

Каждая *i*-я элементарная групповая задача характеризуется множеством $Par_G^{(i)}$ параметров:

$$Par_G^{(i)} = \left\{ par_{G\,j}^{(i)},\ j = \overline{1, k^{(i)}} \right\},$$

где $k^{(i)}$ — количество параметров *i*-й задачи.

Множество всех входных параметров задач $g_1, g_2, \ldots, g_n$

$$P_G = \bigcup_{i=1}^{n} Par_G^{(i)}.$$

Из множества типовых элементарных действий оператор составляет задачу для группы *Task*, которая представляет собой ориентированный граф $Task = (G, Par)$, $Par \subset G \times G$. Данная задача затем декомпозируется в зависимости от заданных алгоритмов C_{MR} в элементарные действия для отдельных НРТС. Таким образом, в системе образуется иерархия: оператор — контроль выполнения отдельных подзадач в *Task* — выполнение элементарной групповой задачи — выполнение элементарного действия.

Модель каждого уровня иерархии описывается автоматной сетью, которая реализует функции групповых или индивидуальных задач, выполняемых каждым из НРТС. Переключение между состояниями в автоматной сети определяется наступлением элементарных

событий, связанных с действиями НРТС, среды или оператора. Требуется смоделировать работу системы управления с комбинированной структурой.

Иерархическая модель группы НРТС. Иерархическая модель группы НРТС в соответствии с поставленной задачей состоит из трех уровней:

1) контроль выполнения этапов (подзадач) глобальной задачи $Task = (G, Par)$;

2) выполнение групповых задач $G = \{g_i, i = \overline{1,n}\}$, $g_i = (MR, C_{MR}, H_{MR})$;

3) выполнение индивидуальных задач $F = \{f_i, i = \overline{1,m}\}$.

Моделирование верхнего уровня управления выполняется с помощью блока «Модель декомпозиции глобальной задачи на подзадачи», который осуществляет разбиение глобальной задачи, представленной в виде сети Петри [5], на отдельные этапы g_i. Этот блок также осуществляет разбиение группы на подгруппы в соответствии с параметрами $par_{Gj}^{(i)}$, имитируя распределение ресурса оператором в рамках выполнения глобальной задачи [5]. Модель группы, состоящей из десяти НРТС, представлена блоками «Модель НРТС», где индекс блока соответствует номеру НРТС (рис. 2).

На вход каждого блока «Модель НРТС» поступает семь сигналов: номер средства в группе (присваивается каждому средству один раз), начальные координаты и ориентация НРТС, массоинерционные характеристики, принятые сообщения от других НРТС, задача, полученная от блока «Модель действий оператора».

На выходе каждого блока «Модель НРТС» формируются данные, передаваемые на сервер, обменивающийся информацией с ГИС, сообщение другому наземному средству группы или подгруппы, а также сигнал, разрешающий передачу сообщения. Обмен сообщениями между отдельными блоками «Модель робота» осуществляется по UDP-протоколу.

Выходные сигналы поступают в блок «Формирование сообщений», в котором происходит заполнение полей сообщения как для сервера (координаты и пространственная ориентация НРТС), так и для других НРТС в группе/подгруппе. Например, при выполнении задачи «движение в колонне» происходит обмен координатами между средствами одной подгруппы.

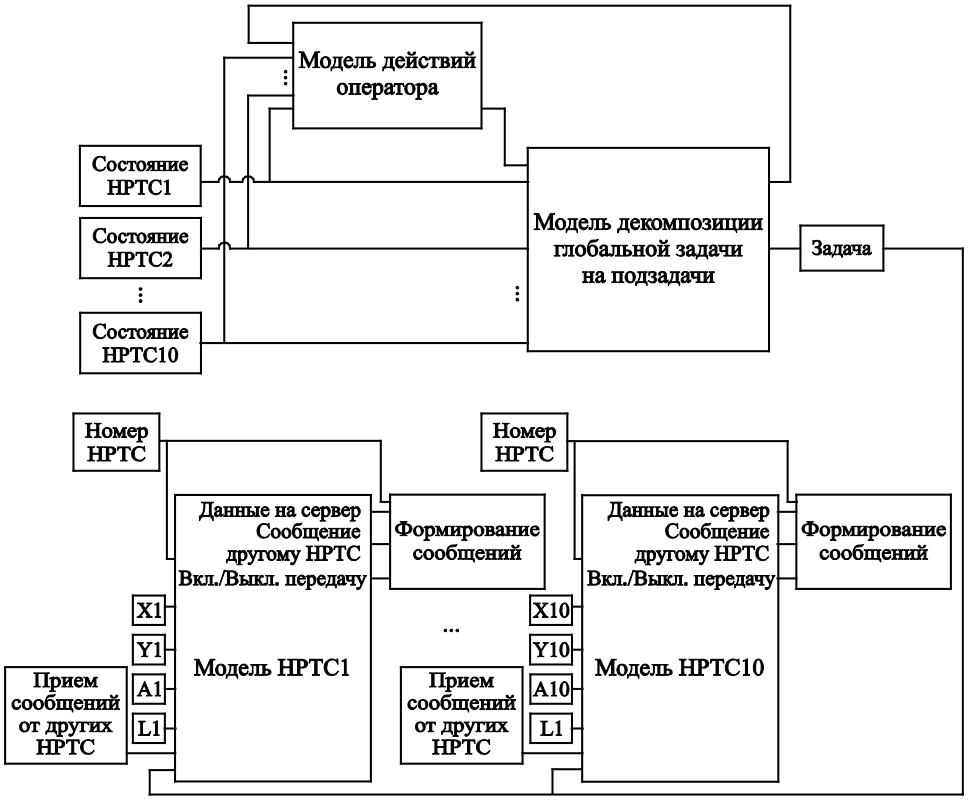


Рис. 2. Структура модели взаимодействия группы из десяти НРТС:
X1–X10, Y1–Y10 — начальные координаты X и Y НРТС1–НРТС10 соответственно;
A1–A10, L1–L10 — начальный азимут и длина базы НРТС1 и НРТС10 соответственно

Блок «Формирование сообщений» имитирует работу сетевого обмена в группе (рис. 3).

В блоке «Сообщение» формируется вектор из набора параметров: номер адресата, номер отправителя, передаваемые данные. В блоке «Разбор сообщения» из этого вектора выделяются номер НРТС-получателя и данные, которые ему необходимо отправить по UDP-протоколу.

Номер получателя поступает в блок «Идентификация получателя», который формирует разрешающий сигнал на один из 11 блоков (девять НРТС, пункт управления и широковещательная посылка).

Структура блоков «Модель НРТС1–НРТС10» приведена на рис. 4. Алгоритмы управления каждого НРТС распределены в трех блоках:

1) логический уровень выполнения индивидуальных действий НРТС;

2) групповой алгоритм;

3) контроль выполнения этапов задачи.

Такая иерархическая структура модели (см. рис. 4) позволяет разработчику вносить изменения в модель алгоритмов работы НРТС на любом уровне системы управления и оценивать качество ее работы.

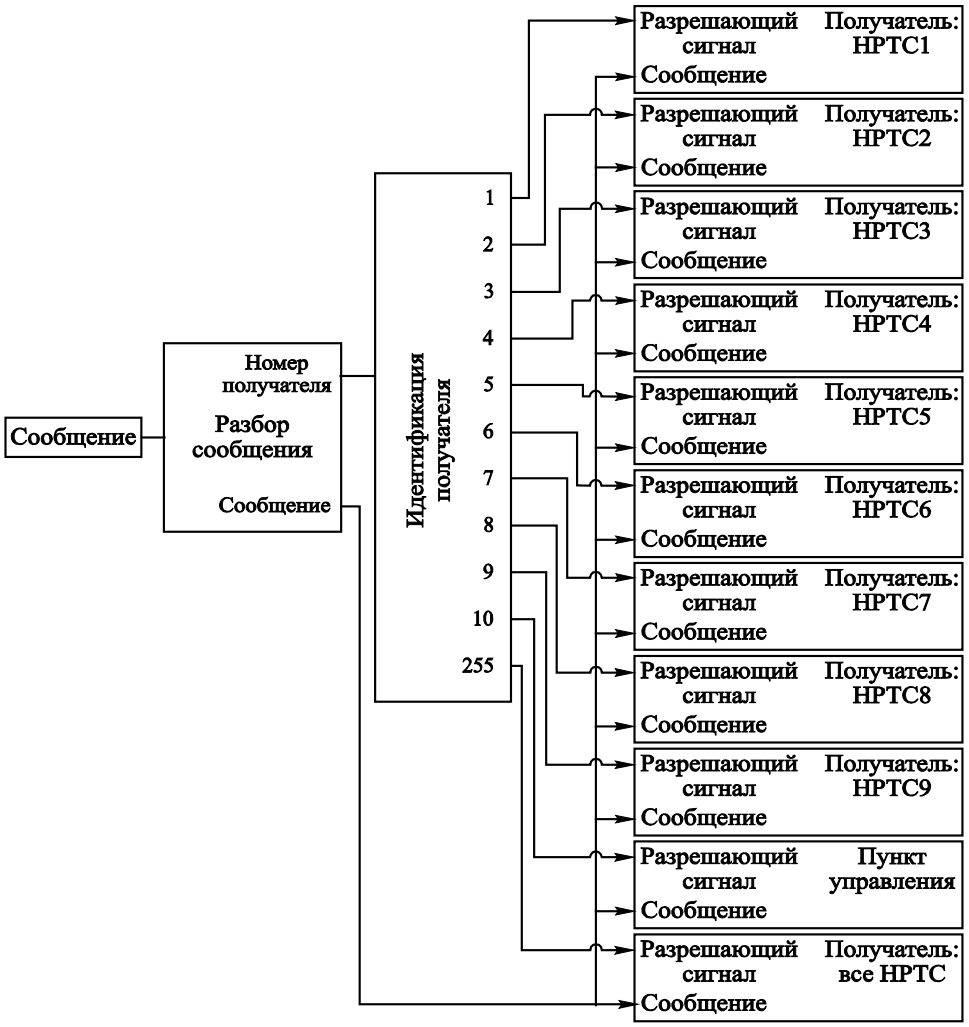


Рис. 3. Структура блока «Формирование сообщений» для НРТС10

В процессе выполнения задач необходимо учитывать внешние воздействия на систему, вызванные фактором стохастической неопределенности. Для этого предусмотрены блоки «Подыгрыш событий». Кроме того, в модели возможно добавление новых «индивидуальных задач» в блок «Логический уровень индивидуальных действий НРТС», что позволяет моделировать работу робототехнических средств различного целевого назначения.

Блок «Логический уровень индивидуальных действий НРТС» поддерживает, например, выполнение следующих задач:

f_1 — инициализация НРТС в подгруппе (осуществляется поиск номера члена подгруппы в списке номеров НРТС и определяется его роль в подгруппе); входными параметрами являются: $p_{I_1}^{(1)}$ — номер НРТС; $p_{I_2}^{(1)}$ — список номеров НРТС в подгруппе;

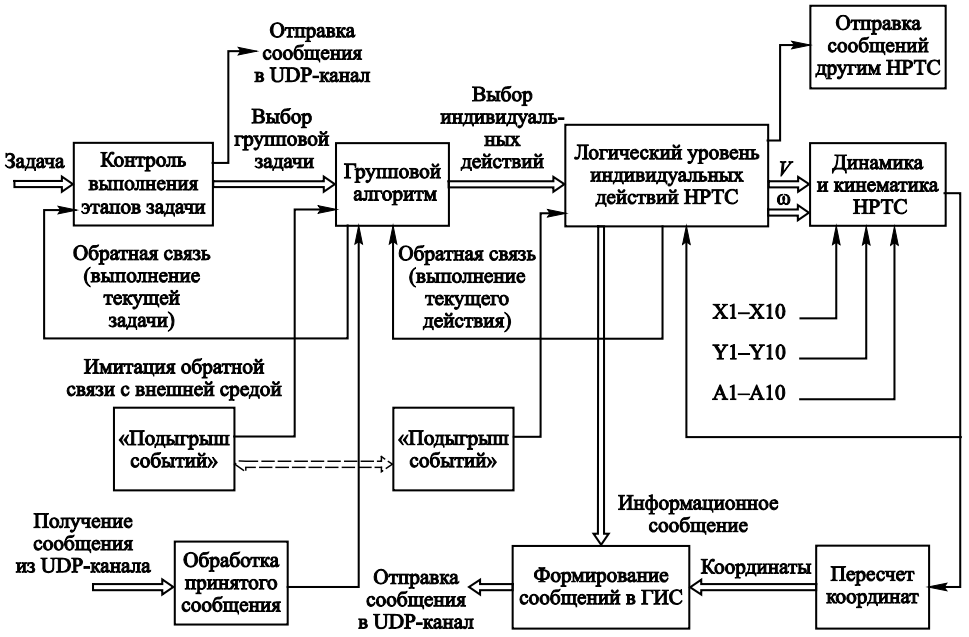


Рис. 4. Структура блока «Модель НРТС1–НРТС10»:
V — линейная скорость НРТС; ω — угловая скорость НРТС

f_2 — движение в окрестность заданной точки (индивидуальное движение НРТС в окрестность назначенной групповым алгоритмом точки); входными параметрами являются: $p_{I_1}^{(2)}$ — номер НРТС; $p_{I_2}^{(2)}$ — координаты точки; $p_{I_3}^{(2)}$ — требуемая скорость движения;

f_3 — движение в подгруппе; входными параметрами являются: $p_{I_1}^{(3)}$ — номер НРТС; $p_{I_2}^{(3)}$ — координаты траектории; $p_{I_3}^{(3)}$ — требуемая скорость движения; $p_{I_4}^{(3)}$ — признак ведущего в подгруппе; $p_{I_5}^{(3)}$ — номера ближайших соседей в подгруппе.

Блок «Групповой алгоритм» осуществляет, например, моделирование выполнения следующих задач в подгруппе:

g_1 — инициализация (формирование задачи инициализации для индивидуального уровня управления НРТС в каждой подгруппе, формирование вектора подгрупп, участвующих в задаче *Task*); входными параметрами являются: $p_{G_1}^{(1)}$ — номер НРТС; $p_{G_2}^{(1)}$ — список номеров НРТС, участвующих в выполнении задачи; $p_{G_3}^{(1)}$ — разрешающий сигнал; $p_{G_4}^{(1)}$ — данные обратной связи с уровнем индивидуальных действий;

g_2 — формирование строя (выполнение задачи построения подгруппы на рубеже и при остановке после движения строем); вход-

ными параметрами являются: $p_{G_1}^{(2)}$ — координаты рубежа; $p_{G_2}^{(2)}$ — последовательность номеров НРТС при построении на рубеже; $p_{G_3}^{(2)}$ — разрешающий сигнал; $p_{G_4}^{(2)}$ — данные обратной связи с уровнем индивидуальных действий;

g_3 — движение в подгруппе по траектории (решение задачи движения подгруппы по траектории строем), входными параметрами являются: $p_{G_1}^{(3)}$ — тип строя; $p_{G_2}^{(3)}$ — координаты траектории; $p_{G_3}^{(3)}$ — требуемая скорость движения; $p_{G_4}^{(3)}$ — признак ведущего в подгруппе; $p_{G_5}^{(3)}$ — номера соседей в строю; $p_{G_6}^{(3)}$ — данные обратной связи с уровнем индивидуальных действий.

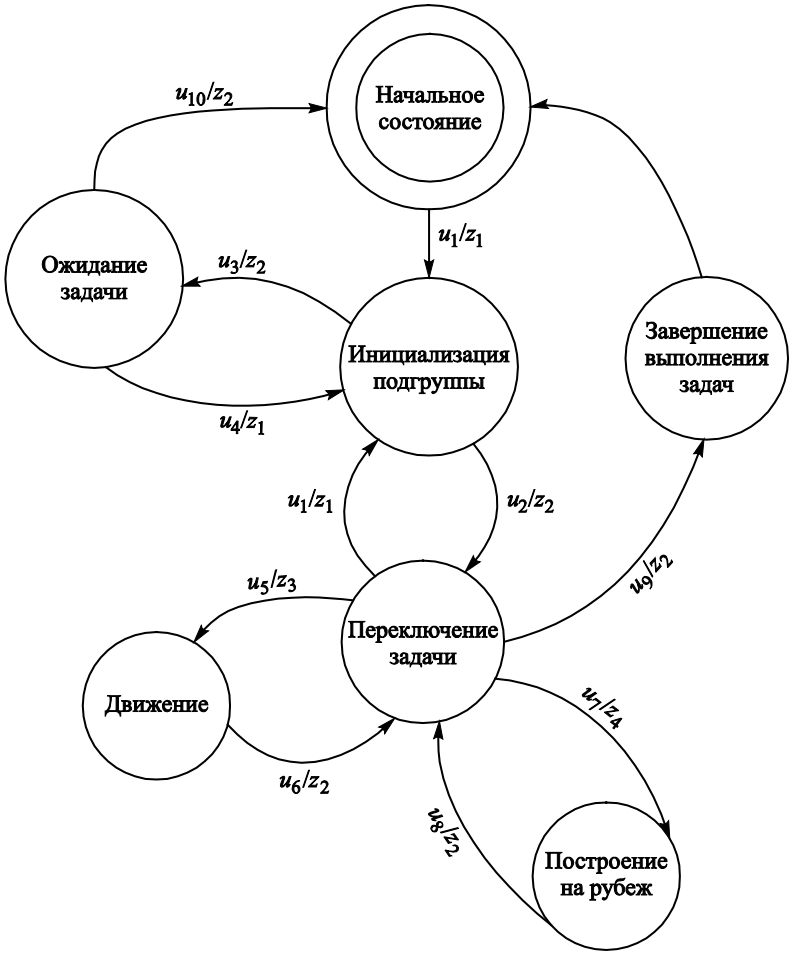


Рис. 5. Диаграмма работы конечного автомата блока «Контроль выполнения этапов задачи»

Блок «Контроль выполнения этапов задачи» контролирует последовательность выполнения глобальной задачи, сформированной оператором для подгруппы НРТС, и выполняет запуск автоматов в блоке «Групповой алгоритм». В качестве примера на рис. 5 приведена диаграмма работы конечного автомата блока «Контроль выполнения этапов задачи».

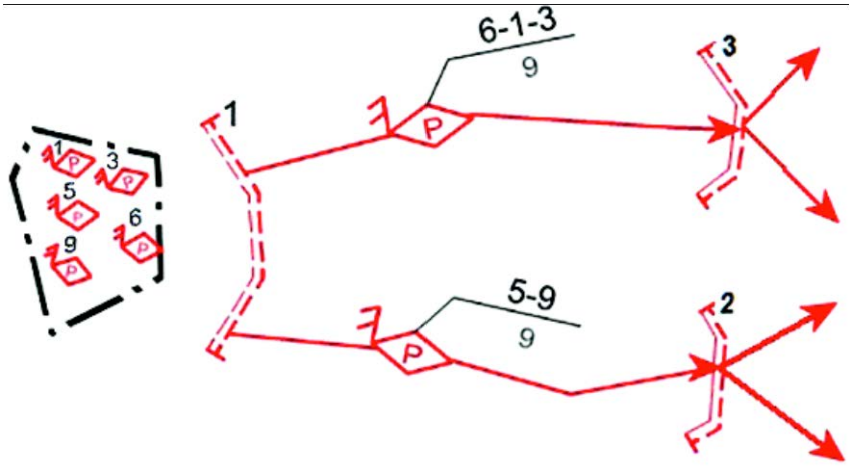
Данный автомат принимает на вход следующие сигналы (символы алфавита): u_1 — задача инициализации; u_2 — инициализация завершена; u_3 — инициализация не завершена; u_4 — НРТС не состоит в подгруппе и нет задачи; u_5 — движение по траектории; u_6 — движение по траектории завершено; u_7 — задача построения на рубеж; u_8 — построение на рубеж завершено; u_9 — НРТС выполнило задачи и перешло в состояние «свободный»; u_{10} — сигнал останова.

Выходными сигналами автомата являются: z_1 — выполнить инициализацию; z_2 — нет задачи; z_3 — выполнить движение по траектории; z_4 — выполнить построение на рубеже.

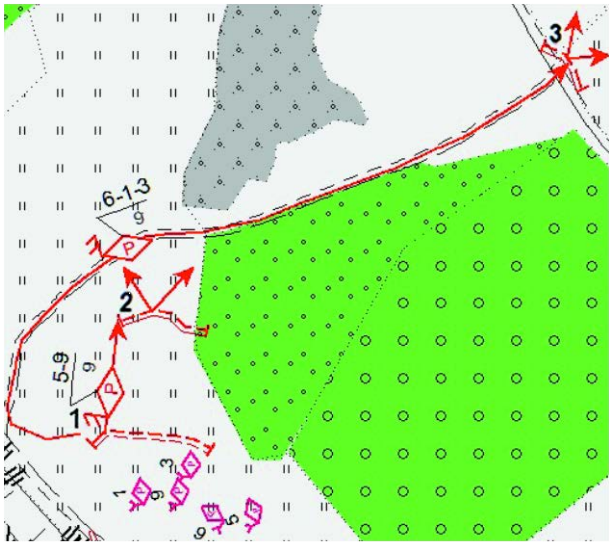
Данный автомат контролирует выполнение задачи подгруппы, осуществляет включение требуемого участка автоматной сети групповых алгоритмов и оповещает оператора о состоянии выполнения задачи.

Пример моделирования разведывательной задачи. Поясним приведенные выше рассуждения на примере. Рассмотрим выполнение группой НРТС разведывательной задачи, которая заключается в выходе подгрупп НРТС на рубеж наблюдения и ведении наблюдения в заданном секторе в течение заданного времени. По замыслу оператора операция организуется следующим образом (рис. 6, *а*). Вначале группа в составе пяти НРТС выполняет групповую задачу $g_2\left(p_{G_1}^{(2)}, p_{G_2}^{(2)}, p_{G_3}^{(2)}\right)$, где $p_{G_1}^{(2)} = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ — вектор координат исходного рубежа; $p_{G_2}^{(2)} = (9, 5, 3, 1, 6)$ — последовательность НРТС при построении на исходном рубеже; $p_{G_3}^{(2)} = 1$ — разрешающий сигнал. Задача g_2 подразумевает построение группы на исходном рубеже 1, находящемся на расстоянии 75 м от района начального расположения средств. В частности, для этого каждое *i*-е НРТС выполняет индивидуальную задачу $f_2\left(p_{I_1}^{(2)}, p_{I_2}^{(2)}, p_{I_3}^{(2)}\right)$, где $p_{I_1}^{(2)} = i$ — номер НРТС; $p_{I_2}^{(2)} = (x_i, y_i)$ — занимаемое *i*-м НРТС место на рубеже; $p_{I_3}^{(2)} = V$ — скорость движения.

Далее каждое НРТС выполняет групповую задачу «инициализация подгруппы» $g_1\left(p_{G_1}^{(1)}, p_{G_2}^{(1)}, p_{G_3}^{(1)}\right)$, где $p_{G_1}^{(1)} = i$; $p_{G_2}^{(1)} = \{(6, 1, 3), (5, 9)\}$; $p_{G_3}^{(1)} = 1$. В соответствии с этой задачей каждое НРТС, в частности, выполняет задачу f_1 — поиск номера члена подгруппы в списке номеров НРТС.



а



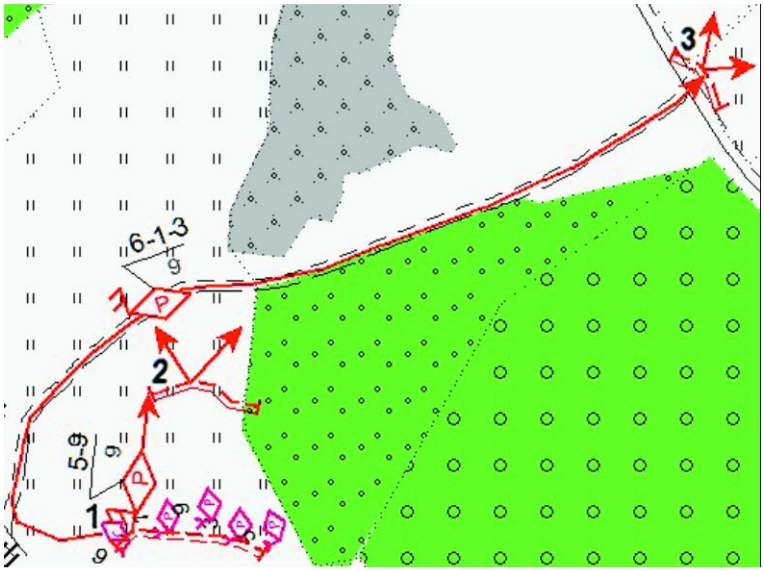
б

Рис. 6. Задача разведки в виде условных тактических знаков (*а*) и с привязкой к местности в ГИС (*б*)

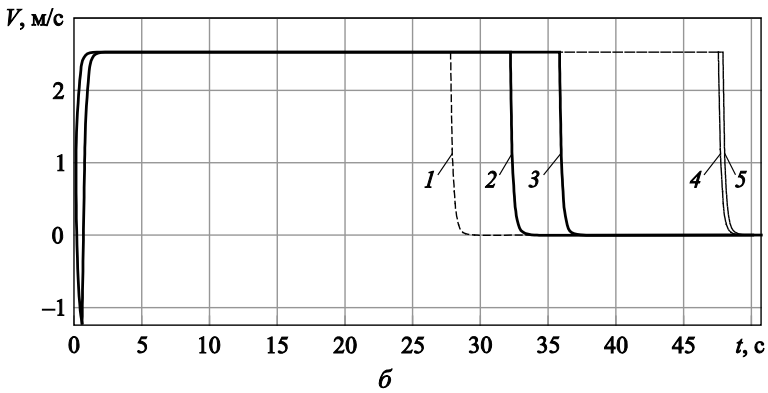
В результате выполнения задачи g_1 группа разделяется на две подгруппы, каждая из которых начинает выполнять свою групповую задачу. Первая подгруппа, состоящая из НРТС с номерами 5 и 9, выполняет задачу g_3 движения в свободном строю к рубежу 2 со скоростью 9 км/ч и занимает рубеж для выполнения задачи наблюдения в заданном секторе. Одновременно с ней подгруппа, состоящая из НРТС с номерами 6, 1 и 3, выполняет перемещение колонной на рубеж 3 по заданной траектории. Средняя скорость движения задается равной 9 км/ч, интервал между НРТС — 15 м. В соответствии с поставленной задачей на рис. 6, *а* сформирована схема ее последова-

тельного выполнения в виде условных тактических знаков. Это решение оператора и исходное расположение группы с привязкой к местности приведены на рис. 6, *б*. Часть семантических характеристик скрыта.

Первым этапом при выполнении замысла оператора является выход группы НРТС на исходный рубеж. На рис. 7, *а* показано расположение группы на исходном рубеже, полученное в ходе моделирования, а на рис. 7, *б* — график зависимости скорости отдельных НРТС в группе. На графике видно, что НРТС последовательно прибывают на рубеж в соответствии с параметром $p_{G_2}^{(2)}$ групповой задачи g_2 — «формирование строя».



а



б

Рис. 7. Результаты моделирования выхода группы на исходный рубеж:
1 — НРТС6; *2* — НРТС1; *3* — НРТС9; *4* — НРТС5; *5* — НРТС3

После разбиения группы НРТС на две подгруппы, первая подгруппа (НРТС с номерами 5 и 9) получает задачу выхода на рубеж 2 ведения наблюдения. Результат моделирования этой задачи представлен в виде графика скоростей перемещения НРТС5 и НРТС9 (рис. 8). На графике видно, что перемещение НРТС в подгруппе выполняется в заданной оператором последовательности, при этом движение НРТС начинают одновременно, так как первой группе ставится задача выхода на рубеж действия в свободном строю.

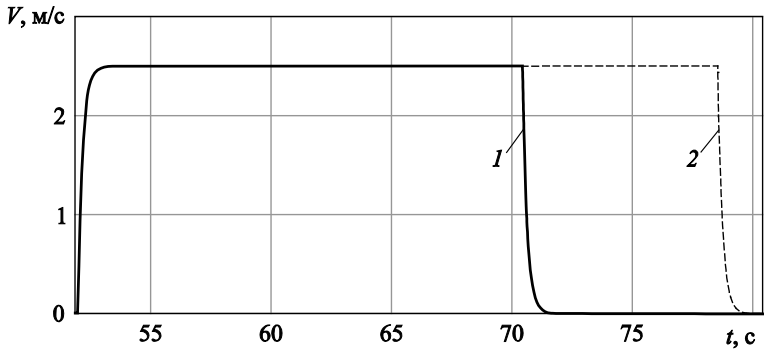


Рис. 8. График скорости движения НРТС первой подгруппы при выходе на рубеж 2:
1 — НРТС5; *2* — НРТС9

Вторая подгруппа (НРТС с номерами 1, 3 и 6) выполняет перемещение в колонне для занятия рубежа 3 (см. рис. 6). В соответствии с требованием оператора движение в подгруппе осуществляется с поддержанием заданного интервала между отдельными средствами подгруппы. Для этого НРТС обмениваются информацией о местонахождении соседа в колонне. Каждое НРТС корректирует свою скорость в соответствии с принятой информацией о соседе: либо уменьшает скорость для увеличения интервала, либо увеличивает, стараясь догнать соседа. Состояние выполнения движения по траектории можно наблюдать в режиме реального времени в ГИС. На электронной карте видно (рис. 9, *а*), что первая подгруппа достигла рубежа 2, а вторая подгруппа выполняет движение в колонне. На рис. 9, *б* приведены скорости движения НРТС второй подгруппы.

Для корректного формирования строя каждому последующему члену подгруппы с группового уровня управления задача g_3 — «движение в строю» передается на индивидуальный уровень в виде задачи f_3 с временной задержкой, чтобы последующий член подгруппы мог догнать соседа для восстановления строя. Кроме того, видно, что НРТС3, получившее задачу последним, было вынуждено догонять строй, после чего присоединилось к колонне.

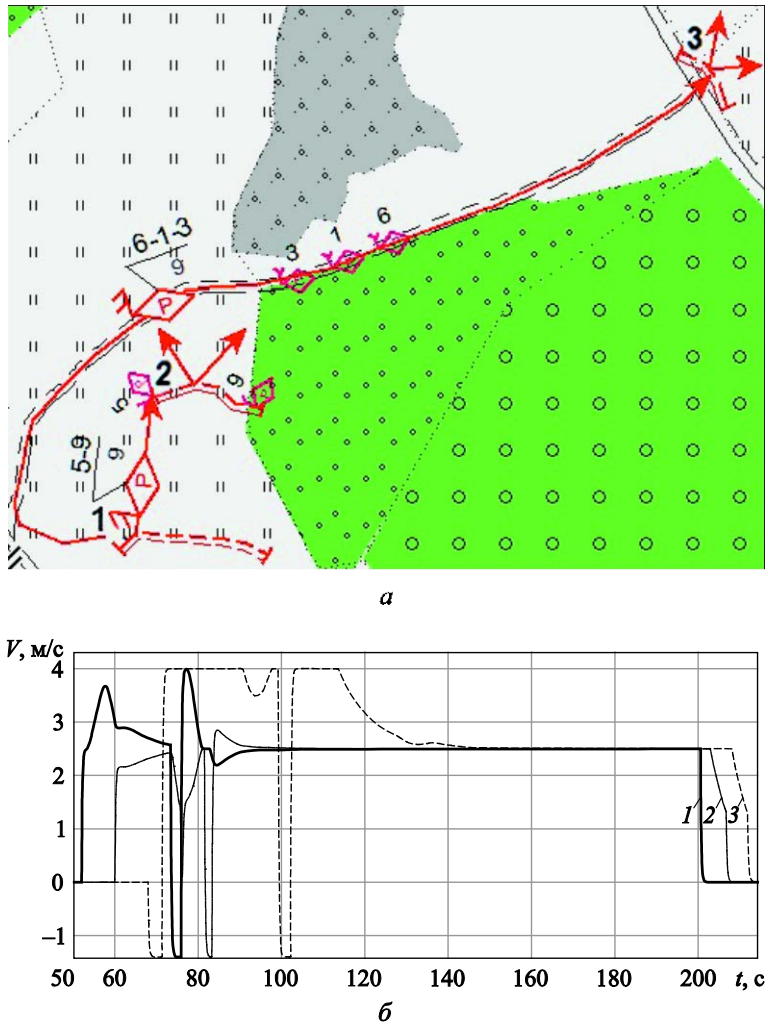


Рис. 9. Результаты моделирования движения второй подгруппы на рубеж 3:
1 — НРТС6; *2* — НРТС1; *3* — НРТС3

Участки с отрицательной линейной скоростью характеризуют следующую ситуацию. Траектория движения задается набором опорных точек. Движение НРТС по траектории осуществляется методом пропорционального наведения в эти точки. Для исключения перемещения НРТС по большим радиусам в модель движения НРТС введен маневр «разворот в ограниченном пространстве в два приема». Необходимость выполнения такого маневра определяется в блоке «Динамика и кинематика НРТС» при моделировании движения: при рассогласовании угла ориентации робота и угла визирования на точку траектории более чем на 60° НРТС движется назад и одновременно выполняет разворот до момента сокращения угла рассогласования, после чего осуществляет наведение в точку.

Одним из преимуществ исследования иерархической модели системы управления является то, что можно контролировать, какие задачи поступили тому или иному объекту в конкретный момент времени. На рис. 10 видно, что сначала всем НРТС в группе была поставлена задача «выход на рубеж свободным строем» (код задачи 2). Каждый НРТС, достигнувший рубежа 1, получил задачу «переход в режим ожидания» (код задачи 0). По достижении всеми НРТС подгруппы рубежа 1 первой подгруппе была поставлена задача выхода на рубеж 2 свободным строем (код задачи 2), а второй подгруппе — задача «движение в колонне» на рубеж 3 (код задачи 3). Поставленная задача *Task* считается выполненной, когда обе подгруппы достигнут заданных рубежей действия и выполнят задачу наблюдения.

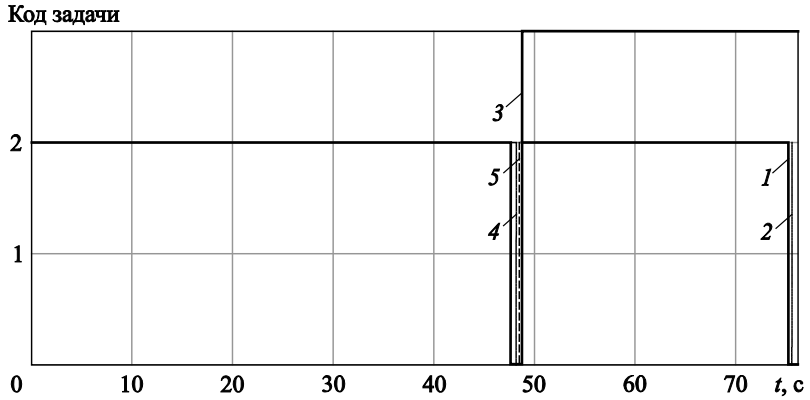


Рис. 10. Временная диаграмма получения задач для НРТС в подгруппе:
1 — НРТС5; *2* — НРТС9; *3* — НРТС6; *4* — НРТС1; *5* — НРТС3

В рассмотренном примере отражен ряд достоинств моделирования иерархической структуры системы управления: возможность предоставления интересующей исследователя информации (в данном случае скорость НРТС); отслеживание последовательного выполнения задач; взаимодействие НРТС между собой как элемент децентрализованного управления.

Заключение. Представленная в работе иерархическая модель системы управления группой НРТС реализует комбинированную структуру системы управления, включающую в себя элементы как централизованного, так и децентрализованного управления. Формальное представление отдельных уровней системы в виде сетей конечных автоматов позволяет, во-первых, оценить качество того или иного алгоритма управления НРТС по критерию пригодности, во-вторых, верифицировать модель объекта управления и на ее основе осуществить формальный синтез управляющих автоматов [17].

Рассмотренный пример моделирования разведывательной задачи подтверждает целесообразность разработки комбинированных си-

стем группового управления НРТС. По полученным результатам можно сделать вывод, что построение систем группового управления НРТС с комбинированной структурой и представление отдельных уровней системы в виде конечных автоматов предоставляет разработчику широкий спектр возможностей, в частности, позволяет оценить качество и эффективность различных методов управления.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Лапшов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В., Рудианов Н.А. Перспективы разработки автономных наземных робототехнических комплексов специального назначения. *Изв. ЮФУ. Технические науки*, 2016, № 1, с. 156–168.

[2] Шеремет И.А., Шеремет И.Б., Ищук В.А. К вопросу о системной оценке эффективности робототехнических комплексов военного назначения с использованием инновационных технологий на базе моделирования военных действий. *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*, 2014, № 4, с. 21–26.

[3] Шеремет И.Б., Рудианов Н.А., Рябов А.В., Хрущев В.С. О необходимости разработки концепции построения и применения автономных робототехнических комплексов военного назначения. *Экстремальная робототехника*, 2016, т. 1, с. 35–39.

[4] Акименко Т.А., Аршакян А.А., Рудианов Н.А. Управление группами роботизированных платформ. *Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки*, 2015, № 8, с. 200–208.

[5] Максимов А.А., Тачков А.А., Малыхин А.Ю., Рудианов Н.А. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16*, 2017, № 7–8 (109–110), с. 88–96.

[6] Апраксин Ю.К. *Управление информационным взаимодействием в распределенных технических системах: конечно-автоматный подход*. Москва, Вузовский учебник, 2017, 184 с.

[7] Liu C., Kroll A. A centralized multi-robot task allocation for industrial plant inspection by using a* and genetic algorithms. *Proceedings of the 11th International Conference, ICAISC 2012 "Artificial Intelligence and Soft Computing", Zakopane, Poland, April 29–May 3, 2012. Part II.* Springer Publ., 2012, pp. 466–474.

[8] Al-Yafi K., Lee H., Mansouri A. Mtap-masim: a multi-agent simulator for the mobile task allocation problem. *IEEE International Workshop on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises*, 2009, pp. 25–27.

[9] Coltin B., Veloso M. Mobile robot task allocation in hybrid wireless sensor networks. *IEEE/RSJ International Conference on IROS*. Taipei, 2010, pp. 2932–2937.

[10] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов*. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2009, 280 с.

[11] Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Александрова Р.И. Смешанные стратегии группового управления в многоагентных робототехнических системах. *Изв. ЮФУ. Технические науки*, 2012, № 3, с. 8–13.

[12] Giordani S., Lujak M., Martinelli F. A distributed algorithm for the multi-robot task allocation problem. *Proceedings of 23rd International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems IEA/AIE 2010: Trends in Applied Intelligent Systems Cordoba, Spain, June 1–4, 2010. Part I.* Springer Publ., 2010, pp. 721–730.

[13] Han-Lim C., Brunet L., How J. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 912–926.

[14] Elmogy A. *Market-based framework for mobile surveillance systems. Ph.D. Thesis*. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo Publ., 2010.

[15] Ping-An G., Zi-Xing C., Ling-Li Y. Evolutionary computation approach to decentralized multirobot task allocation. *International Conference on Natural Computation (ICNC)*, 2009, pp. 415–419.

[16] Назарова А.В., Рыжова Т.П. Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-251

[17] Максимов А.А. Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-244

Статья поступила в редакцию 19.02.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алексеев В.А., Яковлев Д.С., Тачков А.А. Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 4.
http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-4-1754

Алексеев Виталий Анатольевич — магистрант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: vitaly95@bk.ru

Яковлев Дмитрий Сергеевич — магистрант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: yakovlevdms@mail.ru

Тачков Александр Анатольевич — канд. техн. наук, начальник отдела «Автоматизированные транспортные системы» НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: tachkov@bmstu.ru

Modeling the hierarchical control system for a group of ground-based robotic tools

© V.A. Alekseev, D.S. Yakovlev, A.A. Tachkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article considers an approach to the modeling the hierarchical control system for a group of ground-based robotic tools. The review of existing structures of systems for control of such tool group is given. The main drawbacks of control systems using only a centralized or decentralized approach in the interaction of ground-based robotic tool subgroups are indicated. The application of the hierarchical control system combined structure is proposed. The individual levels of such structure can be represented in the form of finite-automatic control networks. A mathematical formulation of the problem of modeling a similar system is given. The simulation model of the control system is implemented in the MATLAB, geo-referencing to the landscape and 3D visualization of the ground-based robotic tool movement is implemented with the Panorama geoinformation system. The simulation results are given on the example of the group of ten robotic tool operation. It is concluded that using the combined structure of a group control system for ground-based robotic tools is advisable.

Keywords: *centralized control system, decentralized control system, hierarchical control system, ground robotic tools, finite-automatic control network, geoinformation system "Panorama"*

REFERENCES

[1] Lapshov V.S., Noskov V.P., Rubtsov I.V., Rudianov N.A. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya of Southern Federal University. Engineering Sciences*, 2016, no. 1, pp. 156–168.

[2] Sheremet I.A., Sheremet I.B., Ishchuk V.A. *Oboronnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii (Defense complex for scientific and technical progress of Russia)*, 2014, no. 4, pp. 21–26.

[3] Sheremet I.B., Rudianov N.A., Ryabov A.V., Khruschev V.S. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika — Robotics and technical cybernetics*, 2016, no. 3 (12), pp. 14–17.

[4] Akimenko T.A., Arshakyan A.A., Rudianov N.A. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2015, no. 8, pp. 200–208.

[5] Maksimov A.A., Tachkov A.A., Malykhin A.Yu., Rudianov N.A. *Voprosy oboronnoy tekhniki — Problems of Defense Technology. Series 16*, 2017, no. 7–8 (109–110), pp. 88–96.

[6] Apraksin Yu.K. *Upravlenie informatsionnym vzaimodeystviem v raspredelennykh tekhnicheskikh sistemakh. Konechno-avtomatnyy podkhod* [Information interaction control in distributed technical systems. Finite automaton approach]. Moscow, Vuzovskiy uchebnik Publ., 2017, 184 p.

[7] Liu C., Kroll A. A centralized multi-robot task allocation for industrial plant inspection by using a* and genetic algorithms. *Proceedings of the 11th International Conference, ICAISC 2012 "Artificial Intelligence and Soft Computing", Zakopane, Poland, April 29–May 3, 2012. Part II.* Springer Publ., 2012, pp. 466–474.

[8] Al-Yafi K., Lee H., Mansouri A. Mtap-masim: a multi-agent simulator for the mobile task allocation problem. *IEEE International Workshop on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises*, 2009, pp. 25–27.

[9] Coltin B., Veloso M. Mobile robot task allocation in hybrid wireless sensor networks. *IEEE/RSJ International Conference on IROS*. Taipei, 2010, pp. 2932–2937.

[10] Kalyayev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 280 p.

[11] Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Romanov M.P., Alexandrova R.I. *Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki — Izvestiya of Southern Federal University. Engineering Sciences*, 2012, no. 3, pp. 8–13.

[12] Giordani S., Lujak M., Martinelli F. A distributed algorithm for the multi-robot task allocation problem. *Proceedings of 23rd International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems IEA/AIE 2010: Trends in Applied Intelligent Systems Cordoba, Spain, June 1–4, 2010. Part I.* Springer Publ., 2010, pp. 721–730.

[13] Han-Lim C., Brunet L., How J. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, vol. 25, no. 4, pp. 912–926.

[14] Elmogy A. *Market-based framework for mobile surveillance systems. Ph.D. Thesis*. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo Publ., 2010.

[15] Ping-An G., Zi-Xing C., Ling-Li Y. Evolutionary computation approach to decentralized multirobot task allocation. *International Conference on Natural Computation (ICNC)*, 2009, pp. 415–419.

[16] Nazarova A.V., Ryzhova T.P. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-251

[17] Maksimov A.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-244

Alekseev V.A., Master's Degree student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: vitaly95@bk.ru

Yakovlev D.S., Master's Degree student, Department of Robotics and Mechatronics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: yakovlevdms@mail.ru

Tachkov A.A., Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Automated transport systems, Scientific Educational Center “Robotics”, Bauman Moscow State Technical University. e -mail: tachkov@bmstu.ru