

Оптимизация, системный анализ и исследование операций

© 2022 г. В.Б. МЕЛЕХИН, д-р техн. наук (pashka1602@rambler.ru)
(Дагестанский государственный технический университет, Махачкала),
М.В. ХАЧУМОВ, канд. физ.- мат. наук (khmike@inbox.ru)
(Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН, с. Вельково;
Федеральный исследовательский центр
“Информатика и управление” РАН, Москва;
Российский университет дружбы народов, Москва)

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ПРОЦЕДУР ПЛАНИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ АВТОНОМНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБОТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИПЕРЕМЕННЫХ УСЛОВНО-ЗАВИСИМЫХ ПРЕДИКАТОВ¹

Предложен принцип построения процедур планирования целенаправленного поведения различных по назначению автономных интеллектуальных мобильных роботов в недоопределенных нестабильных условиях функционирования. Для построения модели представления знаний разработаны типовые ее конструкции в виде импликативных решающих правил, сформированных на основе различных по содержанию полипеременных условно-зависимых предикатов. Определена структура различных по назначению предикатов данного типа, которые могут содержать как полипеременные в виде активных нечетких семантических сетей, так и связанные определенными условиями проблемной среды отдельные переменные сорта “объекты” и “события”. Показано, что применение активных нечетких семантических сетей позволяет описывать различные ситуации и подситуации проблемной среды безотносительно к конкретной предметной области, а также определять в общем виде отношения, которые могут наблюдаться интеллектуальным роботом в процессе планирования поведения в проблемной среде между ее объектами и происходящими в ней событиями. Разработаны инструменты обработки знаний на различных этапах вывода решений, позволяющие строить эффективные процедуры планирования поведения, обеспечивающие автономным интеллектуальным мобильным роботам возможность выполнять сложные задания, сформулированные в виде обобщенного описания целевой ситуации проблемной среды. Найдены верхние граничные оценки сложности процедур планирования целенаправленного поведения автономным интеллектуальным мобильным роботом, построенных по предложенному принципу организации инструментальных средств обработки знаний и вывода решений.

Ключевые слова: автономный интеллектуальный робот, проблемная среда, модель представления знаний, планирование поведения, полипеременные условно-зависимые предикаты, импликативные решающие правила.

DOI: 10.31857/S0005231022040080, EDN: AAZOAD

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10056, <https://rscf.ru/project/21-71-10056/>

1. Введение

Актуальность решения различных проблем, связанных с созданием эффективных интеллектуальных решателей задач для автономных интеллектуальных мобильных роботов (АИМР), обусловлена следующими основными обстоятельствами, которые сложились в настоящее время в области разработки интеллектуальных систем различного назначения.

1. Низкими функциональными возможностями интеллектуальных решателей задач, создаваемых на основе формализации мыслительных актов наглядно-действенного мышления [1], т.е. мышления, организованного по принципу условной и безусловной рефлекторной деятельности высокоразвитых живых систем, позволяющей организовать самообучение и рефлекторное поведение АИМР в априори неописанных условиях проблемной среды [2]. К таким АИМР следует отнести, например, автономных мобильных роботов, в основу планирования поведения которых закладываются различные роевые [3] и генетические алгоритмы [4], позволяющие роботу организовать относительно несложные формы целесообразной деятельности на основе обработки воспринимаемой в проблемной среде информации после предварительного обучения и самообучения. Следует отметить, что интеллектуальный решатель задач в этом случае, как правило, строится на базе нейронных сетей [5], реализация которых в виде специализированных вычислительных систем имеет высокие аппаратные затраты при обеспечении АИМР относительно низкими интеллектуальными возможностями. При моделировании же процессов вывода решений на основе таких сетей на универсальных ЭВМ теряется основное преимущество сетевого интеллекта в сравнении с алгоритмическим интеллектом, связанное с возможностью принятия решений в реальном времени.

2. Экспоненциальной сложностью вывода решения практических задач и необходимостью формирования достаточно подробной модели закономерностей целенаправленного преобразования различных ситуаций проблемной среды [6]. Такие интеллектуальные решатели задач строятся на основе логических моделей представления и обработки знаний с использованием логики предикатов первого порядка [7]. Однако высокая сложность вывода решений существенным образом препятствует применению классических моделей логического подхода для создания интеллектуальных решателей задач АИМР различного назначения из-за того, что их бортовые ЭВМ, как правило, имеют ограниченные вычислительные ресурсы.

Что же касается интеллектуальных решателей задач, организованных в рамках логического подхода, имеющих линейную сложность вывода, например, созданных на основе миварных технологий [8], то для принятия решений в таких системах требуется подробная, как правило, громоздкая модель закономерностей преобразования различных ситуаций проблемной среды в конкретной предметной области. Однако построение подробной модели закономерностей реальной априори неопределенной проблемной среды, позволяющей организовать на ее основе эффективную целенаправленную деятельность АИМР, на практике не представляется возможным, так как заранее

неизвестно, с какими условиями столкнется робот в процессе функционирования в такой среде [6, 9]. Следовательно, АИМР должны обладать способностью адаптации к условиям неопределенности и на этой основе выполнять сформулированные им сложные задания.

Таким образом, возникает необходимость в разработке модели представления и обработки знаний, которая, с одной стороны, позволяет компактным образом в общем виде описать закономерности целенаправленного преобразования различных ситуаций априори неописанной проблемной среды безотносительно к конкретной предметной области и на этой основе наделять АИМР способностью адаптироваться к различным условиям функционирования. С другой стороны, модель представления знаний должна обеспечивать возможность вывода решений сложных задач в процессе планирования АИМР целенаправленного поведения с приемлемой для его бортовой ЭВМ сложностью.

В настоящей статье предлагается формализация мыслительных актов и процедур вывода решений, обеспечивающая возможность организации планирования поведения в априори неописанных нестабильных условиях функционирования на основе модели представления знаний в виде набора типовых конструкций, позволяющих АИМР автоматически строить сложные программы целенаправленной деятельности. В рассматриваемом случае типовые конструкции различного назначения модели представления знаний АИМР строятся на основе полипеременных условно-зависимых предикатов (ПУЗП), отличающихся от известных условно-зависимых предикатов, содержащих в структуре только условно-зависимые предметные переменные [6], наличием различного сорта условно-зависимых переменных. В общем случае ПУЗП могут включать переменные следующих сортов: полипеременные; объектные переменные; переменные события происходящего в проблемной среде и переменные сорта "отношения" между объектами, событиями и интеллектуальным роботом, которые должны наблюдаться в проблемной среде для успешной отработки АИМР действий, связанных с достижением заданной цели поведения. Это позволяет сформировать типовые конструкции модели представления знаний, обладающие высокими функциональными возможностями и наделяющие АИМР способностью адаптироваться к априори неописанным условиям функционирования.

Следует также отметить, что предложенные типовые конструкции модели представления знаний на основе ПУЗП, в отличие от ранее описанных, аналогичных им по назначению конструкций [10, 11], позволяют организовать целенаправленное поведение АИМР в нестабильных условиях проблемной среды.

2. Постановка задачи и принятые определения

Рассмотрим АИМР, который оснащен манипулятором, обладает техническим зрением и способен обрабатывать множество различных действий $B = \{b_{i_1}\}$, $i_1 = \overline{1, n_1}$. Проблемную среду можно охарактеризовать множе-

ством находящихся в ней объектов $O = \{o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*)\}$, $i_2 = \overline{1, n_2}$, и происходящими независимо от АИМР событиями $Y = \{y_{i_3}(Y_{i_3})\}$, $i_3 = \overline{1, n_3}$, которые могут негативным образом отразиться на отработке роботом определенных действий $b_{i_1} \in B$ в процессе целенаправленного поведения. Здесь X_{i_2} — множество признаков (характеристик), позволяющих АИМР идентифицировать $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$ объекты проблемной среды; $o_{i_2}^*$ — описание текущего состояния i_2 объекта проблемной среды; Y_{i_3} — множество характеристик, определяющих $y_{i_3}(Y_{i_3})$ событие, происходящее в проблемной среде.

Обобщенное описание допустимых ситуаций и подситуаций проблемной среды в модели представления знаний АИМР осуществляется безотносительно к конкретной предметной области с помощью активных нечетких семантических сетей $S^* = \{S_{h_1}^*\}$, $h_1 = \overline{1, m_1}$, [12]. В общем случае активная нечеткая семантическая сеть $S_{h_1}^* \in S^*$ представляет собой помеченный граф $G_{h_1} = (V_{h_1}, E_{h_1})$, где $V_{h_1} = \{v_{h_2}\}$, $h_2 = \overline{1, m_2}$, $E_{h_1} = \{e_{h_3}\}$, $h_3 = \overline{1, m_3}$, — соответственно множество вершин и ребер. Семантическая сеть $S_{h_1}^*$ называется активной, потому что в ней вершины $v_{h_2} \in V_{h_1}$ определяются слотами (переменными) двух видов: $X^* = \{x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})\}$, $i_4 = \overline{1, n_4}$, и $Y^* = \{y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)\}$, $i_5 = \overline{1, n_5}$, которые в процессе вывода решений означаются соответственно конкретными объектами и событиями проблемной среды, удовлетворяющими их требованиям. Например, в процессе вывода решений допускается замена слота $x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$, которым помечена активная вершина $v_{h_2} \in V_{h_1}$, произвольным объектом проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$, если для этого объекта выполняется условие $(X_{i_4}^* \subseteq X_{i_2})$.

Ребра $e_{h_3} \in E_{h_1}$ в активной нечеткой семантической сети $S_{h_1}^*$ помечаются переменными сорта “отношения”, которые определяются следующими тройками $\langle (t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6}), T_j^{i_6} \rangle$. Здесь $(t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$ — подынтервал допустимых численных значений $r_{i_6}^{i_6}$ отношения $r_{i_6} \in R$, которые должны наблюдаться в проблемной среде между ее объектами, событиями и АИМР для результативной отработки роботом определенных действий $b_{i_1} \in B$, например подынтервал расстояний, при которых АИМР способен захватить объекты, расположенные в проблемной среде, можно определить на основе разрешающей способности его манипулятора; $T_j^{i_6}$ — терм одноименной с отношением $r_{i_6} \in R$ лингвистической переменной, которому соответствует подынтервал численных значений $(t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$ на ее количественной шкале, например терм “расположен очень близко” [13]; $R = \{r_{i_6}\}$, $i_6 = \overline{1, n_6}$, — множество различного вида отношений, которые могут выполняться в проблемной среде между объектами, событиями и АИМР.

Следует отметить, что необходимый для вывода решений фрагмент наблюдаемой в проблемной среде ситуации в процессе планирования поведения формируется в виде семантической сети $S_{h_4} \in S$, $S = \{S_{h_4}\}$, $h = \overline{1, m_4}$, на основе данных, поступающих из системы технического зрения АИМР и активной нечеткой семантической сети $S_{h_1}^{**}$, определяющей заданную роботу цель поведения. Для этого в сети $S_{h_1}^{**}$ выполняется замена слотов

$x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$ и $y_{i_5}^* (Y_{i_5}^*) \in Y^*$ соответственно на удовлетворяющие их требованиям объекты $o_{i_2} (X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$ и события $y_{i_3} (Y_{i_3}) \in Y$, наблюдаемые в текущих условиях проблемной среды. В свою очередь ребра в формируемой семантической сети S_{h_4} помечаются количественными оценками $r_{i_6}^*$ отношений $r_{i_6} \in R$, которые выполняются в текущих условиях проблемной среды между объектами, событиями и АИМР, определяющими инцидентные им вершины. В результате этого активная нечеткая семантическая сеть $S_{h_1}^{**}$ становится пассивной и соответствует конкретной текущей подситуации проблемной среды.

Таким образом, необходимые для вывода решений фрагменты $S_{h_4} \in S$ допустимых ситуаций проблемной среды определяются помеченными графами $G_{h_4} = (V_{h_4}, E_{i_4})$, где $V_{h_4} = \{v_{h_5}\}$, $h_5 = \overline{1, m_5}$, — множество вершин, определяемых находящимися в проблемной среде объектами $o_{i_2} (X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$ и происходящими в ней событиями $y_{i_3} (Y_{i_3}) \in Y$ в соответствии с пометками структурно эквивалентных им вершин в сети $S_{h_1}^{**}$, из которой строится семантическая сеть S_{h_4} ; $E_{i_4} = \{e_{h_6}\}$, $h_6 = \overline{1, m_6}$, — множество ребер, помеченных количественными значениями $r_{i_6}^*$ отношений $r_{i_6} \in R$, выполняющимися в проблемной среде между объектами, событиями и АИМР, которыми помечены инцидентные им вершины в семантической сети S_{h_4} .

Типовые элементы представления знаний АИМР строятся на основе различных по содержанию ПУЗП.

Определение 1. В общем случае, например под трехместным ПУЗП, понимается выражение $P(S_{h_1}^, x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}), y_{i_5}^* (Y_{i_5}^*))$, которое становится истинным высказыванием после подстановки в него вместо условно-зависимых переменных $S_{h_1}^*$, $x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})$, $y_{i_5}^* (Y_{i_5}^*)$ их значений, соответственно из множеств S , O и Y при условии, что они удовлетворяют соответствующим этим переменным требованиям. Здесь P — предикатный символ, определяющий смысловое содержание ПУЗП; $S_{h_1}^*$ — полипеременная, область определения которой S представляет собой множество допустимых подsituаций проблемной среды, сформированных с учетом находящихся в ней объектов, событий и АИМР, а также количественных значений отношений, которые выполняются между ними в проблемной среде; $x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})$ — предметная переменная, областью определения которой O является множество находящихся в проблемной среде объектов; $y_{i_5}^* (Y_{i_5}^*)$ — переменная сорта “события”, область определения которой Y представляет собой множество событий, происходящих в проблемной среде.*

Таким образом, все переменные, входящие в структуру ПУЗП, фактически являются связанными допустимыми условиями их означивания, а сами формулы могут быть только выполнимыми в определенных условиях проблемной среды. При этом высказывания, получаемые в результате подстановки вместо условно-зависимых переменных соответствующих им констант в виде конкретных объектов и событий, которые наблюдаются АИМР в текущих условиях функционирования, являются истинными тогда и только тогда, когда выполняются следующие условия:

— все слоты $x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$ в сети $S_{h_1}^*$ и отдельные предметные переменные $x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})$, входящие в структуру ПУЗП, удается пометить находящимися в проблемной среде объектами;

— все слоты $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*) \in Y^*$ в подситуации S_{h_4} и отдельные переменные $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)$ в структуре ПУЗП являются помеченными происходящими в проблемной среде событиями $y_{i_3}(Y_{i_3}) \in Y$, удовлетворяющими их требованиям, т.е. при выполнении следующих условий $Y_{i_5}^* \subseteq Y_{i_3}$;

— фрагмент S_{h_4} текущей ситуации проблемной среды является нечетко равным сети $S_{h_1}^*$, определяющей полипеременную ПУЗП $P(S_{h_1}^*, x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*))$.

Определение 2. Семантическая сеть S_{h_4} является нечетко равной активной нечеткой семантической сети $S_{h_1}^$, если для них выполняются следующие условия:*

а) для каждой вершины $v_{h_2} \in V_{h_1}$ сети $S_{h_1}^*$, определяемой слотом $x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})$, существует структурно эквивалентная ей вершина $v_{h_5} \in V_{h_4}$ в сети S_{h_4} , помеченная объектом проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$, для которого выполняется условие $X_{i_4}^* \subseteq X_{i_2}$;

б) для каждой вершины $v_{h_2} \in V_{h_1}$ сети $S_{h_1}^*$, определяемой слотом $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)$, существует структурно эквивалентная ей вершина $v_{h_5} \in V_{h_4}$ в сети S_{h_4} , помеченная событием проблемной среды $y_{i_3}(Y_{i_3}) \in Y$, для которого выполняется условие $Y_{i_5}^* \subseteq Y_{i_3}$;

в) для каждого ребра $v_{h_2} \in V_{h_1}$ сети $S_{h_1}^*$, определяемого тройкой $\langle (t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6}), T_j^{i_6} \rangle$, существует структурно эквивалентное ему ребро $e_{h_6} \in E_{i_4}$ в сети S_{h_4} , помеченное количественным значением $r_{i_6}^*$ одновременного с пометкой вершины v_{h_2} отношения $r_{i_6} \in R$, которое попадает в интервал численных значений $(t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$.

Следует отметить, что если сравниваются между собой активные нечеткие семантические сети, то для их нечеткого равенства, помимо выполнения условий пп. а и б определения 2, требуется выполнение условия равенства пометок всех пар структурно эквивалентных в них ребер.

Пусть модель представления знаний АИМР в соответствии с его функциональным назначением состоит из набора типовых конструкций, сформированных на основе ПУЗП, которые имеют следующую структуру, содержание и условия их применения.

1. Импликативные решающие правила первого типа

$$P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle, \quad j_1 = \overline{1, m_7},$$

и

$$P_{j_2}(S_1^*(j_2), x_1^*(X_1^*, x_1^{**}), \dots, x_k^*(X_k^*, x_k^{**})) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle \quad j_2 = \overline{1, m_8},$$

сформированные соответственно на основе двухместных и k -местных ПУЗП, которые обеспечивают деятельность АИМР, связанную с целенаправленной

отработкой действий $b_{i_1} \in B$ над отдельными объектами проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$ для их перевода из текущего состояния $o_{i_2}^*$ в требуемое состояние $x_{i_4}^{**}$.

В общем случае, например, импликативное решающее правило $P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$, построенное на основе двухместного ПУЗП, имеет следующее содержание “Если ПУЗП $P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}))$ является выполнимым в текущих условиях проблемной среды, то для перевода объекта $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*)$ из текущего состояния $o_{i_2}^*$ в заданное состояние $x_{i_4}^{**}$, определяемое целью поведения $S_{h_1}^{**}$, следует обработать кортеж действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \in B_{j_1} \rangle$ ”. Здесь $S_1^*(j_1)$ — полипеременная, представляющая собой активную нечеткую семантическую сеть, определяющую условия, которые должны выполняться в проблемной среде для успешной отработки АИМР кортежа действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \in B_{j_1} \rangle$ над объектом проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*)$, который удовлетворяет требованиям предметной переменной $x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**})$.

2. Импликативные решающие правила второго типа $P_{j_3}(S_1^*(j_3), S_2^*(j_3)) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$, построенные на основе двухместных ПУЗП вида $P_{j_3}(S_1^*(j_3), S_2^*(j_3))$, $j_3 = \overline{1, m_8}$, имеющих следующее содержание “Преобразовать нечеткую семантическую сеть $S_1^*(j_3)$ в нечеткую семантическую сеть $S_2^*(j_3)$ ”. В общем случае данные импликативные решающие правила означают следующее: “Если в проблемной среде наблюдается подситуация, определяемая семантической сетью нечетко равной сети $S_1^*(j_3)$, а семантическая сеть, определяющая заданную АИМР целевую подситуацию среды, нечетко равна сети $S_2^*(j_3)$, то для преобразования текущей ситуации проблемной среды в заданную целевую ситуацию следует обработать кортеж действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$ ”.

3. Импликативные решающие правила третьего типа

$$P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle, \quad j_4 = \overline{1, m_9},$$

и

$$P_{j_5}(S_1^*(j_5), y_{i_5}^{1*}(Y_{i_3}^{1*}), \dots, y_{i_5}^{k*}(Y_{i_3}^{k*})) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle, \quad j_5 = \overline{1, m_{10}},$$

строющиеся соответственно на основе двухместных $P_{j_3}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*))$ и многоместных ПУЗП $P_{j_5}(S_1^*(j_5), y_{i_5}^{1*}(Y_{i_3}^{1*}), \dots, y_{i_5}^{k*}(Y_{i_3}^{k*}))$. Данные импликативные решающие правила позволяют АИМР выявлять кортежи действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$, отработка которых обеспечивает соответственно устранение негативного влияния на его дальнейшее поведение отдельных $y_{i_3}(Y_{i_3}) \in Y$ и взаимосвязанных между собой в проблемной среде событий $y_{i_3}^1(Y_{i_3}^1), \dots, y_{i_3}^k(Y_{i_3}^k) \in Y$, удовлетворяющих требованиям переменных сорта “события” $y_{i_2}^*(Y_{i_2}^*)$, т.е. когда для наблюдаемых в проблемной среде событий выполняется условие $Y_{i_2}^* \subseteq Y_{i_3}$. Здесь $S_1^*(j_4)$ и $S_1^*(j_5)$ — полипеременные, определяющие условия, при выполнении которых в проблемной среде отработка АИМР кортежа действий $\langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$ является результативной.

В общем случае в модели представления знаний АИМР целесообразно также иметь импликативные решающие правила третьего типа, в которых посылка представлена в виде различного сочетания, например, следующих пар ПУЗП:

$$\langle P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)), P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^*)) \rangle$$

и

$$\langle P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)), P_{j_2}(S_1^*(j_2), S_2^*(j_2)) \rangle,$$

позволяющих по их первой проекции установить наличие в проблемной среде событий $y_{i_3}(Y_{i_3}) \in Y$, удовлетворяющих требованиям условно-зависимых переменных $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)$, которые препятствуют отработке действий, определяемых на основе импликативных решающих правил первого и второго типа:

$$P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^*)) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle$$

и

$$P_{j_2}(S_1^*(j_2), S_2^*(j_2)) \rightarrow \langle b_{i_1}^1, b_{i_1}^2, \dots, b_{i_1}^d \rangle.$$

Следовательно, комбинированные импликативные решающие правила имеют, например, следующую структуру:

$$(1) \quad \begin{aligned} &\langle P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)), P_{j_2}(S_1^*(j_2), S_2^*(j_2)) \rangle \rightarrow \\ &\rightarrow \langle \langle b_{i_1}^{1,1}, b_{i_1}^{2,1}, \dots, b_{i_1}^{d,1} \rangle, \langle b_{i_1}^{1,2}, b_{i_1}^{2,2}, \dots, b_{i_1}^{d,2} \rangle \rangle. \end{aligned}$$

Согласно решающему правилу (1) АИМР сначала обрабатывает кортеж действий $\langle b_{i_1}^{1,1}, b_{i_1}^{2,1}, \dots, b_{i_1}^{d,1} \rangle$, позволяющих устранить влияние на его дальнейшее поведение событий проблемной среды, удовлетворяющих требованиям переменной $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)$. Затем роботом обрабатывается кортеж действий $\langle b_{i_1}^{1,2}, b_{i_1}^{2,2}, \dots, b_{i_1}^{d,2} \rangle$, позволяющих выполнить преобразование текущей под-ситуации проблемной среды нечетко равной сети $S_1^*(j_2)$ в подситуацию, описываемую сетью нечетко равной сети $S_2^*(j_2)$.

Следует отметить, что если в проблемной среде отсутствуют события, удовлетворяющие требованиям переменной $y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)$, то ПУЗП $P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*))$ является невыполнимым, и в этом случае блокируется отработка первого кортежа действий, а АИМР выполняет только действия второго кортежа.

Таким образом, имея модель представления знаний, состоящую из вышеописанных конструкций, для организации интеллектуального решателя задач АИМР возникает необходимость в разработке принципа построения процедур планирования целенаправленного поведения в различных недоопределенных условиях функционирования, позволяющих роботу выполнять преобразование различных исходных ситуаций проблемной среды в заданные целевые ситуации.

3. Принцип построения процедур планирования поведения АИМР

В общем случае принцип построения процедур автоматического планирования целенаправленного поведения АИМР на основе типовых элементов представления знаний, построенных на базе различных ПУЗП, состоит из следующих друг за другом этапов.

1. Этап, позволяющий проверить возможность достижения полученной цели поведения $S_{h_1}^{**}$ в текущих условиях проблемной среды. Инструментальные средства данного этапа планирования поведения АИМР представляют собой методику решения следующей типовой задачи “Построить фрагмент целевой подситуации $S_{h_4}^*$, определяющий участок проблемной среды, на котором предстоит действовать АИМР для достижения заданной цели”. Для решения данной задачи осуществляется пометка слотов $x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$ в активной нечеткой семантической сети $S_{h_1}^{**}$ находящимися в проблемной среде объектами $o_{i_2} (X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$, для которых выполняется условие $X_{i_4}^* \subseteq X_{i_2}$. При этом после проведения пометки слотов $x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$ в сети $S_{h_1}^{**}$ объектами проблемной среды в полученном в результате этого фрагменте описания ее целевой подситуации $S_{h_4}^*$ сохраняются обозначенные в этих слотах необходимые для достижения заданной цели состояния $x_{i_4}^{**}$ объектов, т.е. соответствующие вершины в сети $S_{h_4}^*$ определяются пометками $o_{i_2} (X_{i_2}, x_{i_4}^{**})$.

Затем проверяется условие “все слоты $x_{i_4}^* (X_{i_4}^*, x_{i_4}^{**}) \in X^*$ в активной нечеткой семантической сети $S_{h_1}^{**}$ в процессе построения из нее семантической сети $S_{h_4}^*$ являются помеченными находящимися в проблемной среде объектами $o_{i_2} (X_{i_2}, o_{i_2}^{**}) \in O$ ”. Если данное условие выполняется, то в интеллектуальном решателе задач АИМР осуществляется построение фрагмента текущей подситуации проблемной среды S_{h_4} . В противном случае принимается решение о том, что полученная цель поведения не может быть достигнута в текущих условиях проблемной среды из-за отсутствия в ней необходимых для этого объектов.

2. Этап построения инструментов формирования описания текущей подситуации проблемной среды S_{h_4} , которые реализуются путем выполнения следующих изменений пометок вершин и ребер в сети $S_{h_4}^*$:

— замены пометок ребер на количественные значения $r_{i_6}^*$ отношений $r_{i_6} \in R$, наблюдаемые в текущих условиях проблемной среды между объектами, событиями и АИМР, которыми определяются инцидентные им вершины;

— замены требуемых состояний $x_{i_4}^{**}$ объектов проблемной среды, которыми помечены соответствующие вершины в сети $S_{h_4}^*$, на текущие в проблемной среде их состояния $o_{i_2}^{**}$;

— замены пометок вершин, определяемых слотами $y_{i_5}^* (Y_{i_5}^*) \in Y^*$, на удовлетворяющие их требования события, происходящие в проблемной среде.

3. Этап приведения целевой подситуации проблемной среды, определяемой сетью $S_{h_4}^*$, к удобной для вывода решений форме. Для этого строятся инструментальные средства, позволяющие выполнить решение следующей типовой задачи “Установить все различия между значениями одноименных отноше-

ний, которыми помечены структурно эквивалентные ребра в семантических сетях S_{h_4} и $S_{h_4}^*$. Чтобы выявить наличие таких различий, для пометок всех пар структурно эквивалентных ребер в сетях S_{h_4} и $S_{h_4}^*$ проверяется условие " $r_{i_6}^* \in (t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$ ", где $r_{i_6}^*$ и $(t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$ — количественное значение и интервал численных значений отношения $r_{i_6} \in R$, которыми соответственно помечены структурно эквивалентные ребра в сетях S_{h_4} и $S_{h_4}^*$. Если данное условие выполняется для определенной пары структурно эквивалентных ребер в сетях S_{h_4} и $S_{h_4}^*$, то принимается решение о том, что между значениями соответствующего им отношения в исходной и целевой подситуациях проблемной среды различие отсутствует.

Затем в сетях S_{h_4} и $S_{h_4}^*$ удаляются пометки всех структурно эквивалентных ребер, для которых выполняется условие " $r_{i_6}^* \in (t_j^{i_6}, t_{j+1}^{i_6})$ ", и принимается решение о том, что для достижения заданной цели $S_{h_4}^{**}$ требуется определить последовательность действий $b_{i_1} \in B$, обработка которой позволит выполнить преобразование исходной подситуации проблемной среды, определяемой сетью S_{h_4} , в ее целевую подситуацию, описанную сетью $S_{h_4}^*$.

4. Этап определения автономно решаемых подзадач, который сводится к разбиению уточненной целевой подситуации проблемной среды, определяемой сетью $S_{h_4}^*$, на не связанные между собой ее подсети. Для этого из семантических сетей S_{h_4} и $S_{h_4}^*$ удаляются все непомеченные ребра. Затем формируется множество пар структурно эквивалентных между собой семантических подсетей $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$, $j_7 = \overline{1, m_{11}}$.

Следует отметить, что если после удаления непомеченных ребер из семантических сетей S_{h_4} и $S_{h_4}^*$ в результате получаются только их частичные сети $S_{h_4}^-$ и $S_{h_4}^{*-}$, то вывод решения полученной таким образом задачи $\langle S_{h_4}^- \subset S_{h_4}, S_{h_4}^{*-} \subset S_{h_4}^* \rangle$ выполняется на основе данных частей в целом, т.е. без их последующего разбиения.

5. Этап выбора для каждой полученной подзадачи $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$ комбинированного импликативного решающего правила:

$$\begin{aligned} & \langle P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)), P_{j_2}(S_1^*(j_2), S_2^*(j_2)) \rangle \rightarrow \\ & \rightarrow \langle b_{i_1}^{1,1}, b_{i_1}^{2,1}, \dots, b_{i_1}^{d,1} \rangle, \langle b_{i_1}^{1,2}, b_{i_1}^{2,2}, \dots, b_{i_1}^{d,2} \rangle, \end{aligned}$$

для которого подсети $S_{h_4}(j_7)$ и $S_{h_4}^*(j_7)$ соответственно являются нечетко равными полипеременным $S_1^*(j_2)$ и $S_2^*(j_2)$.

В этом случае обработка АИМР первого кортежа действий, входящего в структуру найденного таким образом импликативного решающего правила, позволяет устранить влияние события $y_{i_3}(Y_{i_3}) \in Y$ при его наличии в проблемной среде, т.е. когда в среде наблюдается событие, удовлетворяющее условию $Y_{i_3}^* \subseteq Y_{i_3}$. Затем АИМР обрабатывает действия второго кортежа $\langle b_{i_1}^{1,2}, b_{i_1}^{2,2}, \dots, b_{i_1}^{d,2} \rangle$, что позволяет осуществить преобразование текущей подситуации проблемной среды в ее целевую подситуацию.

При отсутствии в модели представления знаний импликативного решающего правила, удовлетворяющего описанным выше требованиям, в интеллек-

туальном решателе задач включаются процедуры планирования поведения, позволяющие сформировать необходимую для достижения заданной подцели последовательность импликативных решающих правил. Автоматический синтез такой последовательности комбинированных импликативных решающих правил третьего типа осуществляется следующим образом. На первом шаге планирования определяется импликативное решающее правило, построенное на основе ПУЗП $P_{j_2}(S_1^*(j_2), S_2^*(j_2))$, у которого полипеременная $S_2^*(j_2)$ является нечетко равной сети $S_{h_4}^*(j_7)$. Затем на следующем шаге планирования определяется импликативное решающее правило, сформированное на основе ПУЗП $P_{j_2,2}(S_{1,2}^*(j_2), S_{2,2}^*(j_2))$, у которого полипеременная $S_{2,2}^*(j_2)$ является нечетко равной полипеременной $S_1^*(j_2)$, входящей в структуру решающего правила, найденного на предыдущем шаге планирования поведения. Данный процесс построения цепочки взаимосвязанных между собой импликативных решающих правил продолжается до тех пор, пока не будет найдено решающее правило k , полипеременная $S_{1,k}^*(j_2)$ которого является нечетко равной сети $S_{h_4}(j_7)$, определяющей исходную подситуацию проблемной среды. После этого принимается решение о том, что план поведения АИМР, обеспечивающий решение j_7 подзадачи, является сформированным и т.д., пока не будет получено решение всех сформулированных подзадач $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$.

Следует отметить, что если в модели представления знаний АИМР отсутствует импликативное решающее правило, у которого полипеременная $S_{1,1}^*(j_2)$ нечетко равна сети $S_{h_4}^*(j_7)$, определяющей целевую подситуацию проблемной среды, но имеется совокупность решающих правил, полипеременные которых представляют собой разбиение этой сети на подсети, то решение рассматриваемой подзадачи $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$ сводится к построению соответствующего ей дерева вывода в пространстве состояний [8]. Каждая ветвь такого дерева представляет собой подплан поведения АИМР, состоящий из цепочек импликативных решающих правил, определяющих последовательность действий, отработка которых в заданном порядке обеспечивает достижение одной из подцелей, на которые разбивается целевая подситуация проблемной среды, определяемая сетью $S_{h_4}^*(j_7)$.

6. Этап определения подзадач, связанных с манипулированием объектами проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*)$ с целью их перевода из текущего состояния $o_{i_2}^*$ в требуемое согласно заданной цели состояние x_2^{**} . В этом случае если для решения одной из текущих подзадач $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$ в модели представления знаний отсутствует импликативное решающее правило:

$$(2) \quad \begin{aligned} &\langle P_{j_4}(S_1^*(j_4), y_{i_5}^*(Y_{i_5}^*)), P_{j_1}(S_1^*(j_1), x_{i_4}^*(X_{i_4}^*, x_{i_4}^*)) \rangle \rightarrow \\ &\rightarrow \langle \langle b_{i_1}^{1,1}, b_{i_1}^{2,1}, \dots, b_{i_1}^{d,1} \rangle, \langle b_{i_1}^{1,2}, b_{i_1}^{2,2}, \dots, b_{i_1}^{d,2} \rangle \rangle, \end{aligned}$$

отработка действий которого позволяет перевести заданный объект в требуемое состояние, то планирование поведения АИМР сводится к формированию упорядоченной последовательности таких правил. Данная последовательность решающих правил строится таким образом, чтобы состояние заданного объекта $x_{i_4,1}^{**}$, определяемое ее первым ПУЗП, совпадало с его исходным

состоянием $o_{i_2}^*$ в проблемной среде, а состояние $x_{i_4, k}^{**}$, входящее в структуру последнего решающего правила строящейся цепочки, соответствовало бы его целевому состоянию, т.е. в этом случае строится цепочка имплицативных решающих правил, позволяющая определить такую последовательность действий, отработка которых позволяет осуществить перевод рассматриваемого объекта проблемной среды в требуемое состояние путем его перехода через ряд допустимых промежуточных состояний.

7. Этап совмещения процедур планирования поведения, связанных с преобразованием подситуаций проблемной среды, определяемых подсетями $S_{h_4}(j_7)$ в подситуации, описываемые подсетями $S_{h_4}^*(j_7)$, с процедурами планирования поведения, обеспечивающими перевод одноименных в этих подситуациях объектов в состояния, определяемые заданной целью поведения $S_{h_1}^{**}$. Такое совмещение различных по назначению процедур планирования поведения осуществляется следующим образом. Пусть в процессе преобразования подситуации, описанной подсетью $S_{h_4}(j_7)$, в подситуацию, представленную подсетью $S_{h_4}^*(j_7)$, требуется выполнить определенные действия над некоторым объектом проблемной среды и, кроме того, необходимо еще перевести этот объект из исходного состояния $o_{i_2}^*$ в заданное состояние $x_{i_4}^{**}$.

В этом случае АИМР сначала отрабатывает действия над рассматриваемым объектом, связанные с устранением определенного различия между исходной и целевой подситуациями проблемной среды, а затем переводит данный объект в требуемое состояние. После этого аналогичным образом продолжается совмещенная отработка действий различных по назначению сформированных подпланов поведения и над другими объектами проблемной среды, входящими в структуру подситуаций, определяемых подсетями $S_{h_4}(j_7)$ и $S_{h_4}^*(j_7)$.

Введем понятие функциональной сложности β_1 процедур планирования поведения АИМР, построенных по выше описанному принципу, связанных с преобразованием исходной подситуации проблемной среды, описанной сетью S_{h_4} , в целевую подситуацию, представленную сетью $S_{h_4}^*$, путем устранения имеющихся между ними различий по значениям одноименных отношений. Полагаем, что функциональная сложность β_1 определяется общим количеством элементарных операций сравнения, выполняемых при сопоставлении между собой сетей S_{h_4} и $S_{h_4}^*$ в процессе вывода решения задачи, связанной с определением последовательности действий, отработка которых АИМР позволяет выполнить достижение заданной цели в текущих условиях функционирования. Для оценки сложности β_1 докажем утверждение 1.

Утверждение 1. Верхняя граничная оценка сложности β_1 удовлетворяет неравенству: $\beta_1 \leq \sum_{j_7=1}^{m_{11}} \sum_{j_8=1}^{m_{j_7}} m_1^ n^2(j_7)$, где m_{11} — количество подзадач, на которое разбивается задача преобразования исходной подситуации проблемной среды в ее целевую подситуацию, которые соответственно определяются семантическими сетями S_{h_4} и $S_{h_4}^*$; m_{j_7} — количество шагов планирования поведения АИМР, выполняемых в процессе поиска решения j_7 подзадачи $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$; m_1^* — количество имплицативных решающих правил (1), хранящихся в модели представления зна-*

ний АИМР; $n(j_7)$ — количество вершин в сравниваемых между собой семантических сетях в процессе решения j_7 подзадачи.

Доказательство. 1. На каждом шаге планирования поведения в худшем случае необходимые для решения текущей подзадачи $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$ импликативные решающие правила могут быть выбраны в последнюю очередь. Следовательно, количество сравнений между собой нечетких семантических сетей в процессе поиска решения каждой подзадачи $\langle S_{h_4}(j_7) \subset S_{h_4}, S_{h_4}^*(j_7) \subset S_{h_4}^* \rangle$ не может превышать величины, равной m^* .

2. В процессе поиска каждого результативного импликативного решающего правила между собой сравниваются семантические сети, которые представляют собой помеченные графы. Следовательно, количество сравнений пометок структурно эквивалентных вершин и ребер в процессе определения нечеткого равенства семантических сетей не может превышать величины, равной $n^2(j_7)$. Это обусловлено тем, что при сравнении между собой семантических сетей практически решается задача определения изоморфизма помеченных графов с точностью до равенства пометок структурно эквивалентных в них вершин и ребер.

3. Из пп. 1 и 2 проводимого доказательства с очевидностью следует справедливость утверждения 1.

Определим верхнюю граничную оценку функциональной сложности β_2 процедур планирования поведения, позволяющих АИМР осуществить перевод объектов проблемной среды $o_{i_2}(X_{i_2}, o_{i_2}^*) \in O$ из их текущих состояний $o_{i_2}^*$ в состояния x_2^{**} , обозначенные в ее целевой подситуации, определяемой сетью $S_{h_4}^*$.

Утверждение 2. Верхняя граничная оценка функциональной сложности β_2 удовлетворяет неравенству: $\beta_2 \leq \sum_{j_7=1}^{m_{11}} \sum_{j_8=1}^{m_{j_7}} m_2^* n^2(j_7)$, где m_2^* — количество импликативных решающих правил (2), хранящихся в модели представления знаний АИМР.

Доказательство справедливости утверждения 2 проводится аналогично доказательству утверждения 1.

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что предложенная модель представления и обработки знаний может быть использована для построения решателей задач интеллектуальных систем различного назначения, функционирующих в окружающих средах с различной степенью априорной неопределенности, для развития интеллектуальной системы автоматического проектирования сложных технологических маршрутов в машиностроении [14].

4. Заключение

1. Построенная модель представления и обработки знаний позволяет синтезировать интеллектуальный решатель задач и организовать на этой основе вывод решения различных по сложности задач в процессе автоматического планирования целенаправленного поведения АИМР с приемлемой для

его бортовой вычислительной системы сложностью. Об этом свидетельствуют найденные верхние граничные оценки процедур планирования поведения АИМР, построенные по предложенному принципу организации вывода решений.

2. Разработанные на основе ПУЗП типовые элементы представления знаний позволяют описывать сложные закономерности целенаправленного преобразования различных ситуаций и подситуаций проблемной среды безотносительно к конкретной предметной области. Это наделяет АИМР способностью адаптироваться к различным, априори неописанным условиям функционирования путем конкретизации заданных в общем виде различных по назначению типовых конструкций модели представления знаний и выполнять на этой основе различные по сложности задания в реальной проблемной среде.

3. Предложенные инструменты обработки знаний на различных этапах планирования целенаправленной деятельности позволяют АИМР определять действия, связанные с преобразованием различных текущих подситуаций проблемной среды в подситуации, определяющие достижение заданной цели поведения.

4. Дальнейшее развитие проведенного исследования сводится к разработке принципа построения процедур планирования целенаправленной деятельности при процедурной форме представления цели, заданной в виде взаимосвязанных между собой ключевых подзадач поведения. Наличие таких процедур планирования поведения в сочетании с процедурами, разработанными в настоящей статье, позволяет существенным образом повысить функциональные возможности АИМР за счет расширения класса задач, которые он становится способным решать в различных условиях проблемной среды. Например, осуществлять поиск заданных объектов в проблемной среде при неизвестных координатах их местоположения в процессе выполнения различного вида спасательных работ и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Формы мышления автономных интеллектуальных агентов: особенности и проблемы их организации // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4. Т. 1. С. 223–229.
2. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Инструментальные средства управления целесообразным поведением самоорганизующихся автономных интеллектуальных агентов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 4. С. 171–180.
3. *Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А.* Социальные сообщества роботов. М.: ЛЕНАНД, 2019.
4. *Земских Л.В., Смирнов Е.К., Жданов А.А., Бабакова В.В.* Применение генетических алгоритмов для оптимизации адаптивных систем управления мобильного робота на параллельном вычислительном комплексе // Тр. Института системного программирования РАН. 2004. Т. 7. С. 79–104.
5. *Кудирин А.А., Николенко С.И.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. СПб.: Питер, 2018.

6. *Melekhin V.B.* Model of Representation and Acquisition of New Knowledge by an Autonomous Intelligent Robot Based on the Logic of Conditionally Dependent Predicates // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2019. No. 58 (5). P. 747–765.
7. *Плесневич Г.С.* Логические модели / Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Методы и модели: Справочник. Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. С. 14–28.
8. *Варламов О.О., Алладдин Д.В.* О применении миварных сетей для интеллектуального планирования поведения роботов в пространстве состояний // *Изв. Кабардино–Балкарского научного центра РАН.* 2018. № 6–2 (86). С. 75–82.
9. *Каляев А.В., Чернухин Ю.В., Носков В.Н., Каляев И.А.* Однородные управляющие структуры адаптивных роботов. М.: Наука, 1990.
10. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Ч. 1. Структура и применение фрейм-микропрограмм поведения // *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2018. № 2. С. 73–83.
11. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Планирование поведения интеллектуального беспилотного летательного аппарата в недоопределенной проблемной среде. Ч. 2. Структура и применение фреймов действий // *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2018. № 3. С. 46–56.
12. *Мелехин В.Б., Хачумов М.В.* Нечеткие семантические сети как адаптивная модель представления знаний автономных интеллектуальных систем // *Искусственный интеллект и принятие решений.* 2020. № 3. С. 61–72.
13. *Флегонтов А.В., Вилков В.Б., Черных А.К.* Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. СПб.: Лань, 2020.
14. *Мелехин В.Б., Хачумов В.М.* Интеллектуальная система автоматического проектирования технологических маршрутов обработки деталей в машиностроении // *Автоматизация в промышленности.* 2018. № 9. С. 13–20.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Пальчуновым.

Поступила в редакцию 03.10.2021

После доработки 15.12.2021

Принята к публикации 30.12.2021