

26. *Hamed Shah-Hosseini*. Intelligent water drops algorithm: a new optimization method for solving the multiple knapsack problem, *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2008, Vol. 1, No. 2, pp. 193-212.
27. *Zhao W., Wang L., Zhang Z.* Artificial ecosystem-based optimization: a novel nature-inspired meta-heuristic algorithm, In: *Neural Computing and Applications*, 2020, Vol. 32, No. 13, pp. 9383-9425.
28. *Odili J.B., Kahar M.N.M.* African Buffalo Optimization: A Swarm-Intelligence Technique, *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 76, pp. 443-448.
29. *Mehrabian A.R., Lucas C.A.* Novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization, *Ecological Informatics*, 2006, Vol. 1, No. 4, pp. 355-366.
30. *Pantelev A.V., Metlitskaya D.V., Aleshina E.A.* Metody global'noy optimizatsii. Metaevristicheskie strategii i algoritmy [Methods of global optimization. Metaheuristic strategies and algorithms]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2013, 244 p.

Курейчик Владимир Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: vkur@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Балясова Юлия Владимировна – e-mail: baliasova@sfedu.ru; тел.: +79185774576; кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; аспирант.

Бова Виктория Викторовна – e-mail: vvbova@yandex.ru; тел.: 88634371651 кафедра систем автоматизированного проектирования им. В.М. Курейчика; доцент.

Kureichik Vladimir Victorovich – Southern Federal University; e-mail: vkur@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Balyasova Yulia Vladimirovna – e-mail: baliasova@sfedu.ru; phone: +79185774576; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; graduate student.

Bova Victoria Victorovna – e-mail: vvbova@yandex.ru; phone: +78634371651; the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik; associate professor.

УДК 007.52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-29-42

Е.А. Назаров, М.Е. Данилин, Е.Ю. Косенко

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В статье рассматривается математическое обоснование алгоритма построения маршрута для обеспечения движения мобильного робототехнического комплекса (РТК) в процессе следования за оператором при решении задач автономного управления с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ). Представлен подход к реализации задачи обеспечения автономности следования мобильного РТК за оператором по принципу «следуй за мной». В качестве основного метода выбран метод погони, обеспечивающий следование РТК за ведущим оператором на заданном расстоянии. Моделирование движения РТК вслед за оператором осуществляется в сопровождающей системе координат для более корректного описания движения материальной точки по криволинейной траектории. В качестве исходных данных используются два динамических массива чисел, включающих в себя информацию о расстоянии от видеокамеры РТК до ведущего оператора и о величине курсового угла между продольной осью комплекса и линией визирования. Построение маршрута осуществляется с запозданием, после того как ведущий оператор условно сделал один шаг в направлении от робота. Введение нечеткости в процесс управления подразумевает оценивание воздействий и реакций совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалами каких-либо физических величин. На основе предлагаемого подхода разработан алгоритм, который реализован в программной среде Python с использованием библиотеки встроенных функций для работы с аппаратом нечеткой логики Skfuzzy. Для оценивания точности реализации целевой функции проведено

имитационное моделирование. Анализ полученных результатов позволил выявить основные преимущества применения нечеткой логики для решения задач автоматизации по сравнению с традиционными подходами теории автоматического управления.

Робототехнический комплекс; построение маршрута; автономное управление; искусственный интеллект; нечеткая логика; нечеткий логический вывод.

E.A. Nazarov, M.E. Danilin, E.Y. Kosenko

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING THE ROUTE OF A ROBOTIC COMPLEX USING THE FUZZY LOGIC METHOD

This article presents the mathematical justification of a path planning algorithm for a mobile robotic complex (MRC) following an operator during autonomous control tasks using artificial intelligence (AI). A proposed approach implements a "follow me" autonomous following task for the MRC. A pursuit method is selected as the primary method, ensuring the MRC follows the leading operator at a specified distance. The MRC's movement simulation is performed in a moving coordinate system to more accurately describe the movement of a material point along a curvilinear trajectory. The input data consists of two dynamic arrays containing information about the distance from the MRC's camera to the leading operator and the course angle between the complex's longitudinal axis and the line of sight. Path planning is performed with a delay, after the leading operator has conditionally taken one step away from the robot. The introduction of fuzziness in the control process implies evaluating actions and reactions with a set of terms that are associated with a certain degree of confidence with specific intervals of physical quantities. Based on this approach, an algorithm was developed and implemented in the Python programming environment using the Skfuzzy library's built-in fuzzy logic functions. Simulation modeling was conducted to evaluate the accuracy of the target function implementation. Analysis of the results revealed the main advantages of using fuzzy logic for automation tasks compared to traditional approaches in automatic control theory.

Robotic complex; path planning; autonomous control; artificial intelligence; fuzzy logic; fuzzy inference.

Введение. Современные робототехнические системы представляют собой совокупность последних достижений науки, техники, а их универсальность позволяет применять их для решения самых разнообразных задач [1–4].

Успешное достижение цели роботом невозможно без использования систем автоматического управления, которые могут быть реализованы на основе различных подходов: классической теории автоматического управления [5], позиционно-траекторного управления [Там же], аппарата нечеткой логики [6–9], искусственных нейронных сетей [10–11], и т.д.

Задача обеспечения автономности следования мобильного РТК за оператором является одним из актуальных направлений исследований в современной робототехнике, т.к. несмотря на большое количество существующих решений, ни одно из них нельзя назвать универсальным. Прежде всего, следует заметить, что решение этой задачи однозначно классифицируется как технология ИИ, т.к. ее функциональное назначение очень гармонично укладывается в рамки определения этого понятия, сформулированного нормативными документами.

Так, согласно [12] технология ИИ определяется как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами познавательной деятельности человека. Также в это определение можно добавить еще и высшее животное, например, лошадь или собаку, которым безусловно присущи когнитивные функции. Этот очевидный факт подтверждается и тысячелетней историей использования человеком в качестве транспорта обученных, выючных животных для перевозки материальных средств.

Для мобильного робота транспортного назначения эта технология реализуется следующим образом. У оператора на одежде со стороны спины закрепляется ArUco-маркер [13]. Система управления с помощью видеокамеры распознает метку, определяет полярные координаты ведущего и формирует команды электроприводам, обеспечивая движение вслед на заданном расстоянии.

Если рассматривать технологию ИИ как совокупность математических, алгоритмических, программных и аппаратных решений [14], интегрированных в систему управления мобильного РТК, то без всякого сомнения можно сделать вывод о приоритетных значениях математической и алгоритмической составляющих, которые в аспекте функционального назначения мобильного транспортного комплекса могут именоваться алгоритмами обеспечения автономного следования за ведущим. Функциональное многообразие частных задач, выполнение которых должна обеспечить технология «Следуй за мной», позволяет представить ее совокупностью программных продуктов. Результаты декомпозиции технологии поясняются схемой, показанной на рис. 1.

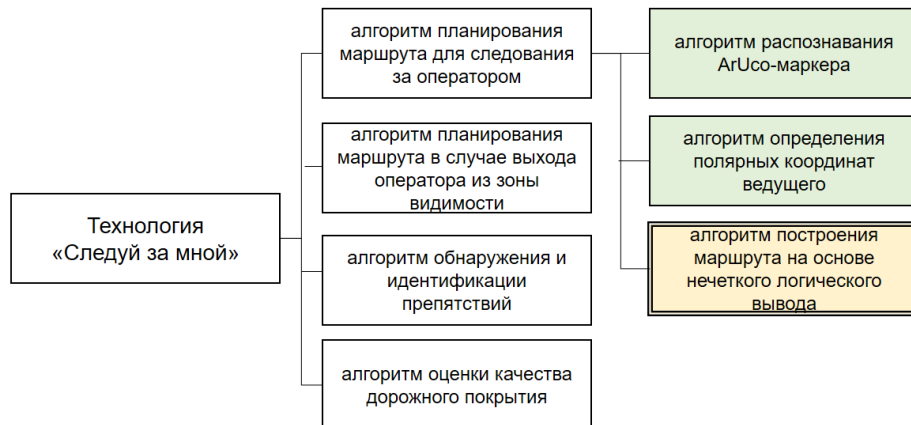


Рис. 1. Схема, поясняющая состав технологии «Следуй за мной»

Первое место в комплексе технологических решений однозначно отводится алгоритму планирования маршрута, который, в свою очередь, также представлен совокупностью частных алгоритмов. Для улучшения качества управления внедрение технологии ИИ в систему управления транспортного РТК видится путем применения аппарата нечеткой логики для решения задачи построения маршрута. Основанием для этого служит тот факт, что классификационный признак «методы обработки информации» национального стандарта [15] относит систему с «нечеткими знаниями» к категории систем ИИ.

Формулировка задачи и обзор методов преследования. Возвращаясь к первой составляющей в определении технологии ИИ [14, 27], а точнее к математическому решению, которое должно основываться на хорошо апробированном аппарате теории поиска и преследования движущихся объектов. Само понятие преследования с кинематической точки зрения рассматривается как сближение управляемой системы с некоторой подвижной целью. По ходу приближения система управления преследователя формирует управляющее воздействие на основе текущей информации о параметрах цели, характеризующих ее скорость и направление.

В настоящее время известно большое количество разнообразных алгоритмов преследования. При этом, можно однозначно констатировать отсутствие единого универсального метода, который бы обладал требуемой эффективностью для любого типа сопровождаемого объекта [16]. Результаты сравнительного анализа характеристик методов преследования обобщены в табл. 1.

Учитывая то обстоятельство, что целевой функцией разрабатываемого алгоритма является не достижение цели, а ее сопровождение, точнее следование за ведущим оператором на заданном расстоянии, то наиболее предпочтительным является выбор метода погони. Сущность этого метода поясняется на схеме (рис. 2).

Таблица 1

Сравнительные характеристики классических алгоритмов преследования

Характеристики	Методы			
	погони	постоянного угла упреждения	параллельного сближения	пропорционального сближения
направление вектора скорости преследователя	в любой момент времени направлен на цель	в любой момент времени упреждает линию визирования на постоянную величину	программный курсовой угол преследователя определяется $\varphi = \arcsin \frac{V_k \sin(\pi - \alpha)}{r}$	угловая скорость линии визирования пропорциональна угловой скорости цели
особенности	преследование только вслед, с острого догонного угла $\varphi < \pi/2$; траектория сильно искривлена.	траектория менее искривлена	прямолинейная траектория сближения	учет тенденции поворота линии визирования
достоинства	простота исходных данных	возможность сближения на встречном курсе	в случае совершения маневра нормальное ускорение для преследователя не превышает нормальное ускорение для цели	универсальность алгоритма
недостатки	преследование только тихих, не маневрирующих целей	обязательное наличие информации о знаке отклонения цели от линии визирования	необходимость постоянного обновления информации о курсовом угле и скорости цели	--

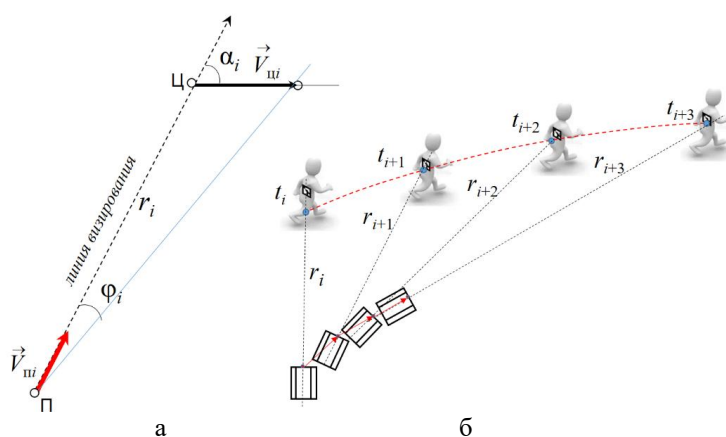


Рис. 2. Схема, поясняющая возможность применения метода погони для построения маршрута транспортного РТК

Определяющими аргументами для выбора метода погони являются его характеристики:

1. Возможность преследования тихоходных, не маневрирующих целей (людей, передвигающихся пешим порядком).

2. Немаловажную роль играет относительно не сложный математический аппарат, для пояснения принципа действия которого используются следующие обозначения (рис. 2,а):

П – преследователь (транспортный РТК);

Ц – цель (ведущий оператор);

$\vec{V}_п$ – вектор скорости преследователя;

$\vec{V}_ц$ – вектор скорости цели;

r_i – величина дистанции между преследователем и целью в момент времени t_i ;

ϕ_i – курсовой угол преследователя, т.е. угол между вектором скорости $V_п$ и линией визирования (линией «П – Ц»);

α_i – курсовой угол цели (угол между вектором скорости $V_ц$ и линией визирования).

В отличие от метода погони алгоритм планирования маршрута для мобильного РТК будет отличаться функциональным предназначением. Если в процессе преследования решается задача достижения цели, то при реализации режима «Следуй за мной» РТК должен двигаться за ведущим оператором на некотором удалении, по возможности повторяя его траекторию (рис. 2,б). Это еще один аргумент в пользу выбора метода погони в качестве базового.

Следует учесть, что если для алгоритмов преследования целевая функция формализуется как $\lim_{t \rightarrow t_{min}} r(t) = 0$, то для случая следования на расстоянии:

$$(r - \Delta_r) \leq r(t) \leq (r + \Delta_r), \quad (1)$$

где r – установленная дистанция между РТК и ведущим (в рассматриваемом случае $r = 5$ м);

Δ_r – допустимый предел изменения дистанции между РТК и оператором по ходу движения.

Разработка алгоритма планирования маршрута для следования за ведущим оператором. Моделирование движения РТК вслед за оператором предлагается осуществить в сопровождающей системе координат [17] для более корректного описания движения материальной точки по криволинейной траектории. В этой системе начало координат совмещается с видеокамерой РТК и перемещается вслед за оператором по построенному алгоритмом маршруту. В качестве исходных данных используются два динамических массива чисел, включающих в себя информацию о расстоянии от видеокамеры до ведущего оператора r и о величине курсового угла между продольной осью комплекса и линией визирования ϕ , и образующих систему:

$$\left. \begin{aligned} r &= r(t) \\ \phi &= \phi(t) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Данная система является также параметрической формой записи уравнения траектории движения РТК, состоящей в одновременном выполнении двух эмпирических зависимостей, детерминированных во времени.

Оценка значений функций системы (2) производится алгоритмом определения полярных координат (рис. 1) на основании результатов обработки видеоряда, поступающего с цифровой камеры. Таким образом, значения функций системы (2) обретают конкретные значения.

Обращается внимание на особенность модели движения, которую предлагается использовать для алгоритма планирования маршрута. Это – дискретизация передвижения ведущего оператора, который шагает в выбранном направлении, указывая путь роботу. Другими словами, за условную единицу измерения длины пройденного расстояния выбирается усредненный размер шага взрослого мужчины $r_{ш} = 0,76$ м [18].

Учитывая то, что физический смысл вектора скорости – это расстояние, которое тело проходит в определенном направлении за единицу времени, то в сопровождающей системе под радиальным ортом предлагается понимать единичный вектор с модулем $|\vec{V}_r| = \frac{\Delta_{ш}}{\Delta t_{ш}}$

($\Delta t_{\text{ш}} = \frac{\Delta_{\text{ш}}}{1,4} = \frac{0,76}{1,4} \approx 0,55$ с) и направлением по линии визирования. Другими словами, за единицу измерения времени принимается промежуток $\Delta t_{\text{ш}}$, за который условный человек, идущий со средней скоростью, совершает один шаг протяженностью 0,76 м. При этом считается, что средняя скорость движения ведущего оператора – 1,4 м/с (5 км/ч) [18].

В модели рассматриваются только положительные значения $|\vec{V}_r| > 0$. В остальных случаях РТК должен будет остановиться. Курсовой угол φ не нормируется. Под ним понимается угол, на который в процессе движения поворачивается корпус РТК, после каждого $\Delta t_{\text{ш}}$. Положительное значение $\varphi > 0$ принимается при направлении поворота против хода часовой стрелки.

Построение маршрута осуществляется с запозданием, после того как ведущий оператор условно сделал один шаг в направлении от робота. Схема, поясняющая взаимодействие РТК и оператора в начале и в процессе движения представлена на рис. 3.

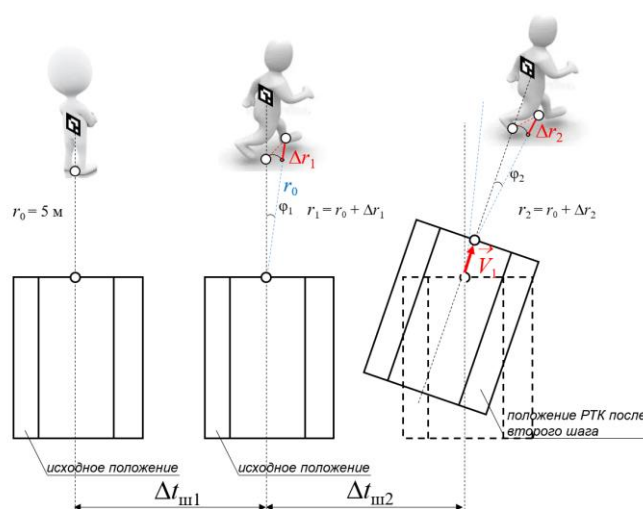


Рис. 3. Схема, поясняющая кинематику взаимодействия РТК и оператора, начинающего движение в сопровождающей системе координат

После распознавания ArUco-маркера формируются исходные данные в форме численных значений расстояния до ведущего оператора $r(t_i)$ и величины курсового угла $\varphi(t_i)$ (2). Затем оценивается удаление РТК в радиальном направлении в сравнении с его предыдущим положением

$$\Delta r(t_i) = r(t_i) - r(t_{i-1}). \quad (3)$$

Целевая функция для автономной системы управления РТК вербально выражается следующим образом. Необходимо сформировать для РТК такую команду, чтобы платформа самостоятельно переместилась в нужном направлении и на расстояние, максимально компенсирующее рассогласование (3). При этом, желательно добиться по возможности выполнения условия синхронности движения оператора и комплекса.

Другими словами, технология «Следуй за мной» должна обеспечить повторение комплексом всех изменений параметров движения (направления и скорости), которые демонстрируются оператором. По этой причине, создавая систему нечеткого управления [19], требуется подготовить для нее исходные данные (1) с использованием модели кинематического взаимодействия оператора и РТК. Алгоритм определения полярных координат ведущего, проводя селекцию видеопотока с камеры, выделяет два информативных сигнала: о расстоянии до оператора $r(t_i)$ и курсовом угле комплекса $\varphi(t_i)$. На основе интерпретации этой информации формируются входные воздействия для нечеткого регулятора.

Прежде всего, оценивается с точки зрения нечеткой логики кинематическая зависимость требуемого вектора перемещения комплекса от параметров движения оператора. Взаимодействие оператора и РТК в процессе следования по маршруту поясняется схемой на рис. 4.

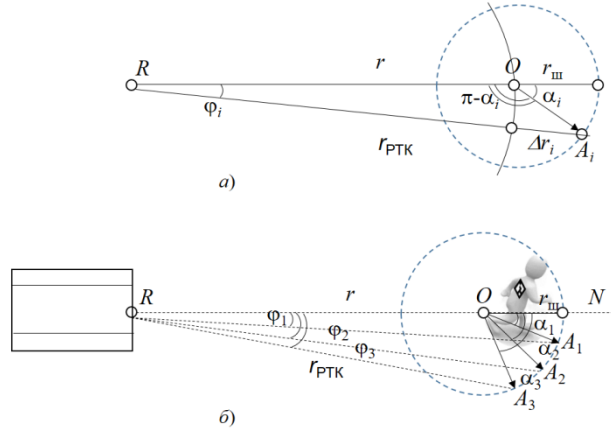


Рис. 4. Схема, поясняющая взаимодействие оператора и РТК

Значение курсового угла оператора α_i по теореме синусов определяет величину курсового угла РТК ϕ_i (рис. 4,а):

$$\phi_i = \arcsin \frac{\sin(\pi - \alpha_i) r_{\text{ш}}}{r_{\text{РТК}}}, \quad (4)$$

а увеличение дистанции между ведущим и комплексом определяется как:

$$r_{\text{РТК}} = r + \Delta r. \quad (5)$$

Введение нечеткости в процесс управления подразумевает оценивание воздействий и реакций совокупностью термов, которые сопоставляются с некоторой степенью уверенности с определенными интервалам каких-либо физических величин. Если оценивать величину курсового угла оператора, то в этом случае наиболее приемлемым видится система измерения, принятая на флоте (в румбах). Другими словами, угол изменения движения оператора предлагается сравнивать по категориям, перечисленным в табл. 2.

Таблица 2

Оценка влияния угла изменения направления движения оператора α_i на величину курсового угла робота ϕ_i

Курсовой угол оператора		ϕ , град	$\text{tg}\phi$	r , м	Δr , м
румбы	град				
2	22,5	2,92	0,051	5,71	0,71
4	45	5,543	0,097	5,563	0,563
6	67,5	7,56	0,133	5,337	0,337

Количественная оценка зависимости (табл. 2) позволяет охарактеризовать степень изменения направления движения (поворот) ведущего как «плавный», «средний» и «крутой», соответствующие численным значениям: 2, 4 и 6 румбам.

С учетом принятия допущения о дискретизации передвижения оператора вторым входным воздействием для нечеткого регулятора назначается его скорость, которая определяется как отношение протяженности его шага к принятой единице измерения времени $\Delta t_{\text{ш}}.$ Тогда применяя понятия нечеткой логики, при оценивании скорости оператора принимается градация: «полшага», «шаг» и «полтора шага».

Таким образом, система управления РТК для реализации процедуры нечеткого логического вывода в качестве управляющей информации использует две физические величины:

- ♦ отклонение направления движения оператора $\alpha(\Delta t_{\text{ши}})$, которое пересчитывается в соответствующее изменение курсового угла комплекса $\varphi(\Delta t_{\text{ши}})$;
- ♦ длина шага ведущего оператора $\Delta r(\Delta t_{\text{ши}})$.

В качестве выходного сигнала предлагается рассмотреть изменение модуля вектора перемещения робота.

Организация процедуры нечеткого логического вывода. В первую очередь выполняется формализация термов входных и выходных сигналов путем их описания функциями принадлежности на основе знаний «эксперта» для определения функций принадлежности термов всех используемых лингвистических переменных [20]. С учетом рекомендаций [21] применяется прямой метод построения функции принадлежности. Для описания изменения степеней изменения направлений движения оператора использовались численные значения этой характеристики (табл. 2). Дополнением к интерпретации результатов оценивания измеряемых величин послужило формирование полярной шкалы. Эта процедура уже производится на основе интуитивной субъективности эксперта, которая предполагает наличие способности понимать сущность самого процесса кинематического взаимодействия. Прежде всего, это умение конкретного индивида должно основываться на знаниях и внутреннем опыте человека, занимающегося теоретическим описанием функции принадлежности.

В рассматриваемом примере каждый использующийся для моделирования терм формализуется типовой унимодальной треугольной функцией принадлежности, определяемой последовательной тройкой чисел (a, b, c) . Ее значения в точке x вычисляются согласно выражению [23–25].

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c \\ 0, & \text{во всех остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

Функции принадлежности $\mu(x_{A_i})$ для каждого применяемого терма A_i объединяются для формирования функции принадлежности всей лингвистической переменной $\mu_B(x)$ с использованием принципа обобщения Заде [25]:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} \sup_{f(x_1, \dots, x_n) = y} \min_{x_1, \dots, x_n} \{ \mu_{A_1}(x_1); \dots; \mu_{A_n}(x_n), \text{ если } y \in f(x) \} \\ 0, & \text{если } y \notin f(x) \end{cases} \quad (5)$$

Пример графика обобщенной функции принадлежности лингвистической переменной «изменение курсового угла РТК» для термов: «плавный» $\mu_{A1}(x)$, «средний» $\mu_{A2}(x)$ и «крутой» $\mu_{A3}(x)$, поясняются схемой (рис. 5).

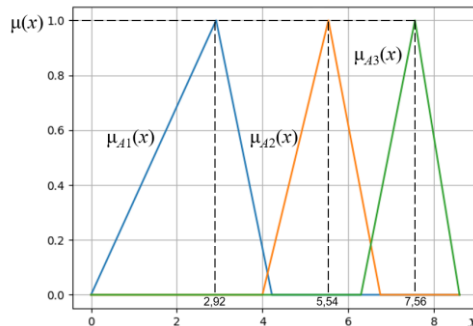


Рис. 5. График функций принадлежности лингвистической переменной, характеризующей изменение курсового угла РТК

В соответствии с (4,5) формализуются все входные и выходные сигналы и осуществляется переход к созданию базы правил, которая должна связывать лингвистические переменные. Она является основной компонентой, которая во многом определяет качество управления.

Вторым этапом является разработка базы нечетких правил, связывающих лингвистические переменные [25]. Продукционное правило состоит из предпосылки (часть «ЕСЛИ ...») и заключения (часть «ТО...»). Предпосылка содержит более одного факта, которые в рассматриваемом случае объединяются логическим «И». Для алгоритма построения маршрута правила имеют следующий вид. «ЕСЛИ оператор сделал ПЛАВНЫЙ поворот И сместился в нужном направлении на ПОЛШАГА, ТО комплекс должен переместиться на КОРОТКОЕ расстояние». Особое внимание обращается на условия, которые должны быть выполнены при построении базы. Правила не должны содержать противоречий. Система правил должна быть полной и представлять собой перечень паросочетаний из термов лингвистических переменных (табл. 3).

Таблица 3

База правил для нечеткого логического вывода

№ правила	Функции принадлежности входные переменные		Модуль вектора скорости РТК (расстояние перемещения) $\mu_C(y)$
	курсовой угол оператора $\mu_A(x_i)$	модуль вектора скорости оператора $\mu_B(y_i)$	
1.	плавный	полшага	короткое
2.	плавный	шаг	короткое
3.	плавный	полтора шага	среднее
4.	средний	полшага	короткое
5.	средний	шаг	среднее
6.	средний	полтора шага	среднее
7.	крутой	полшага	среднее
8.	крутой	шаг	длинное
9.	крутой	полтора шага	длинное

Каждому паросочетанию термов входных, лингвистических переменных ставится в соответствие заключение о терме выходной величины на основе экспертного суждения. Непротиворечивость системы правил означает, что в ней не должны присутствовать правила, в которых нечетким высказываниям в условной части соответствуют взаимоисключающие нечеткие выводы [22].

В процессе агрегирования [19, 25] определяется степень истинности условий по каждому из правил системы нечеткого логического вывода. В рассматриваемом случае, когда условие состоит из нескольких подусловий вида: «ЕСЛИ значение угла поворота оператора x_i соответствует терму «ПЛАВНЫЙ» со значением функции принадлежности $\mu_A(x_i)$ И значение удаления оператора y_i расценивается как «ПОЛШАГА» со значением $\mu_B(y_i)$, ТО определяется степень истинности сложного высказывания о модуле скорости перемещения РТК на основе известных значений истинности подусловий». Используется нечеткая импликация:

$$\mu_R(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)),$$

$$I_M(x, y) = \min\{x, y\}.$$

Другими словами, необходимо определить функцию принадлежности результата нечеткого вывода, которую найти по формуле [24]

$$M_C(y) = \sup T(\mu_C(y), \mu_R(x, y)), \quad (6)$$

где I_M - обозначается операция нечеткой импликации; $T(\mu_C(y), \mu_R(x, y))$ – t -норма.

Реализуя нечеткую импликацию по Мамдани, можно упростить формулу (6) до выражения для выполнения нечеткой конъюнкции [24]:

$$\mu_R(x,y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}.$$

Предпоследним шагом в цепочке логического вывода является аккумуляция – процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Ее цель – объединить все степени истинности заключений для функций принадлежности выходной переменной.

Завершает процедуру дефаззификация (приведение к четкости), которая необходима для нахождения обычного значения выходной лингвистической переменной. Для выполнения численных расчетов предлагается применить метод центра тяжести, который считается одним из самых простых, и одновременно обеспечивает необходимую точность расчетов [20]. Оценка производится по формуле:

$$CoG(\mu_c(y)) = \frac{\int_{y_{min}}^{y_{max}} y \mu_{РТК}(y) dy}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} \mu_{РТК}(y) dy},$$

где $CoG(\mu_c(y))$ – центр тяжести (*Centre of Gravity*) геометрической фигуры, полученной в процессе аккумуляции путем объединения всех степеней истинности заключений для функций принадлежности выходной переменной (в рассматриваемом случае модуля вектора скорости РТК).

Предлагаемый алгоритм реализован в программной среде *Python* с использованием библиотеки встроенных функций для работы с аппаратом нечеткой логики *Skfuzzy*. Для оценивания точности реализации целевой функции проведено имитационное моделирование, в ходе которого задается траектория движения ведущего оператора (рис. 6).

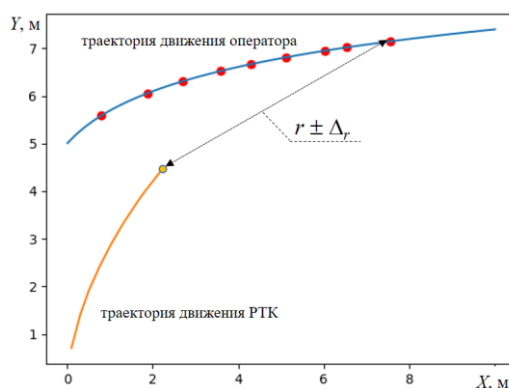


Рис. 6. Пример траекторий движения ведущего оператора и РТК по результатам имитационного моделирования движения оператора РТК

Алгоритм на основе исходных данных (1) и с использованием аппарата нечеткого логического вывода рассчитывает модуль и направление вектора движения комплекса $\vec{V}_{РТК}$. Сравнение траекторий ведущего и комплекса, поясняющие результаты моделирования, показывает полное соответствие методу погони. Выполнение требований целевой функции (2) обеспечивается в допустимых пределах. Для рассматриваемого примера после тысячи реализаций среднее отклонение от установленной дистанции составило $\Delta_r^* \approx 0,2047$ м. При удалении движущейся платформы в 5 м такую ошибку можно считать вполне приемлемой.

Заключение. Применение вместо обычного следящего ПИД-регулятора алгоритма построения маршрута с применением аппарата нечеткой логики уже само по себе считается применением технологий ИИ. Его достоинством является то, что он позволяет обрабатывать неопределенные исходные данные. Это подчеркивает его гибкость и способность

адаптироваться к различным ситуациям. Нечеткая логика основана на лингвистических переменных, которые легко понять и интерпретировать. Применение нечеткого логического вывода в системе управления автономного РТК делает процедуру его совершенствования более доступной для пользователей без специальных знаний. Использование математического аппарата нечеткой логики предоставляет возможность для более точного моделирования реальной ситуации, в которой входные данные могут быть неоднозначными. При этом нечеткий вывод обеспечивает достижение оптимального результата.

В условиях неопределенности и нестационарности свойств объекта регулирования использование нечетких систем предпочтительнее по сравнению с типовыми системами регулирования. Результаты сравнительного анализа нечеткого и классического ПИД регуляторов свидетельствуют, что нечеткий регулятор обеспечивает устойчивое слежение с ошибками на порядок меньше [26].

Основные преимущества применения нечеткой логики для решения задач автоматизации по сравнению с традиционными подходами теории автоматического управления состоят в следующем:

- ◆ значительное повышение быстродействия процессов управления;
- ◆ возможность создания систем управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики и включения в процесс управления дополнительных алгоритмов, повышающих устойчивость к помехам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю., Коберси И.С., Соловьев В.В., Шаповалов И.О. Интеллектуальное управление движением автономных подвижных объектов на основе поведенческого подхода // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3077.
2. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Оценка и управление в сложных динамических системах. – М.: Физматлит, 2009. – 295 с.
3. Юценко А.С. Управление роботами с использованием нечеткой логики: состояние и проблемы // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 1. – С. 119-130.
4. Saffiotti A. The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation: a catalogue raisonn'e // Soft Computing Research journal. – 1997. – Vol. 1, No. 4. – P. 180-197.
5. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю. Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
6. Amur S. Al Yahmedi and Muhammed A. Fatmi. Fuzzy Logic Based Navigation of Mobile Robots. – Oman: Sultan Qaboos University, 2012.
7. Tang Sai Hong, Danial Nakhaeinia and Babak Karasfi. Application of Fuzzy Logic in Mobile Robot Navigation. – Malaysia: University Putra, 2013.
8. Kobersy Iskandar S., Ignatev V.V., Beloglazov D.A., Kramarenko E.R. An intelligent navigator with the control of the car technical condition // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – No. 9. – P. 1094-1098.
9. Белоглазов Д.А., Косенко Е.Ю., Соловьев В.В., Тутов А.Е., Шаповалов И.О. Разработка метода планирования траектории перемещения мобильного автономного робота в трехмерной среде на основе аппарата нечеткой логики // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – URL: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3387>.
10. Kobersy I., Finaev V., Beloglazov D., Shapovalov I., Zargaryan J., Soloviev V. Design features and research on the neuro-like learning control system of a vehicle // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – No. 1. – P. 73-80.
11. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2024. – Vol. 25 (11). – P. 559-567.
12. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2021. – 16 с.
13. ArUco-маркер. – URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html.
14. Технологии и системы искусственного интеллекта военного назначения. Общие положения. Термины и определения. Классификация. Методические материалы. – М.: 46 ЦНИИ МО, 2022. – 18 с.
15. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. – М.: Стандартинформ, 2021. – 12 с.

16. Толстиков А.Н., Толстиков Н.Г. Сравнение алгоритмов преследования объектов. – URL: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritmov-presledovaniya-obektov/viewer>.
17. Сопровождающая система координат (естественный трехгранник). – URL: <https://www.studfile.net/preview/1702159/page:3/>.
18. Какая длина шага при росте 170 см? – URL: <https://www.quepaw.com.ru/smart-home/kakay-dlina-saga-pri-roste-170-sm>.
19. Системы нечеткого логического вывода. – URL: <https://www.infopedia.su/3x494a.html>.
20. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
21. Павлов А.Н., Соколов Б.В. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие. – СПб., 2016. – 72 с.
22. Чернов В.Г. Нечеткие множества. Основы теории и применения: учеб. пособие. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2018. – 156 с.
23. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. Основы нечеткой логики: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям и лабораторным работам. – Набережные Челны: Изд-во НЧИ КФУ, 2018. – 42 с.
24. Броневиц А.Г., Лепский А.Е. Нечеткие модели анализа данных и принятия решений: учеб. пособие / Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2022. – 264 с.
25. Kosenko E., Beloglazov D., Finaev V. Vehicles Fuzzy Control Under the Conditions of Uncertainty // (глава в монографии) Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments, pp. 97. – Oxford, United Kindow: Elsevier (Butterworth-Heinemann), 2017. – 300 p.
26. Копылов В.И., Муравьев Д.И., Коломыцев В.Г., Рустамханова Г.И. Исследование классических и нечетких ПИД-регуляторов для нестационарных объектов управления // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11-3. – С. 532-536.
27. Назаров Е.А., Зяря А.В., Зайцева А.В. Функционально-когнитивный подход к испытаниям технологий искусственного интеллекта в наземных робототехнических комплексах // Вестник Военного инновационного технополиса «ЭРА». – 2023. – Т. 4, № 1. – С. 76-82.

REFERENCES

1. Beloglazov D.A., Kosenko E.Yu., Kobersi I.S., Solov'ev V.V., Shapovalov I.O. Intellektual'noe upravlenie dvizheniem avtonomnykh podviznykh ob"ektov na osnove povedencheskogo podkhoda [Intelligent control of the motion of autonomous mobile objects based on the behavioral approach], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2015, No. 3. Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3077.
2. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu. Otsenivanie i upravlenie v slozhnykh dinamicheskikh sistemakh [Estimation and control in complex dynamic systems]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 295 p.
3. Yushchenko A.S. Upravlenie robotami s ispol'zovaniem nechetkoy logiki: sostoyanie i problemy [Robot control using fuzzy logic: status and problems], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence News], 2006, No. 1, pp. 119-130.
4. Saffiotti A. The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation: a catalogue raisonn'e, *Soft Computing Research journal*, 1997, Vol. 1, No. 4, pp. 180-197.
5. Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu. Upravlenie podvizhnymi ob"ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Control of moving objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
6. Amur S. Al Yahmedi and Muhammed A. Fatmi. Fuzzy Logic Based Navigation of Mobile Robots. Oman: Sultan Qaboos University, 2012.
7. Tang Sai Hong, Danial Nakhaeinia and Babak Karasfi. Application of Fuzzy Logic in Mobile Robot Navigation. Malaysia: University Putra, 2013.
8. Kobersy Iskandar S., Ignatev V.V., Beloglazov D.A., Kramarenko E.R. An intelligent navigator with the control of the car technical condition, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, No. 9, pp. 1094-1098.
9. Beloglazov D.A., Kosenko E.Yu., Solov'ev V.V., Titov A.E., Shapovalov I.O. Razrabotka metoda planirovaniya traektorii peremeshcheniya mobil'nogo avtonomnogo robota v trekhmernoy srede na osnove apparata nechetkoy logiki [Development of a method for planning the trajectory of a mobile autonomous robot in a three-dimensional environment based on the fuzzy logic apparatus], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2015, No. 4. Available at: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3387>.

10. Kobersy I., Finaev V., Beloglazov D., Shapovalov I., Zargaryan J., Soloviev V. Design features and research on the neuro-like learning control system of a vehicle, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014, No. 1, pp. 73-80.
11. Hamdan N., Medvedev M., Pshikhov V. Method of Motion Path Planning Based on a Deep Neural Network with Vector Input, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2024, Vol. 25 (11), pp. 559-567.
12. GOST R 59276-2020. Sistemy iskusstvennogo intellekta. Sposoby obespecheniya doveriya. Obshchie polozheniya [GOST R 59276-2020. Artificial intelligence systems. Methods of ensuring trust. General provisions]. Moscow: Standartinform, 2021, 16 p.
13. ArUco-мапкер. Available at: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html.
14. Tekhnologii i sistemy iskusstvennogo intellekta voennogo naznacheniya. Obshchie polozheniya. Terminy i opredeleniya. Klassifikatsiya. Metodicheskie materialy [Artificial intelligence technologies and systems for military purposes. General provisions. Terms and definitions. Classification. Methodological materials]. Moscow: 46 TSNII MO, 2022, 18 p.
15. GOST R 59277-2020 Sistemy iskusstvennogo intellekta. Klassifikatsiya sistem iskusstvennogo intellekta [GOST R 59277-2020 Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems]. Moscow: Standartinform, 2021, 12 p.
16. Tolstikov A.N., Tolstikov N.G. Sravnenie algoritmov presledovaniya ob"ektov [Comparison of object pursuit algorithms]. Available at: <https://www.cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-algoritmov-presledovaniya-obektov/viewer>.
17. Soprovozhdayushchaya sistema koordinat (estestvennyy trekhgrannik) [Accompanying coordinate system (natural trihedron)]. Available at: <https://www.studfile.net/preview/1702159/page:3/>.
18. Kakaya dlina shaga pri roste 170 sm? [What is the step length for a person 170 cm tall?]. Available at: <https://www.quepaw.com.ru/smart-home/kakay-dlina-saga-pri-roste-170-sm>.
19. Sistemy nechetkogo logicheskogo vyvoda [Fuzzy logical inference systems]. Available at: <https://www.infopedia.su/3x494a.html>.
20. Demidova G.L., Lukichev D.V. Regulyatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob"ektami [Fuzzy logic controllers in control systems of technical objects]. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017, 81 p.
21. Pavlov A.N., Sokolov B.V. Prinyatie resheniy v usloviyakh nechetkoy informatsii: ucheb. posobie [Decision making in conditions of fuzzy information: textbook]. Saint Petersburg, 2016, 72 p.
22. Chernov V.G. Nечеткие множества. Основы теории и применения: учеб. пособие [Fuzzy sets. Fundamentals of theory and application: a tutorial]. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2018, 156 p.
23. Grigor'eva D.R., Gareeva G.A., Basyrov R.R. Основы нечеткой логики: учеб.-метод. пособие к практическим занятиям и лабораторным работам [Fundamentals of fuzzy logic: a teaching aid for practical classes and laboratory work]. Naberezhnye Chelny: Izd-vo NCHI KFU, 2018, 42 p.
24. Bronevich A.G., Lepskiy A.E. Nечеткие модели анализа данных и принятия решений: учеб. пособие [Fuzzy models of data analysis and decision making: a tutorial]. Nats. issled. un-t «Vysshaya shkola ekonomiki». Moscow: Izd. dom Vysshey shkoly ekonomiki, 2022, 264 p.
25. Kosenko E., Beloglazov D., Finaev V. Vehicles Fuzzy Control Under the Conditions of Uncertainty, (chapter in a monograph) *Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments*, pp. 97. Oxford, United Kindow: Elsevier (Butterworth-Heinemann), 2017, 300 p.
26. Kopylov V.I., Murav'ev D.I., Kolomytsev V.G., Rustamkhanova G.I. Issledovanie klassicheskikh i nechetkikh PID-regulyatorov dlya nestatsionarnykh ob"ektov upravleniya [Study of classical and fuzzy PID controllers for non-stationary control objects], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, No. 11-3, pp. 532-536.
27. Nazarov E.A., Zayara A.V., Zaytseva A.V. Funktsional'no-kognitivnyy podkhod k ispytaniyam tekhnologiy iskusstvennogo intellekta v nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksakh [Functional-cognitive approach to testing artificial intelligence technologies in ground-based robotic complexes], *Vestnik Voennogo innovatsionnogo tekhnopolisa «ERA»* [Bulletin of the Military Innovation Technopolis "ERA"], 2023, Vol. 4, No. 1, pp. 76-82.

Назаров Евгений Анатольевич - Михайловская военная артиллерийская академия; e-mail: ega-nazarov@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79964061823; к.т.н.; докторант.

Данилин Максим Евгеньевич - АО «НПО «Аванти»; e-mail: info@avgr.tech; тел.: +78001004194; г. Казань, Россия; генеральный директор.

Косенко Евгений Юрьевич - НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: ekosenko@srfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79045071963; к.т.н.; с.н.с.

Nazarov Evgeny Anatolyevich - Mikhailovskaya Military Artillery Academy; e-mail: era-nazarov@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79964061823; cand. of eng. sc.; doctoral researcher.

Danilin Maxim Evgenievich - JSC NPO Avanti; e-mail: info@avgr.tech; phone: +78001004194; Kazan, Russia; general director.

Kosenko Evgeny Yurievich - Research Institute of Robotics and Control Processes of the Southern Federal University; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79045071963; cand. of eng. sc.; senior research associate.

УДК 004.9+658.5

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-42-52

К.О. Обухов, И.Ю. Квятковская, А.В. Морозов

МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Одним из основных условий успешного функционирования предприятия является грамотно организованный процесс производственного планирования. Автоматизировать эту деятельность позволяют системы производственного планирования класса APS/MES, основой которых являются алгоритмы построения производственных планов. В работе исследуется проблема составления расписания для предприятий дискретного типа производства, относящаяся к области задач многокритериальной оптимизации. Приведено формальное описание задачи планирования с учетом основных производственных ограничений (временные ограничения, требования к оснастке и порядку выполнения операций). Кратко рассмотрены основные методы решения задач данного класса, отмечены их основные достоинства и недостатки. Для решения поставленной задачи выбран подход на основе генерации эвристических правил, применяемых при планировании производственных операций на заданные ресурсы. На основе данного подхода предложен двухэтапный алгоритм построения производственных расписаний, включающий в себя генерацию правил диспетчеризации и их дальнейшее применение при построении расписания. За генерацию правил диспетчеризации отвечает генетический алгоритм. Подробно описана реализация его генетических операторов, а также состав хромосомы и древовидное представление входящих в хромосому правил диспетчеризации. Реализация алгоритма выполнена на языке C# 12 с использованием свободной платформы .NET 8. Построенный алгоритм показал свою эффективность по сравнению с жадным алгоритмом на небольших сгенерированных наборах данных. Дальнейшими исследованиями в этой области является оценка эффективности построенного алгоритма с более сложными генетическими операторами и структурой дерева выражений, а также снижение длительности процесса генерации эвристических правил для больших наборов данных.

Задачи планирования; дискретное производство; теория расписаний; генетические алгоритмы; многокритериальная оптимизация.

K.O. Obukhov, I.Yu. Kvyatkovskaya, A.V. Morozov

METHOD OF GENETIC PROGRAMMING FOR SOLVING THE PROBLEM OF OPERATIONAL SCHEDULE PLANNING OF DISCRETE PRODUCTION

One of the main conditions for the successful functioning of the enterprise is a well-organized production planning process. Production planning systems of the APS/MES class, the basis of which are algorithms for building production plans, allow automating this activity. The paper examines the problem of scheduling for enterprises of a discrete type of production, related to the field of multi-criteria optimization problems. A formal description of the planning task is given, taking into account the main production constraints (time constraints, equipment requirements and the order of operations). The main methods of solving problems of this class are briefly considered; their main advantages and disadvantages are noted. To solve this problem, an approach based on the generation of heuristic rules used in planning production operations for specified resources has been chosen. Based on this approach, a two-stage algorithm for building production schedules is proposed, which includes the generation of dispatching rules and their further application in building schedules. A genetic algorithm is responsible for generating dispatch rules. The implementation of its genetic operators is described in detail, as well as the composition of the chro-