

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ В КОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУРАХ СЛОЖНЫХ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ СИСТЕМ

И.А. Щербатов

С позиций системного подхода формализованы понятия цели и структуры цели сложной слабоформализуемой системы. Сформулированы прямая (назначение локальных целей для определенного числа компонентов) и обратная (формирование необходимого набора компонентов, обеспечивающих достижение фиксированного числа целей) задачи распределения локальных целей компонентов в компонентных структурах рассматриваемого класса сложных систем. Предложены методики решения прямой и обратной задач для группы мобильных робототехнических систем. Рассмотрен пример, свидетельствующий о применимости синтезированной методики для решения задачи распределения локальных целей в компонентных структурах сложных слабоформализуемых систем.

Ключевые слова: локальная цель, компонент, прямая и обратная задачи, распределение целей, сложная слабоформализуемая система, многоагентная технология, мобильная робототехническая система.

ВВЕДЕНИЕ

Цель — модель желаемого будущего [1] или состояние, к которому направлено движение системы [2]. Выделяются два понятия цели: «цель деятельности» (актуальная, конкретная цель) и «цель-стремление» (цель-идеал, потенциальная цель) [3]. В основном работы по проблемно-целевому анализу систем, формированию целей и путей их достижения связаны с декомпозицией некоторой цели (например, глобальной) на ограниченное множество подцелей [4, 5]. При декомпозиции главной цели из множества подцелей формируется графоподобная структура — дерево иерархии целей [6].

В соответствии с теоретико-множественным представлением [3] и терминологическим базисом [7] определим сложную слабоформализуемую многокомпонентную систему как

$$S = \langle I, OS, E, MH, CN \rangle, \quad (1)$$

где $I = \{I_G, I_z\}$ — совокупность целей (глобальных I_G и локальных I_z); $OS = \{KomS, OrgS, GoS\}$ — совокупность структур (компонентных $KomS$, орга-

низационных $OrgS$ и целевых GoS), реализующих цели; E — множество элементов сложной слабоформализуемой системы; MH — механизмы, реализующие систему; $CN = \{CN_{INS}, CN_{OUTS}\}$ — совокупность факторов (внутренних CN_{INS} и внешних CN_{OUTS}) существования системы.

Для формализованного представления структур целей, как правило, иерархических, воспользуемся кортежем вида [8], который можно представить с помощью графа:

$$GoS_{t_i} = \langle I, O, t_i \rangle, \quad (2)$$

где $O \subset MN$ — множество дуг графа, соответствующее имеющим место отношениям подчинения; t_i — момент времени.

В свою очередь, формальная логико-лингвистическая модель цели сложной слабоформализуемой системы может быть представлена как

$$I = \langle N_I, VeF, Cr_I, (\bar{r}; \bar{w}), (\underline{r}; \underline{w}), P_z \rangle, \quad (3)$$

где N_I — конечное множество имен целей на множестве целей; VeF — естественно-языковое пред-

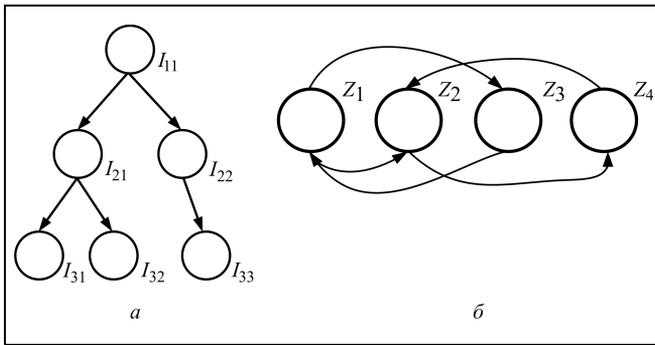


Рис. 1. Структурированность целей в сложных слабоформализуемых системах: *a* — иерархия локальных целей; *б* — уровневая структура локальных целей

ставление цели лицом, принимающим решение (ЛПР) в вербальной форме; Cr_I — конечное множество целевых критериев (в том числе частных), функций и функционалов, характеризующих достижение цели; \bar{r} — цель вышестоящего уровня иерархии целей, которой подчинена текущая цель; \bar{w} — мощность (вес связи орграфа (2)) отношения подчинения (дуги орграфа в форме (2)); r — цель подчиненного уровня иерархии; w — мощность отношения подчинения; P_z — ценность цели, определяющая ее важность в смысле ее достижения.

Компонентная структура $KomS$ образуется ограниченным множеством компонентов $\{K\}$, которые формируются на основе достижения единой локальной цели I_z [7]. Результат определения цели заключается в выявлении ее основных свойств и критериев ее достижения. Типы критериев достижения целей: критерий соответствия Cr_S — все частные критерии принадлежат области допустимых значений; критерий оптимальности по локальной цели Cr_{LI} — система оптимальна по некоторому показателю качества достижения локальной цели; критерий оптимальности по глобальной цели Cr_{GI} — все частные критерии обеспечивают экстремальное значение глобального критерия.

Критерии достижения целей в сложных слабоформализуемых системах, как и в других классах сложных систем, должны удовлетворять требованиям $T1$: *<простота → измеримость → репрезентативность → чувствительность>*.

Для структуры целей GoS в форме (1) существует иерархия показателей $T2$: *<структурированность → согласованность → непротиворечивость → полнота>*:

- *структурированность* — наличие определенной структуры целей в виде иерархии и обеспечения требований соподчиненности (рис. 1, *a*) [8]

либо на едином уровне расположения (взаимосвязанные задачи) (рис. 1, *б*) [9];

- *согласованность* — каждая локальная цель обеспечивает согласованное достижение глобальной цели;
- *непротиворечивость* — отсутствие противоречивых и взаимоисключающих локальных целей, одновременное достижение которых невозможно;
- *полнота* — имеет место взаимно однозначное соответствие между множеством локальных целей компонентов и возможными состояниями компонентов, возможные переходы из одного состояния в другое подробно рассмотрены в работе [2].

Множественность целей для рассматриваемого класса сложных систем [10] обуславливает многокритериальность реальных задач.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики распределения локальных целей в компонентных структурах сложных слабоформализуемых систем и формировании компонентов для достижения определенного набора локальных целей. В ней впервые рассматриваются теоретические аспекты распределения локальных целей внутри компонентных структур сложных слабоформализуемых многокомпонентных систем и вопросы их практической реализации на примере робототехнических систем.

1. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

1.1. Постановка задач в общем виде

Для рассматриваемых задач исходными данными являются два множества с неодинаковым числом элементов — множество локальных целей $I_z = \{I_{z1}, I_{z2}, \dots, I_{zm}\}$ и множество компонентов $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ системы, описываемой в форме (1). Под прямой задачей распределения локальных целей будем понимать назначение локальных целей для определенного числа компонентов, а под обратной задачей — формирование необходимого набора компонентов, обеспечивающих достижение фиксированного числа целей. Отметим, что необходимо учесть наличие неопределенностей различных видов [11, 12].

Прямая задача распределения локальных целей для сложной многокомпонентной слабоформализуемой системы может быть сформулирована в виде:

$$\forall t_i \in T, \{K_j\} \subset OrgS_{t_i} \exists \{I_k\} \in I: I_k \xrightarrow{Unc} K_j. \quad (4)$$



В момент времени $t_i \in T$ требуется распределить между компонентами $\{K_j\} \subset \text{OrgS}_{t_i}$, $j = \overline{1, n}$ (n — общее число компонент, которые образуют в момент времени $t_i \in T$ организационную структуру OrgS_{t_i}) некоторое множество целей $\{I_k\} \in I$, т. е.

обеспечить соответствие $I_k \xrightarrow{Unc} K_j$, когда каждому компоненту K_j распределяется локальная цель I_k (с учетом воздействия неопределенности Unc). В общем случае справедливо соотношение $k \geq j$ (в момент времени $t_i \in T$ может существовать несколько наборов локальных целей, позволяющих достигать глобальную цель).

Учет неопределенностей может быть обеспечен различными способами, например, при нечетких целях, описываемых нечеткими критериями, могут применяться схемы получения обобщенных индексов ранжирования нечетких чисел [13]. Для нахождения оптимального критерия достижения цели при наличии нечетких ограничений может применяться схема Беллмана — Заде [14] и пр. Прямая задача имеет итерационный характер, т. е. по мере достижения локальных целей компонентами необходимо производить новое распределение целей.

Обратная задача распределения локальных целей в общем виде может быть формализована посредством схемы:

$$\forall t_i \in T, \{I_k\} \in I \exists \{K_j\} \subset \text{OrgS}_{t_i}: K_j \xrightarrow{Unc} I_k. \quad (5)$$

В момент времени $t_i \in T$ для некоторого множества целей $\{I_k\} \in I$ требуется сформировать набор компонент $\{K_j\} \subset \text{OrgS}_{t_i}$, $j = \overline{1, n}$, которые обеспечат достижение соответствующих локальных целей в условиях различных типов неопределенностей Unc , т. е. обеспечить соответствие $K_j \xrightarrow{Unc} I_k$.

При такой постановке задачи предполагается, что для достижения цели может изменяться компонентная структура системы, в том числе путем образования новых компонент.

Количественная мера оценки качества решения задачи (в любой из приведенных постановок) может быть представлена как

$$|\rho(I_k; I_k^*)| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где ρ — мера близости достижения локальной целью I_k требуемого значения I_k^* , т. е. попадание зна-

чения меры близости в интервал размером 2ε свидетельствует о достижении локальной цели I_k .

Определение 1. Интервал времени Δt , в течение которого обеспечивается выполнение соотношения (6), будем называть *интервалом достижения цели*. ♦

Локальные цели компонент могут быть заданы различными функционалами, представлять собой нечеткие целевые функции, поэтому необходимо выделить типы используемых мер близости локальных целей в зависимости от их вида.

Критерии заданы аналитически вычисляемыми выражениями. В этом случае применяется мера вычисления «расстояния» между локальными целями [15]:

$$\rho = \|Cr_k^* - Cr_k\|. \quad (7)$$

Нечеткие критерии достижения локальных целей. В этом случае может применяться специальный индекс ранжирования [13]:

$$\rho(I_k; I_k^*) = \text{sign extr}\{\mu_i(cr_i^* - cr_i)/d_i\}, \quad i = \overline{1, k}, \quad (8)$$

где μ_i — значение функции принадлежности; $d_i = \max(cr_i^* - cr_i)$.

Имеются как четкие, так и нечеткие критерии. В этом случае применяется комбинация мер в форме (7) и (8).

1.2. Система допущений задач распределения локальных целей

Для прямой и обратной задач в постановках (4) и (5) необходимо обобщить и сформулировать ряд допущений:

- для достижения глобальной цели системы требуется достижение локальных целей, образующих ее компонент;
- постановку глобальной цели осуществляет ЛПР, например, в вербальной форме, в терминах «выше», «слабее» и пр.;
- в качестве критерия эффективности системы выступает критерий оптимальности по глобальной цели Cr_{GJ} , в зависимости от вида критерия применяются количественные меры оценки качества решения задачи в виде (6)–(8);
- ЛПР также задает структуру целей в форме (3), указывая отношения подчиненности, веса и ценности P_{zk} конкретных целей, таким образом исключается возможность формирования не полного, противоречивого, не согласованного и не структурированного множества целей, т. е. сформированная структура целей GoS отвечает требованиям $T2$ (автоматическое формирова-

ние структуры целей возможно, однако в рамках данной работы не рассматривается);

- локальные цели взаимосвязаны между собой, и назначение цели определенному компоненту влияет на распределение оставшихся целей;
- в самом общем случае число целей превышает число компонентов $m \geq n$, это означает, что существует возможность последовательного достижения целей одним компонентом, т. е. по достижении одной цели происходит выбор и распределение следующей цели для «свободного» компонента (последовательный набор локальных целей компонентов представляет собой стратегию компонента);
- все цели в системе отвечают требованиям T1, обязательны измеримость, ясный физический смысл или возможность формализации на некоторой шкале;
- согласование противоречивых целей (критериев целей) происходит на этапе решения задачи распределения целей путем формирования Парето-оптимального решения.

2. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

Задача распределения целей в сложных системах часто решается с применением технологий мультиагентных систем [16–18]. Каждый компонент структуры $OrgS_i$ может быть представлен в виде агента, реализующего взаимодействие с другими агентами в виде дополнительных аспектов [19]. Компонентная структура может быть представлена с помощью коалиции. Задача формирования коалиций решается, например, с применением одного из разделов теории игр, а именно PFGs [20]. При этом сам компонент — коалиция части элементов E сложной слабоформализуемой системы S .

Решение прямой задачи распределения локальных целей проиллюстрируем на примере группы мобильных робототехнических платформ, обеспечивающих решение взаимосвязанных задач в замкнутой среде при наличии динамических препятствий. Роботы могут объединяться в группы для решения сложной (составной) задачи.

Определение 2. *Элемент сложной системы $e_i \in E$, $i = \overline{1, b}$, где b — число элементов в системе S , — программный агент, реализующий поведение реального элемента в некоторой среде, полностью имитирующей функционирование реальной системы.*

Определение 3. *Компонент — коалиция элементов. ♦*

В соответствии с работой [20] это означает, что множество компонентов можно определить как $K \subseteq E$, $K \neq \emptyset$, а возможное число компонентов (образований из b элементов) как $|K| = 2^b - 1$.

Упрощение 1. *Компонентная структура — коалиционная структура компонентов. ♦*

Это означает, что $OrgS = \{K_1, K_2, \dots, K_{|OrgS|}\}$ и выполнены условия [20]:

$$\begin{cases} \forall i \in \{1, \dots, |OrgS|\}, K_i \neq \emptyset, \\ \bigcup_{i=1}^{|OrgS|} K_i = E, \\ \forall i, j \in \{1, \dots, |OrgS|\} : i \neq j, K_i \cap K_j = \emptyset. \end{cases}$$

Упрощение 2. *Глобальная цель — коалиция локальных целей. ♦*

Это означает, что $I_G \subseteq I$, $I_G \neq \emptyset$, а $|I_G| = 2^h - 1$, h — число локальных целей компонентов ($h \neq b$).

Замечание 1. *Компонент — обучаемый программный агент (для удобства будем называть данный агент компонентом), а локальная цель — программный агент, не способный самостоятельно выполнять действия.*

2.1. Формализация агента «локальная цель»

На основе работы [21] локальная цель — агент, не способный повлиять на внешнюю среду, но способный изменить собственные характеристики. Агент содержит набор аспектов, который может быть описан кортежем

$$I_Z = \langle A, L, Q, C, P, T \rangle,$$

где A — алгоритм достижения локальной цели; L — местоположение, т. е. расположение локальной цели в пространстве координат; Q — состояние, т. е. вербальная фиксация процесса достижения цели (аспект, отвечающий за свойство реактивности и способный изменять состояние всего агента); C — подчиненность (порядок достижения цели по отношению к другим целям, например, могут принимать значения «предок», «потомок»); P — цена, т. е. число условных единиц прибыли, которые может получить компонент в случае достижения локальной цели с требуемой точностью; T — время достижения цели.

2.2. Формализация агента «компонент»

Формализация агента «компонент» требует получения функциональных зависимостей выделенных аспектов агента «локальная цель». Это означает, что функционирование агента «компонент»,



направленное на достижение локальной цели, изменяет аспекты агента актора «локальная цель».

Компонент может быть формализован с помощью теоретико-множественного подхода [7]. Основная функция агента «компонент» — достижение локальных целей. Для достижения глобальной цели необходимо распределить множество целей $\{I_Z\}$ между компонентами $\{K\}$. При распределении локальных целей необходимо учитывать эффективность достижения каждой цели каждым компонентом. В зависимости от способа задания критериев локальных целей степень их достижения может быть рассчитана с помощью мер (7) и (8).

2.3. Методика решения прямой задачи распределения целей

Так как число целей превышает число компонентов $m \geq n$, то для выбора локальной цели компонента введем обобщенный показатель выбора цели W_j , характеризующий мощность локальной цели. Введем понятие стратегии поведения $Str_j \in \{Str\}$ компонента K_j .

Определение 4. Стратегия поведения компонента — последовательность локальных целей, которые достигнуты за время работы T_j . ♦

Характеризующий эффективность стратегии комплексный критерий $W(Str_j) = (cr_{I_1}, cr_{I_2}, \dots, cr_{I_h})$, $h < m$ (критерий оптимальности по глобальной цели Gr_{GI}), является векторным.

Пространство стратегий имеет размерность n и задается n ортогональными осями координат, вдоль которых отложены значения P_j на отрезке времени T_j . Задача распределения локальных целей для компонента K_j сводится к формированию некоторого множества стратегий $\{Str\}$ и выбору из него наиболее эффективной Str_j^* . Управление распределением локальных целей сводится к решению задачи обеспечения максимального выигрыша (ценности) группой игроков (компонентов) Q при достижении максимального выигрыша каждым из игроков (компонентов):

$$Q = f(\{K\}_j; \{I_Z\}_k) \rightarrow \max.$$

При такой постановке существует опасность достижения компонентом локальной цели с высокой ценностью, но низкой эффективностью из-за чрезмерного расходования ресурсов достижения цели. Поэтому к критерию «ценность» Q (критерий оптимальности по глобальной цели) необходимо дополнительно ввести вспомогательный критерий поиска Паретто-оптимального распре-

деления $E = f(\gamma_1^{i,j}(Rs); \gamma_2^{i,j}(Rs))$, характеризующий эффективность достижения цели. Для этого введем функцию эффективности «компонент — локальная цель» $\gamma_1^{i,j}$, характеризующую требуемые ресурсы Rs для достижения цели; функцию эффективности «компонент — локальная цель — система» $\gamma_2^{i,j}$, характеризующую организационную структуру системы, т. е. возможности по использованию ресурсов достижения локальной цели конкретным компонентом в составе системы.

Критерием оптимальности служит функция мощности W на промежутке времени, равном t_p . При этом каждый из скалярных критериев W_j будем называть частным критерием оптимальности. В общем случае $W = f(W_1, \dots, W_j)$, а в частном случае $W = \sum_{j=1}^n W_j$. Основным ограничением является временной промежуток T , в течение которого система не изменит свою структуру.

В случае распределения целей $\{I_{zk}\}$ компонентам $\{K\}$, когда промежуток времени не определен, решением будет компромисс, при котором выполняется условие $W_j \rightarrow \max$, $W \rightarrow \max$, т. е. задача многокритериальной оптимизации:

$$\max_{Str \in D_{Str}} W(Str) = W(Str^*),$$

где D_{Str} — множество допустимых значений вектора варьируемых стратегий.

Введем на множестве D_{Str} отношение предпочтения $Str_i^1 > Str_i^2$, которое означает, что стратегия l -го робота Str_i^1 предпочтительнее стратегии робота Str_i^2 , если выполняется условие $W(Str_i^1) > W(Str_i^2)$, при этом можно выделить такую стратегию Str_i^* , для которой нет более предпочтительных стратегий. В этом случае стратегия Str_i^* будет Парето-оптимальным множеством локальных целей.

Одно из ограничений — время достижения локальных целей T , в течение которого будет неизменна компонентная структура системы. Время в данном случае является функцией доступных ресурсов $T = f(Rs)$. Для рассматриваемой группы роботов состав компонентов (компонентной структуры) может измениться вследствие необходимости подзарядки одного из роботов компонента (энергоёмкость батарей — ресурс, используемый для достижения локальной цели). Таким образом, изменение компонентной структуры ограничивает

временной интервал решения задачи распределения целей.

Для нахождения стратегии Str_j^* для каждого компонента необходимо построить дерево решений, в котором вершина — локальная цель, а ветвь — связь между целями. Поскольку ширина эстетивного дерева ограничена, то возникает задача выбора первой локальной цели каждого из компонентов. Поэтому до начала построения дерева решений необходимо выбрать первую локальную I_{zj}^1 цель для каждого компонента K_j при условии, что $W_j = \max$.

Каждая стратегия характеризуется временем $T_{Str, l}$ и мощностью $W_{Str, l}$. Время стратегии характеризует глубину дерева решений компонента K_j и зависит от суммы временных промежутков достижения локальных целей, включенных в ветви дерева. Значение $T_{Str, l}$ должно быть меньше времени, в течение которого существует неизменная компонентная структура системы:

$$\begin{cases} T_{Str, l} = \sum_{i=1}^m T_{I_{zi}}, \\ T_{Str, l} < T. \end{cases}$$

Для каждого компонента построено дерево возможных ходов, следующий шаг состоит в построении возможных стратегий для каждого компонента. На основе построенного множества Str производится поиск Парето-оптимального множества Str^* методом справедливых компромиссов.

В работе [19] обосновано применение метода справедливых компромиссов [22] для поиска Парето-оптимальной стратегии.

В контексте рассматриваемой прямой задачи распределения локальных целей справедливым компромиссом будет такой компромисс, при котором относительный уровень повышения суммарной мощности стратегии для компонента K_j не превосходит относительно уровня понижения суммарной мощности стратегий для других компонентов.

Нахождение оптимального распределения целей — итерационный процесс, при котором сравниваются множества возможных стратегий Str_l для нахождения Парето-оптимального множества Str^* .

Мера относительного изменения мощности стратегий для компонента K_j при переходе от стратегии Str_v к стратегии Str_b :

$$\Delta\tilde{\phi}_j(Str_v, Str_b) = \frac{\Delta\phi(Str_v, Str_b)}{\left| \max_{Str \in (Str_v, Str_b)} \phi_k(Str) \right|},$$

где $\Delta\tilde{\phi}_j(Str_v, Str_b) = \phi_k(Str_v) - \phi_k(Str_b)$ — абсолютное изменение значений суммарной мощности стратегий $\phi_k(W)$ при переходе от стратегии Str_v к стратегии Str_b .

Стратегия Str_v эффективнее стратегии Str_b , т. е.

$$Str_b \rightarrow Str_v,$$

если $|\Delta\tilde{\phi}_{\max}(Str_v, Str_b)| > |\Delta\tilde{\phi}_{\min}(Str_v, Str_b)|$.

2.4. Алгоритмическое обеспечение решения прямой задачи распределения целей

Обобщенный алгоритм решения прямой задачи распределения целей (алгоритм итерационный, так как требуется уточнение оптимальной стратегии), представлен на рис. 2.

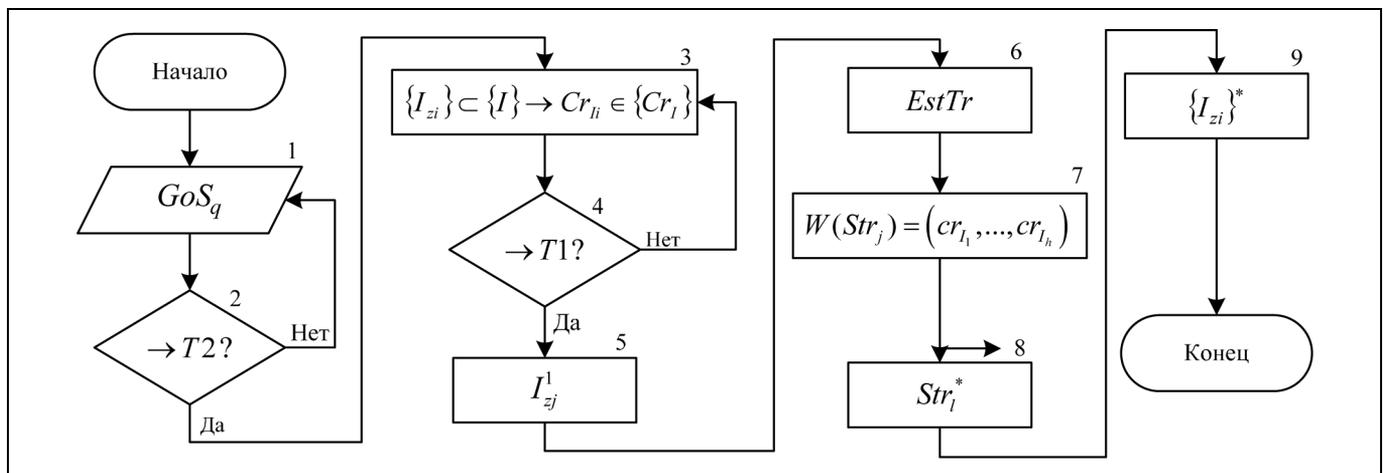


Рис. 2. Обобщенный алгоритм решения прямой задачи распределения целей



Рис. 3. Концепция решения обратной задачи распределения целей

В блоке 1 производится ввод всех локальных целей I_{zi} , $i = \overline{1, n_o}$, начальных условий и строится структура целей GoS_q . В блоке 2 обеспечивается ее проверка на соответствие требованиям в форме $T2$, т. е. она предъявляется ЛПР для принятия решения об ее утверждении в качестве рабочей структуры целей, которая будет реализована системой. Поскольку критерии достижения целей могут быть различными, то на основании эвристической процедуры, например, правил вида «ЕСЛИ... ТО...» (с учетом введенных начальных условий) в блоке 3 обеспечивается выбор конкретного критерия $Cr_{ji} \in \{Cr_j\}$ достижения цели $I_{zi} \in \{I_z\}$. В случае если хотя бы один из критериев $Cr_{ji} \in \{Cr_j\}$ не отвечает требованиям в форме $T1$ (блок 4), то переход к блоку 3. После этого реализуется описанная методика распределения локальных целей, основанная на модифицированном методе справедливых компромиссов. Модификация заключается в применении данного метода для распределения взаимосвязанных локальных целей. В блоке 5 выбирается первая локальная цель I_{zj}^1 для каждого из компонентов, затем в блоке 6 строится дерево решений для каждого компонента K_j . Сформированный в блоке 7 векторный критерий $W(Str_j) = (cr_{I_1}, \dots, cr_{I_h})$, $h < m$, используется для получения оптимальной стратегии Str_j^* (блок 8), реализующей распределение локальных целей $\{I_{zi}\}^*$ между компонентами (блок 9).

3. МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Показано [7], что образование компонентов на основании единой цели возможно при изменении глобальной цели системы, когда осуществляется коррекция локальных целей, приводящая к изменению организации системы и образованию новых компонентов. Образование компонента происходит таким образом, чтобы обеспечивалось достижение локальной цели.

3.1. Решение обратной задачи распределения локальных целей

Концептуально процесс решения обратной задачи распределения целей может быть представлен в виде двух этапов — анализ и синтез (рис. 3). Анализ состоит из трех следующих друг за другом подпроцессов (П1.1 — П1.3), а именно, ограничение множества локальных целей, выбор критериев достижения целей и анализ компонентов. Синтез — процесс формирования компонентной структуры сложной слабоформализуемой системы (П2.1). Рассмотрим более подробно каждый из них. Пусть локальные цели представлены в форме (3) и по условию обратной задачи распределения целей (5) их число конечно и равно n_o (П1.1).

Подпроцесс П1.2 предполагает назначение каждой локальной цели I_{zi} , $i = \overline{1, n_o}$, некоторого измеримого критерия $Cr_{ji} \in \{Cr_j\}$, который позволяет оценить степень достижения локальной цели на основе меры в форме (7) или (8). Отсутствие критерия достижения цели требует корректировки подмножества локальных целей (переформулирование локальной цели, которая не имеет количественной меры для оценивания степени ее достижения).

В рамках подпроцесса П1.3 осуществляется анализ возможностей формирования компонента K_j для достижения локальной цели I_{zj} , что позволяет сформировать компонентную структуру $KomS_j$ (П2.1), которая обеспечит решение обратной задачи распределения локальных целей. Предполагается, что при анализе будут выделены компоненты, обеспечивающие достижение соответствующей локальной цели, в противном случае процесс П1.3 потребует нескольких итераций для подбора требуемого компонента.

Рассмотрим методику, реализующую описанный концептуальный подход. В соответствии с постановкой в форме (5) момент времени $t_i \in T$ — момент времени ввода ЛПР в систему управления структуры целей GoS_q . Наряду со связями подчи-

ненности и ценностями локальных целей требуется дополнить указанную структуру атрибутом «механизм реализации цели».

Определение 5. Механизм реализации цели M_{I_z} — совокупность состояний и процессов, обеспечивающих достижение локальной цели. ♦

Механизм M_{I_z} содержит описание компонента, включающее в себя описание структуры, взаимного расположения и связей между элементами системы, входящими в состав компонента. Таким образом каждой локальной цели I_{zk} ставится в соответствие некоторый механизм M_{I_z} , описываемый экспертной группой или ЛПР в процессе проектирования системы. Однако возможно появление ранее не описанного механизма реализации цели в процессе функционирования системы, тогда в диалоговом режиме с ЛПР он должен быть описан в соответствующей нотации.

Ценность цели обуславливает первоначальный выбор, т. е. цель с максимальной ценностью будет иметь приоритет реализации соответствующего механизма. Робот, уже включенный в состав компонента, выбывает из множества доступных элементов построения компонентной структуры, обеспечивающей достижение глобальной цели, т. е. имеет место соотношение $\exists R_b \subset S: R_b \notin K$, означающее, что робот не включен в состав ни одного компонента.

Крайне важно время формирования компонента для локальной цели. Обозначим t_M время, в течение которого происходит образование компонента. Очевидно, что данный параметр должен быть ограничен и не превышать некоторого значения, задаваемого ЛПР или определяемого расчетным путем из требуемых условий решения задачи, т. е. $t_M \leq t_M^{\max}$.

На реализацию механизма M_{I_z} также оказывает влияние «удаленность» компонентов друг от друга и от цели. Под удаленностью $\rho_M(X)$ понимается количественная мера, характеризующая близость в пространстве существенных для системы параметров X , например, геометрическое расстояние в случае мобильных роботов. Компонент формируется при выполнении условий:

$$\begin{cases} \exists R_b \subset S: R_b \neq K, \\ \exists M_{I_z}: R_b \rightarrow K_j, \\ t_M \leq t_M^{\max}, \\ \rho_M \leq \rho_M^{\max}. \end{cases}$$

Механизм реализации цели M_{I_z} описывается в определенной нотации:

$$M_{I_z} = \langle I_z; [Cr_I]_h; A_1(Cr_I; I_z); A_2(\rho; Cr_I); \rho_M^{\max}; [K]_x \rangle,$$

где $A_1(Cr_I; I_z)$ — алгоритм выбора наиболее подходящего критерия Cr_I для цели I_z ; $A_2(\rho; Cr_I)$ — алгоритм выбора наиболее подходящей метрики в формах (6)—(8); $[K]_x$ — компоненты, необходимые для реализации M_{I_z} .

3.2. Алгоритмическое обеспечение решения обратной задачи распределения целей

Алгоритм решения обратной задачи распределения целей представлен на рис. 4.

Блоки 1 и 2 аналогичны блокам алгоритма, представленного на рис. 2. После проверки соответствия необходимым требованиям имеющейся структуры целей в блоке 3 выбирается цель с максимальной ценностью, установленной ЛПР. В соответствии с требуемым значением количественной меры $\rho_M(X)$ выбирается требуемый механизм реализации цели M_{I_z} (блок 4). В блоках 5 и 6 выбираются требуемый критерий достижения цели и меры для оценки степени ее достижения. При этом могут использоваться интеллектуальные процедуры выбора подробно рассмотренные в работе [15]. В блоке 7 выбирается соответствующая структура (набор компонентов), которая будет достигать цель при наличии необходимого ресурса R_s .

Проиллюстрируем эффективность применения разработанных подходов для решения практических задач управления распределением локальных

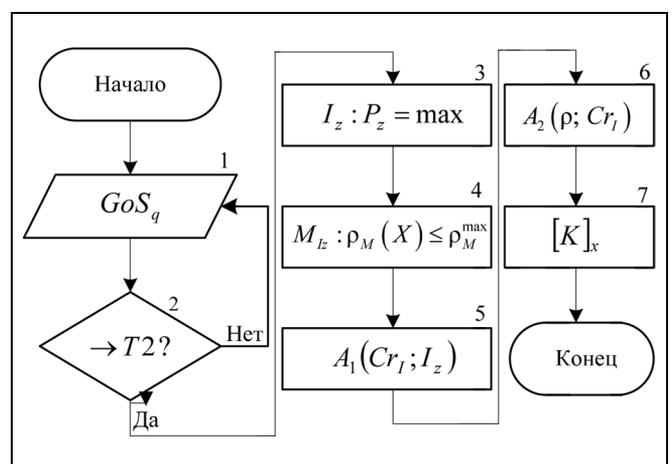


Рис. 4. Обобщенный алгоритм решения обратной задачи распределения целей



целей компонентных структур в сложных слабо-формализуемых системах на примере коалиции мобильных робототехнических платформ.

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Рассмотрим задачу патрулирования мобильными роботами некоторого пространства внутри здания. Исходные данные: число роботов $K_j, j = \overline{1, 5}$; число локальных целей (точек обхода) $I_k, k = \overline{1, 30}$; площадь патрулирования 4×12 в некоторых условных единицах. Цели представлены в форме (3). Глобальная цель сформулирована ЛПР в вербальной форме «Обеспечить обход всех требуемых точек в зоне патрулирования имеющимися роботами», структура целей уровневая (рис. 1, б), имеют место отношения типа «предок/потомок», мощности отношений одинаковы и равны единице. В качестве критериев достижения целей выступает совпадение координат робота в плоскости патрулирования с координатами точки обхода, мера вычисления «расстояния» достижения локальной цели задана в форме (7), критерии измеримы и имеют ясный физический смысл, противоречивые цели отсутствуют в силу особенностей синтезированной методики распределения при решении прямой задачи. В качестве ресурса, влияющего на распределение цели, выступает энергоёмкость аккумуляторных батарей робота, которая не должна превышать их текущий заряд на момент распределения цели.

Пусть множество $\{I_k\}$ сгенерировано случайным образом. Основные параметры множества $\{I_k\}$: координаты местоположения в пространстве, время достижения цели, цена достижения цели и взаимосвязи типа «предок/потомок» (число взаимосвязей генерируется случайным образом, но не более пяти).

Замечание 2. Для удобства каждый робот рассматривается как отдельный компонент. ♦

Рассматриваемая задача может быть представлена графом, в вершинах которого помещаются цели, а ребра отражают взаимосвязи между целями. Пусть на первом шаге случайным образом сформирована структура, показанная на рис. 5, а.

Затем рассчитывается обобщенный показатель выбора цели W_j , на основании которого определяется первый шаг (рис. 5, б), т. е. выбор роботом наиболее эффективной цели в смысле ее достижения и близости к роботу. Если два робота выбирают одну локальную цель, то ее достижение обес-

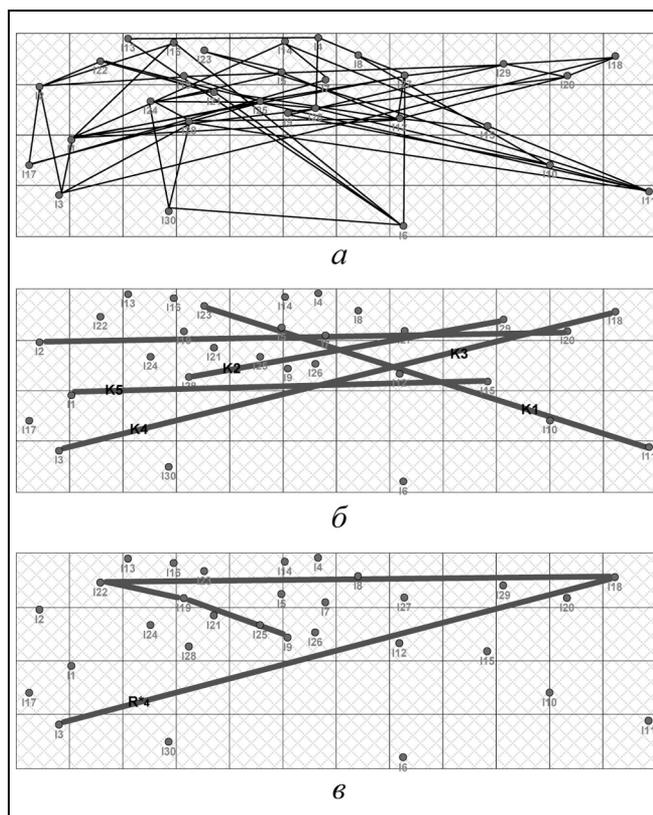


Рис. 5. Графическая иллюстрация решения прямой задачи распределения целей: а — сформированное множество взаимосвязанных локальных целей; б — определение первого шага стратегии для каждого из роботов; в — оптимальная стратегия для четвертого робота

печит робот, для которого значение обобщенного показателя W_j будет наибольшим.

Следующий шаг — построение дерева взаимосвязей локальных целей и формирование множества возможных стратегий для l -го робота (глубина этого дерева удовлетворяет условию времени существования группы роботов без изменения состава). Производится итерационный поиск Парето-оптимального множества стратегий Str_l^* с максимальной мощностью. Результатом служит набор стратегий, выполнение которых имеет наибольшую суммарную ценность. После ранжирования получаем стратегию Str_l^* (рис. 5, в).

Проведем сравнительную оценку синтезированной в работе методики с решением прямой задачи распределения целей методом ускоренного улучшения плана (рис. 6). Критерий сравнения — время распределения целей, т. е. время построения плана достижения целей.

Полученные данные свидетельствуют о повышении эффективности распределения локальных целей при решении прямой задачи с помощью син-

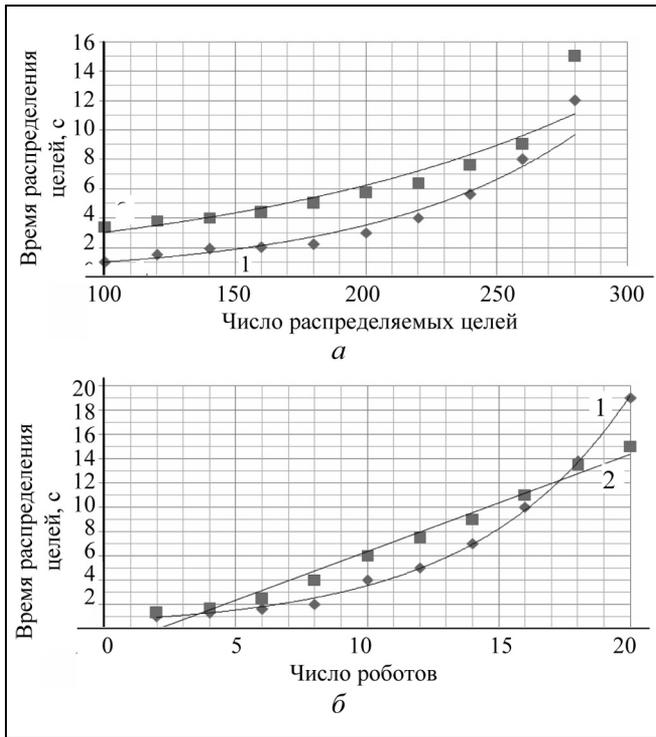


Рис. 6. Оценка эффективности решения прямой задачи распределения целей: *а* — зависимость времени распределения целей от числа целей; *б* — зависимость времени распределения целей от числа роботов; 1 — синтезированная методика; 2 — метод ускоренного улучшения плана

тезированной методики. На основе экспериментов определен диапазон отношения «робот/цель» $1/35—1/13$, в котором применение алгоритмов эффективно.

5. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ

Пусть в некоторый начальный момент времени $t_0 \in T$ ЛПР вводит фиксированное множество локальных целей $\{I_{1,t_0}, I_{2,t_0}, I_{3,t_0}\} \in I$, обеспечивающих достижение единственной глобальной цели I_{G,t_0} , а компонентная структура представлена набором из трех компонентов $KomS_{t_0} = \{K_1, K_2, K_3\} : (e_1, e_2, e_3) \rightarrow K_1, (e_4, e_5) \rightarrow K_2, (e_6, e_7) \rightarrow K_2$ (первая группа состоит из трех, вторая и третья — из двух роботов, рис. 7, *а*). Структура целей иерархическая (в форме (2)).

Предположим, что в момент времени $t_1 \in T$ образована новая структура локальных целей $\{I_{1,t_1}, I_{2,t_1}\} \in I$, отвечающая требованиям в виде $T2$.

Пусть локальные цели I_{1,t_1} и I_{2,t_1} — блокирование некоторого подвижного объекта, которое может быть обеспечено группой из трех роботов. Для удобства будем полагать, что для них назначены измеримые критерии $\{Cr_{1,t_1}, Cr_{2,t_1}\}$ (которые определяют расстояние до цели и расстояние между роботами в сантиметрах), позволяющие оценить степень достижения целей на основе меры в форме (7) и не требующие корректировки множества целей, т. е. известны A_{11} и A_{21} .

Для каждой из целей определены механизмы их реализации: $M_{I_{1,t_1}} = \langle I_{1,t_1} : Cr_{1,t_1} : A_{11} : A_{21} : 10 : 3 \rangle$. В качестве основного ресурса достижения цели выступает емкость аккумуляторных батарей, которая для удобства принята достаточной для достижения целей всеми роботами.

В соответствии с предложенным алгоритмом решением обратной задачи распределения целей будет структура, показанная на рис. 7, *б* (робот 7 не задействован для достижения новой глобальной цели I_{G,t_1}).

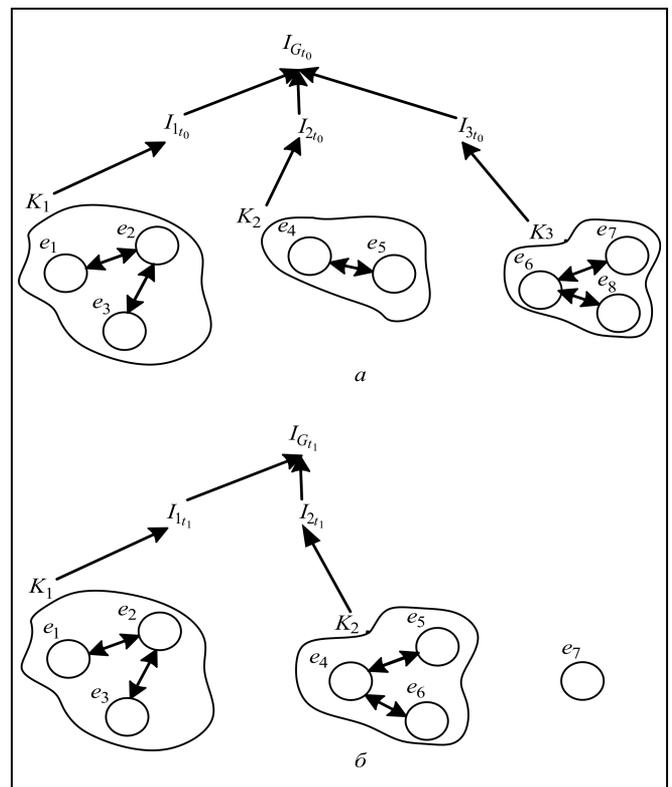


Рис. 7. Решение обратной задачи распределения целей: *а* — первоначальная структура системы; *б* — результат решения обратной задачи



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе синтезированной формальной логико-лингвистической модели цели сложной слабоформализуемой многокомпонентной системы сформулированы оригинальные постановки прямой и обратной задач распределения локальных целей. Предложенная методика в полной мере обеспечивает решение прямой задачи распределения локальных целей с помощью мультиагентного подхода (цель и компонент представлены программными агентами). Разработанный алгоритм решения задачи в такой постановке позволяет реализовать в системе управления группой роботов подсистему распределения взаимосвязанных целей, имеющих уровневое представление. Практическая реализация предложенной методики при имитационном моделировании показала увеличение эффективности распределения целей роботам, когда число целей превышает число роботов. Определен диапазон эффективной работы алгоритма решения прямой задачи распределения целей для отношения «робот/цель».

Для случая, когда имеется фиксированный набор целей и их распределение может быть обеспечено не для всего набора компонентов системы, синтезирован алгоритм на основе введенного понятия «механизм реализации цели». Описанный в оригинальной нотации механизм реализации цели в полной мере позволяет реализовать алгоритм решения обратной задачи с учетом имеющихся ресурсов и критериев достижения целей.

Полученные результаты позволяют утверждать, что синтезированные алгоритмы могут применяться для различных классов систем, структура которых описывается с помощью компонентного подхода, когда локальная цель и компонент системы позволяют формализацию в терминах мультиагентных систем. Обеспечивается распределение как иерархических, так и одноуровневых целей.

В дальнейшем предполагается разработать систему частных критериев достижения локальных целей, а также методику коррекции недостижимых локальных целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Растринин Л.А., Граев П.С.* Кибернетика как она есть. — М.: Молодая гвардия, 1975. — 208 с.
2. *Ломако Е.И.* Математические и понятийные средства систематики — М.: Системная Энциклопедия, 2008. — 112 с.
3. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Теория систем и системный анализ. — М.: Юрайт, 2010. — 680 с.
4. *Путилов В.А., Горохов А.В.* Системная динамика регионального развития. — Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. — 306 с.
5. *Kumar E., Chaturvedi S.K.* Reliability Estimation of Complex Technical Systems with Dependency Modelling: A Fuzzy Approach // Journal of Uncertain Systems. — 2008. — Vol. 2, N 4. — P. 280–288.
6. *Лукьянова Л.М.* Семиотические модели и методы анализа и синтеза целей систем производственной сферы // Известия КГТУ. — 2008. — № 13. — С. 143–147.
7. *Щербатов И.А., Проталинский О.М.* Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы // Управление большими системами. — 2013. — Вып. 45. — С. 30–46.
8. *Лукьянова Л.М.* Теоретико-методологические основы структурно-целевого анализа и синтеза организационно-технических комплексов. — СПб.: Наука, 2006. — 276 с.
9. *Щербатов И.А., Проталинский И.О.* Исследование эффективности группового управления роботами методом имитационного моделирования // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2010. — № 4 (50). — С. 34–37.
10. *Щербатов И.А.* Концепция системного анализа сложных слабоформализуемых многокомпонентных систем в условиях неопределенности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2013. — № 2. — С. 28–35.
11. *Щербатов И.А.* Классификация неопределенностей в задачах моделирования и управления сложными слабоформализуемыми системами // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 1, № 1. — С. 175–179.
12. *Thunnissen D.*, Uncertainty classification for the design and development of complex systems // Proc. of the 3rd Annual Predictive Methods Conf., Veros Software, Santa Ana, CA, June, 2003. — P. 1–16.
13. *Федосеев С.А., Возжаков А.В., Гитман М.Б.* Управление производством на тактическом уровне планирования в условиях нечеткой исходной информации // Проблемы управления. — 2009. — № 5. — С. 36–43.
14. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
15. *Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами* / Под ред. А.А. Большакова. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 160 с.
16. *DeLoach S.A.* Multiagent Systems Engineering: a Methodology and Language for Designing Agent Systems // Proc. of Agent Oriented Information Systems '99. — 1999. — P. 45–57.
17. *Cetnarovicz E., Nawarecki E., Cetnarovicz K.* Agent-oriented Technology of Decentralized systems based on the M-agent Architecture // Preprints of IFAC/IFIP Conf. on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'97, Campinas, Sp, Brazil, August 31 — September 1997). — Vol. 2. — P. 486–491.
18. *Shehory O., Kraus S.* Cooperative goal-satisfaction without communication in large-scale agent-systems // ECAI 96. 12th European Conf. on Artificial Intelligence. — P. 544–548.
19. *Protalinskii I.O., Shcherbatov I.A., Shishkin N.D.* Optimal Strategy Synthesis for a Group of Mobile Robots with Variable Structure // World Applied Sciences Journal. — 2013. — Vol. 24, N 2. — P. 268–275.
20. *Rahwan Talal, Michalak T., Wooldridge M, and Jennings N.R.* Anytime coalition structure generation in multi-agent systems with positive or negative externalities // Artificial Intelligence. — 2012. — Vol. 186. — P. 95–122.
21. *Minsky M.* The Society of Mind. — N.-Y.: Simon and Shuster, 1986. — 339 p.
22. *Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н.* Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. — М.: Наука, 1986. — 296 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Щербатов Иван Анатольевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Астраханский государственный технический университет, ☎ (851) 261-42-31, ✉ sherbatov2004@mail.ru.