

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 004.5+004.021

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32

EDN: SIGNEO

**Подход к распределению работ в коллаборативной
робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства
и динамического переназначения исполнителей***

Р. Р. Галин, С. Б. Галина, М. В. Мамченко

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65

Аннотация. В работе сформирован ряд предложений по совершенствованию разработанного алгоритма для распределения работ в коллаборативной робототехнической системе (КРТС) и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса. Реализован учет пространственной модели рабочего пространства (размещения рабочих мест), изменения объекта воздействия (изделия) и использования дополнительных ресурсов, случайного поведения и ошибок людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамического переназначения участников КРТС на выполнение операции в случае внезапного выхода из строя робота или потери трудоспособности человеком. Также предложен модифицированный алгоритм минимизации целевой функции (решения оптимизационной задачи) на этапе подбора состава и назначения исполнителей на выполнение операции, учитывающий значения эффективности доступных участников КРТС и минимизирующий их состав.

Ключевые слова: коллаборативная робототехническая система, человеко-машинное взаимодействие, распределение работ, операция, технологический процесс

Поступила 27.11.2023, одобрена после рецензирования 29.11.2023, принята к публикации 04.12.2023

Для цитирования. Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В. Подход к распределению работ в коллаборативной робототехнической системе с учетом модели рабочего пространства и динамического переназначения исполнителей // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2023. № 6(116). С. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32

MSC: 93C85, 65K10

Original article

**Approach to task allocation in a collaborative
robotic system considering the working space model
and dynamic reassignment of the performers***

R.R. Galin, S.B. Galina, M.V. Mamchenko

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street

© Галин Р. Р., Галина С. Б., Мамченко М. В., 2023

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00690, <https://rscf.ru/project/23-29-00690/>

* The reported study was funded by the Russian Science Foundation according to the research project No. 23-29-00690, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00690/>

Abstract. The article gives a number of proposals on improving the developed algorithm for task allocation in collaborative robotic systems and assignment of participants to perform operations of technological process. The paper considers the spatial model of the working space (placement of workplaces), changes in the object of impact (product), the use of additional resources, random behavior and mistakes of people, fatigue accumulation and decrease in the efficiency of their work over time, as well as dynamic reassignment of the performers of CRS in case of sudden failure of cobots or inability to work – for the operators. The work also proposes a modified algorithm of minimization of the objective function (solution of the optimization problem) when selecting and assigning the performers for the operation, taking into account the efficiency of available participants of CRS, and minimizing their composition.

Keywords: collaborative robotic system, human-robot interaction, task allocation, operation, technological process

Submitted 27.11.2023,

approved after reviewing 29.11.2023,

accepted for publication 04.12.2023

For citation. Galin R.R., Galina S.B., Mamchenko M.V. Approach to task allocation in a collaborative robotic system considering the working space model and dynamic reassignment of the performers. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2023. No. 6(116). Pp. 21–32. DOI: 10.35330/1991-6639-2023-6-116-21-32

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений применения коллаборативных роботов (коботов) является промышленное производство. Внедрение коллаборативных робототехнических систем (КРТС) на производственных объектах позволяет повысить общий уровень безопасности промышленных процессов, роботизировать выполнение рутинных, физически тяжелых и опасных работ, а также сократить удельные затраты, связанные с производством единицы продукции. В свою очередь при решении задачи назначения исполнителей на работы (операции) сам технологический процесс удобно представлять одновременно как в виде графа, веса ребер которого соответствуют продолжительности операций, а вершины – моментам их начала, так и в виде временной последовательности, отражающей моменты начала и завершения выполнения операций [1–4].

В предыдущих работах авторским коллективом уже рассматривалась задача выбора и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса.

В частности, предложенные решения обеспечивают [5–7]:

- определение технологического процесса в виде ориентированного графа и временной последовательности из атомарных (неделимых) операций, их количества и продолжительности, максимального и минимального состава людей и коботов, требуемых для выполнения операций, а также стандартного времени выполнения – время выполнения операции минимальным составом людей и коботов с максимальной эффективностью;

- задание количества людей и коботов в КРТС, условных значений их эффективности выполнения для всех или отдельных операций, состояния их доступности;

- подбор исполнителей на выполнение конкретной операции, учитывая минимально и максимально возможный состав, эффективность и доступность незанятых людей и коботов, с целью минимизации времени выполнения отдельной операции и всего технологического процесса;

- перерасчет количества доступных участников КРТС и времени выполнения операции на каждой итерации применения предложенного алгоритма;

– учет невозможности назначения исполнителей операции в случае, когда количество свободных людей и/или роботов меньше минимально необходимого для назначения операции (в таком случае назначение исполнителей на эту операцию откладывается до наступления следующего события на временной последовательности и связанного с ним переопределения количества свободных людей и/или роботов).

Несмотря на это, текущая версия предложенного алгоритма не позволяет задавать пространственную модель рабочего пространства, в том числе количество рабочих мест, используемых для выполнения операций технологического процесса, изменение объекта воздействия (изделия) и использование дополнительных ресурсов (инструментов, оборудования и т.д.), случайного поведения (ошибок) людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамически переназначать участников КРТС на выполнение операции/операций в случае непредвиденного сокращения состава исполнителей (условный выход из строя робота или человека) и связанного с этим увеличения времени, необходимого для выполнения операции.

Кроме того, в текущей версии алгоритма при формировании субоптимального состава участников учитывается только состояние доступности людей и роботов и возможность назначения хотя бы минимального состава исполнителей для конкретной операции. При этом условные значения эффективности доступных участников КРТС и различия этих значений у свободных исполнителей при назначении на выполнение операции фактически не учитываются из-за постоянства и неизменности этих значений и типового задания одинаковых значений у людей и роботов.

Цель настоящей работы заключается в решении вышеуказанных проблем за счет совершенствования предложенного алгоритма и обеспечения возможности задавать и настраивать значения вышеуказанных параметров.

В главе 1 описаны предложенные решения по совершенствованию возможностей разработанного алгоритма. В главах 2 и 3 представлены результаты численного моделирования и анализ полученных результатов соответственно.

1. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА

В настоящем разделе представлены теоретические положения для совершенствования предложенного алгоритма. Обозначения переменных (параметров), введенных в работах [5–7] и используемых далее в настоящей работе, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Принятые обозначения переменных [5–7]

Table 1. Variable designations adopted [5–7]

Обозначение переменной	Описание переменной
n	Количество людей в КРТС
m	Количество роботов в КРТС
$H = \{h_i\}_{i=1}^n$	Множество людей в КРТС
$B = \{b_j\}_{j=1}^m$	Множество коллаборативных роботов КРТС
$r_{h_i} \in (0..1]$	Показатель эффективности для i -го человека

$r_{b_j} \in (0..1]$	Показатель эффективности для j -го робота
$n_{p_{\min}}$	Минимально необходимое количество людей для выполнения p -й операции
$n_{p_{\max}}$	Максимально возможное количество людей для выполнения p -й операции
$m_{p_{\min}}$	Минимально необходимое количество роботов для выполнения p -й операции
$m_{p_{\max}}$	Максимально возможное количество роботов для выполнения p -й операции
n_p	Количество людей, назначенных на выполнение p -й операции
m_p	Количество роботов, назначенных на выполнение p -й операции
$t_{op.st_p}$	Стандартное время выполнения p -й операции (время выполнения p -й операции минимальным составом людей и роботов с максимальной (единичной) эффективностью)
$n_{p_{av}}$	Количество людей, доступных к моменту начала p -й операции
$m_{p_{av}}$	Количество роботов, доступных к моменту начала p -й операции
$H^{n_{p_{av}}}$	Множество людей, доступных (не занятых выполнением какой-либо операции) в момент начала p -й операции
$B^{m_{p_{av}}}$	Множество роботов, доступных (не занятых выполнением какой-либо операции) в момент начала p -й операции
$t_{op.real_p}$	Реальное время выполнения p -й операции назначенным составом исполнителей n_p людей и m_p роботов

1.1. УЧЕТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА

Представим модель рабочего пространства в виде плоскости. Расположению рабочих мест и каждого человека в КРТС в любой момент будет соответствовать набор локальных координат двухмерного пространства (x, y) , при этом полагается, что роботы смонтированы на рабочих местах и перемещаться не могут. Будем полагать, что если люди выполняют p -ю операцию, соответствующую рабочему месту с координатами (x_{WP_p}, y_{WP_p}) , то местонахождение всех этих людей также будет описываться координатами (x_{WP_p}, y_{WP_p}) .

Тогда при подборе состава исполнителей на выполнение операции требуется учитывать время, требуемое для перемещения к рабочему месту, соответствующему данной операции, всех назначаемых на нее людей. Приняв скорость перемещения всех людей одинаковой и равной некоторой константе V_{mov} , представим алгоритм вычисления времени перемещения всех людей, назначенных на выполнение p -й операции (блок-схема представлена на рис. 1).

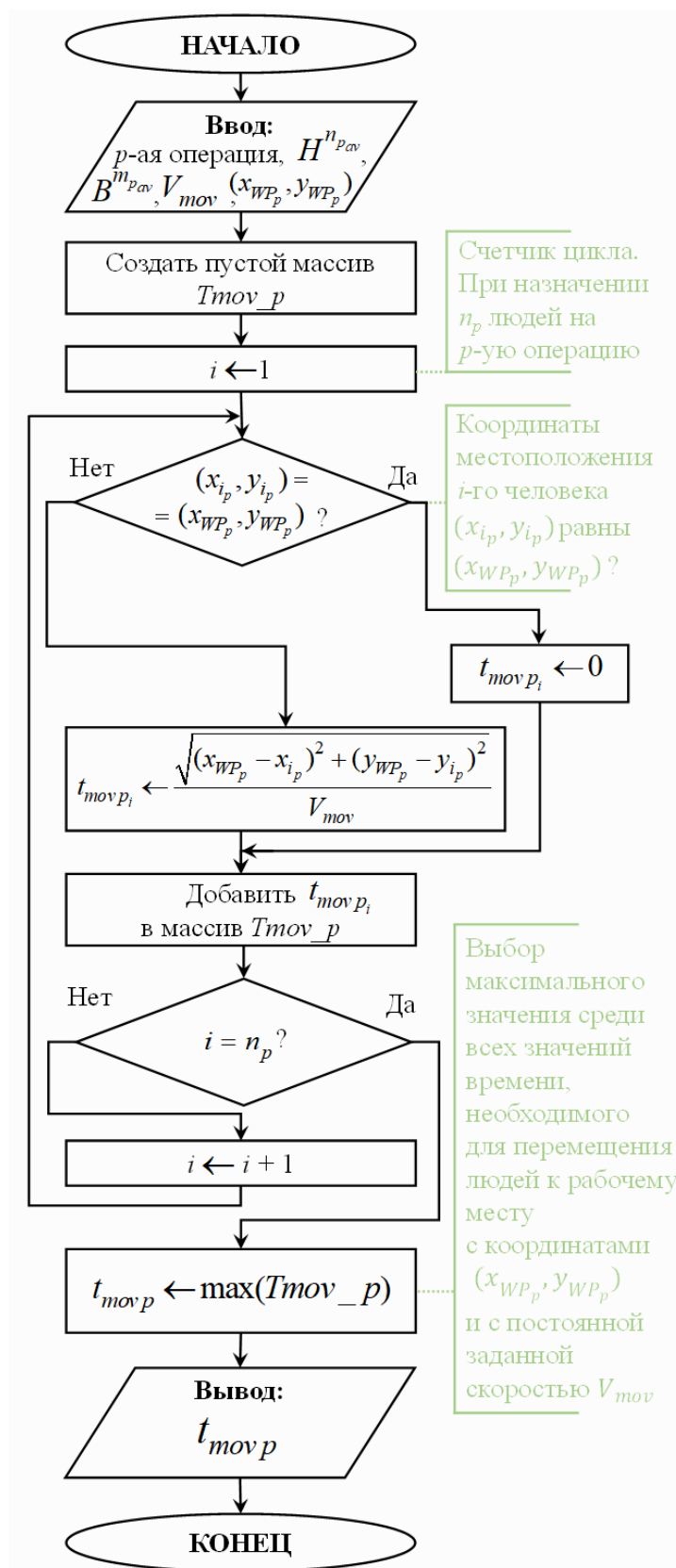


Рис. 1. Алгоритм вычисления времени перемещения людей, назначенных на выполнение p -й операции

Fig. 1. Algorithm for calculating the movement time of people assigned to perform the p -th operation

Таким образом, к времени выполнения операции при нахождении времени $t_{op.real_p}$ требуется добавлять вычисленное по алгоритму 1 значение t_{mov_p} .

1.2. УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕКТА ВОЗДЕЙСТВИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Для учета изменения объекта воздействия и использования дополнительных ресурсов возможно введение дополнительной временной константы t_{prep} , связанной с подготовкой человеком и/или роботом инструментов и материалов для выполнения операции, их выбором и занятием требуемого положения для начала выполнения операции. Кроме того, возможно подобрать для каждой операции временные показатели, характеризующие естественные задержки при выполнении операции, связанные с поворотом/вращением/изменением положения изделия (объекта воздействия) $t_{p_{proc}}$.

1.3. УЧЕТ СЛУЧАЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ (ОШИБОК) ЛЮДЕЙ И НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Очевидно, что эффективность работы людей падает при увеличении времени их непрерывной работы. Такое падение эффективности может выражаться в увеличении продолжительности выполнения отдельных операций, совершении ошибок при выполнении работ или даже во временной потере трудоспособности на определенный период [8–10].

Для учета случайного поведения (ошибок) людей и накопления усталости введем возможность задания падения эффективности людей во времени. Для этого в алгоритме реализована возможность задания изменения эффективности людей и ее зависимости от времени непрерывной работы в виде непрерывной функции или отдельных дискретных значений. При задании эффективности в виде отдельных дискретных значений во времени реализована возможность нахождения промежуточных значений эффективности путем построения аппроксимирующей функции первого порядка, использующей в качестве выходных данных две ближайшие известные пары значений «эффективность – время».

Таким образом, в момент назначения людей на выполнение i -й операции будет вычисляться значение эффективности каждого человека, соответствующее значению функции эффективности в момент, соответствующий общему времени, прошедшему с начала выполнения операций технологического процесса.

Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде линейной функции и дискретных значений «эффективность – время» представлен на рисунках 2 и 3 соответственно.

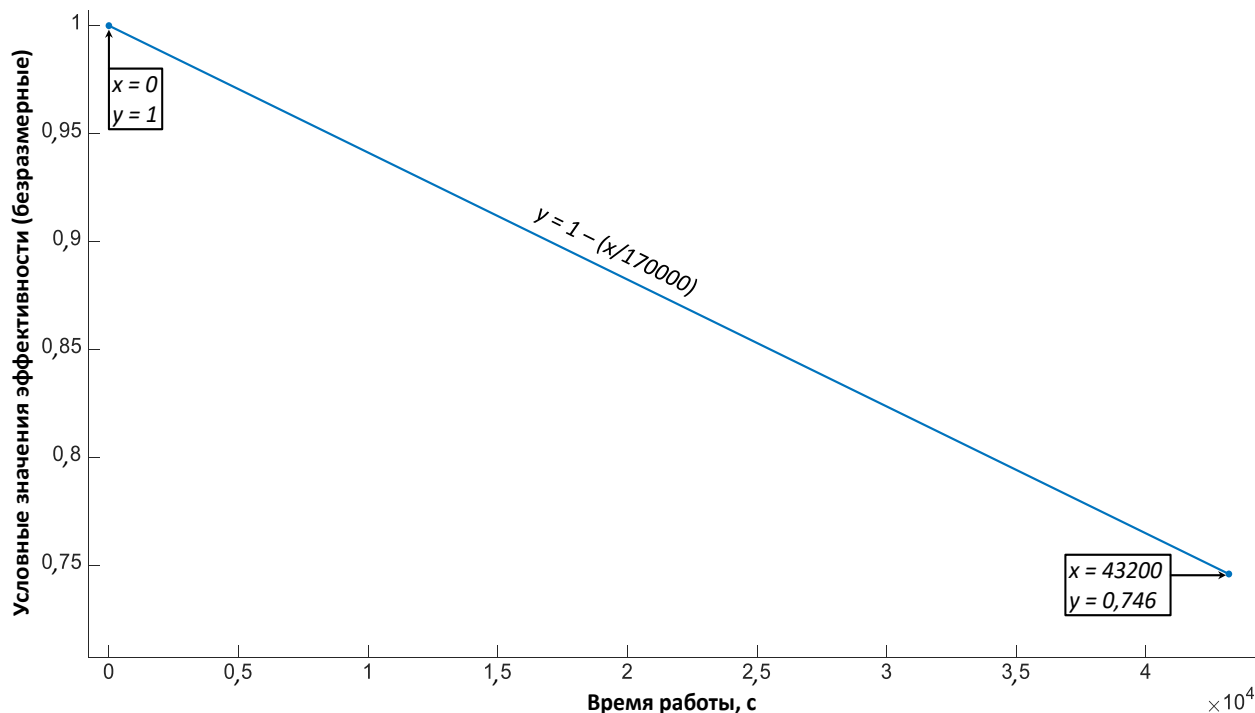


Рис. 2. Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде линейной функции

Fig. 2. Example of specifying dependencies of changes in people's efficiency over time in the form of a linear function

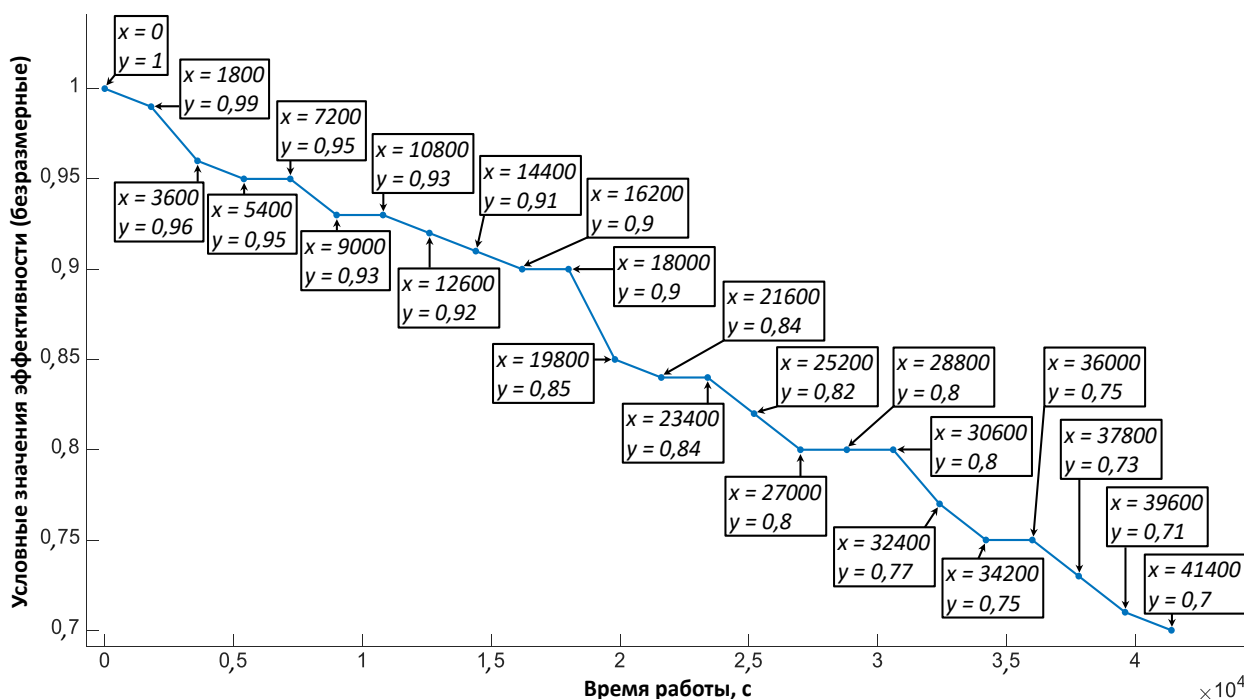


Рис. 3. Пример задания зависимостей изменения эффективности людей во времени в виде дискретных значений «эффективность – время»

Fig. 3. An example of specifying dependencies of changes in people's efficiency over time in the form of discrete "efficiency – time" values

1.4. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПЕРЕНАЗНАЧЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Для реализации данной возможности в алгоритме реализовано виртуальное прерывание выполнения операции в момент, соответствующий выходу из строя робота (роботов) и/или потере работоспособности человека (людей). После прерывания операции вышеуказанным людям и роботам присваивается значение недоступности (свойству «выполняемая операция» присваивается значение «-1»). Затем осуществляется переназначение исполнителей на выполнение операции взамен вышедших из строя в соответствии с алгоритмом, представленным в [5–7], при этом если назначение невозможно, а текущее количество людей и/или роботов меньше минимально допустимого для данной операции, ее выполнение приостанавливается до наступления ближайшего события временной последовательности, когда произойдет изменение состава доступных (незанятых) людей и/или роботов.

1.5. УЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОСТУПНЫХ УЧАСТНИКОВ КРТС ПРИ НАЗНАЧЕНИИ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ОПЕРАЦИИ

Ранее при назначении исполнителей на p -ю операцию проверялась доступность хотя бы минимального количества людей и роботов. Итоговое (реальное) время выполнения операции назначенным составом определялось уже после назначения исполнителей по формуле

$$t_{op,real_p} = \frac{t_{op,st_p} \times (m_{pmin} + n_{pmin})}{\sum_{k=1}^{n_p} r_{l_k} + \sum_{s=1}^{m_p} r_{b_s}}. \quad (1)$$

В новой версии алгоритма реализован другой принцип. При подборе исполнителей на выполнение p -й операции решается задача многокритериальной оптимизации (минимизации целевой функции). В качестве целевой функции используется расчетное время выполнения операции, функция может быть как в виде (1), так и в следующем виде:

$$func = \frac{t_{op,st_p} \times (m_{pmin} + n_{pmin})}{\sum_{k=1}^{n_p} r_{l_k} + \sum_{s=1}^{m_p} r_{b_s}} + n_p + m_p, \quad (2)$$

где требуются целочисленные значения n_p и m_p при наличии следующих ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_p \leq n_{p_{ov}} \\ n_p \geq n_{p_{min}} \\ n_p \leq n_{p_{max}} \\ m_p \leq m_{p_{ov}} \\ m_p \geq m_{p_{min}} \\ m_p \leq m_{p_{max}} \\ t_{op,real_p} \geq 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

Кроме того, возможно введение дополнительного ограничения на время реального выполнения операции, не превышающего стандартное время выполнения минимальным составом исполнителей с максимальной (единичной эффективностью):

$$t_{op.real_p} \leq t_{op.st_p} \cdot \tag{4}$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численный эксперимент проводился в среде MATLAB R2023a. Минимизация целевой функции осуществлялась с помощью генетического алгоритма. Исходные данные и результаты численного моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные и результаты численного моделирования

Table 2. Input data and results of numerical modeling

Параметр (переменная)	Значения			
	Целевая функция (1), ограничения (3)	Целевая функция (1), ограничения (3) и (4)	Целевая функция (2), ограничения (3)	Целевая функция (2), ограничения (3) и (4)
$n_{p_{av}} = 10, m_{p_{av}} = 10, n_{p_{min}} = 1, n_{p_{max}} = 10, m_{p_{min}} = 1, m_{p_{max}} = 10, t_{op.st_p} = 14$ (с)				
$t_{op.real_p}$, с	1,1764	1,1764	4,1857	4,1857
n_p , ед.	10	10	5	5
m_p , ед.	10	10	1	1
$n_{p_{av}} = 5, m_{p_{av}} = 5, n_{p_{min}} = 1, n_{p_{max}} = 10, m_{p_{min}} = 1, m_{p_{max}} = 10, t_{op.st_p} = 14$ (с)				
$t_{op.real_p}$, с	2,6194	2,6194	4,1857	4,1857
n_p , ед.	5	5	5	5
m_p , ед.	5	5	1	1

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При использовании целевой функции (1) в результате решения задачи количество назначаемых людей и роботов равно количеству доступных для назначения, т.е. алгоритм не минимизирует само количество назначаемых исполнителей, хотя и учитывает их эффективность.

Напротив, использование целевой функции (2) в алгоритме ставит ограничение, заключающееся в максимальной минимизации состава исполнителей.

Наличие или отсутствие дополнительного ограничения (4) для обоих вариантов целевой функции не повлияло ни на реальное время выполнения операции, ни на состав назначаемых исполнителей.

Следует отметить, что существенное снижение времени выполнения операции (с 14 до 1,1764, 2,6194 и 4,1857 секунд соответственно) не может свидетельствовать о кратной эффективности применения предложенного алгоритма по сравнению с существующими аналогами (например, [2, 3, 11–18]) и обусловлено значениями исходных данных, а также допущением о наличии безразмерной априорной величины эффективности (от нуля до единицы) для каждого участника КРТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сформирован ряд предложений по совершенствованию разработанного алгоритма для распределения работ в коллаборативной робототехнической системе и назначения участников КРТС на выполнение операций технологического процесса. Реализован учет пространственной модели рабочего пространства (размещения рабочих мест), изменения объекта воздействия (изделия) и использования дополнительных ресурсов, случайного поведения и ошибок людей, накопления усталости и снижения эффективности их работы со временем, а также динамического переназначения участников КРТС на выполнение операции в случае внезапного выхода из строя робота или потери трудоспособности человеком. Также предложен модифицированный алгоритм минимизации целевой функции (решения оптимизационной задачи) на этапе подбора состава и назначения исполнителей на выполнение операции, учитывающий значения эффективности доступных участников КРТС и минимизирующий их состав.

В целом отличительной особенностью предложенного алгоритма является переход от минимизации времени выполнения технологического процесса к минимизации времени выполнения каждой операции в его составе.

Представленные в работе результаты показаны для пункта 1.5. В дальнейшем планируются проведение численного моделирования и апробация для других предложенных решений, а также их интеграция в алгоритм.

REFERENCES

1. Chatzisavvas A., Chatzitoulousis P., Ziouzos D., Dasygenis M. A routing and task-allocation algorithm for robotic groups in warehouse environments. *Information*. 2022. Vol. 13. No. 6. Pp. 1–14. DOI: 10.3390/info13060288

2. Петренко В. И., Тебуева Ф. Б., Павлов А. С., Гурчинский М. М. Метод распределения и планирования выполнения задач агентами роевых робототехнических систем в условиях недетерминированной среды // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. 3(59). С. 25–43. DOI: 10.54398/20741707_2022_3_25

Petrenko V.I., Tebueva F.B., Pavlov A.S., Gurchinskiy M.M. Method of tasks distribution and planning for agents of swarm robotic systems in non-deterministic environment. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: management and high technology]. 2022. Vol. 3(59). Pp. 25–43. (In Russian)

3. Faccio M., Granata I., Minto R. Task allocation model for human-robot collaboration with variable cobot speed. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023. Pp. 1–14. DOI: 10.1007/s10845-023-02073-9

4. Aziz H., Pal A., Pourmiri A., Ramezani F., Sims B. Task Allocation Using a Team of Robots. *Current Robotics Reports*. 2022. 3. Pp. 227–238. DOI: 10.1007/s43154-022-00087-4

5. Галина С. Б., Мамченко М. В., Галин Р. Р. Результаты исследования распределения работ в коллаборативной робототехнической системе с минимизацией их времени выполнения // Труды 8-й международной научно-практической конференции «Научно-инновационные исследования и разработки». Саратов: Цифровая наука, 2022. С. 20–29.

Galina S.B., Mamchenko M.V., Galin R.R. Results of the research on the allocation of tasks in a collaborative robotic system with minimization of their execution time. *Trudy VIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Nauchno-innovacionnye issledovaniya i razrabotki"*. Saratov: Cifrovaya nauka, 2022. Pp. 20–29. (In Russian)

6. Galin R., Meshcheryakov R., Mamchenko M. Simple Task Allocation Algorithm in a Collaborative Robotic System. *Frontiers in Robotics and Electromechanics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. 329. Pp. 433–447. DOI: 10.1007/978-981-19-7685-8_28
7. Galin R.R., Galina S.B. Approach to Efficient Task Allocation in a Collaborative Robotic System Using Modified Cost Functions. *2023 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon) / South Ural IEEE Chapter*. Sochi, 2023. Pp. 568–573. DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110787
8. Yaacoub A., Thomas V., Colas F., Maurice P. A Probabilistic Model for Cobot Decision Making to Mitigate Human Fatigue in Repetitive Co-Manipulation Tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2023. 8. 11. Pp. 7352–7359. DOI: 10.1109/LRA.2023.3315583
9. Buerkle A., Al-Yacoub A., Eaton W., et al. An Incremental Learning Approach to Detect Muscular Fatigue in Human–Robot Collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2023. 53. 3. Pp. 520–528. DOI: 10.1109/THMS.2023.3259139
10. Gervasi R., Capponi M., Mastrogiacomo L., Franceschini F. Analyzing psychophysical state and cognitive performance in human-robot collaboration for repetitive assembly processes. *Production Engineering*. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1007/s11740-023-01230-6
11. Lippi M., Marino A. A mixed-integer linear programming formulation for human multi-robot task allocation. *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN) / IEEE*. Vancouver, 2021. Pp. 1017–1023. DOI: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515362
12. Mina T., Kannan S.S., Jo W., Min B.-C. Adaptive workload allocation for multi-human multi-robot teams for independent and homogeneous tasks. *IEEE Access*. 2020. 8. Pp. 152697–152712. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3017659
13. Fusaro F., Lamon E., Momi E.D., Ajoudani A. An integrated dynamic method for allocating roles and planning tasks for mixed human-robot teams. *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN) / IEEE*. Vancouver, 2021. Pp. 534–539. DOI: 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515500
14. Lee M.-L., Behdad S., Liang X., Zheng M. Task allocation and planning for product disassembly with human–robot collaboration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. 76(2). 102306. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.rcim.2021.102306
15. Noormohammadi-Asl A., Ayub A., Smith S.L., Dautenhahn K. Task Selection and Planning in Human-Robot Collaborative Processes: To be a Leader or a Follower? *2022 31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN) / IEEE*. Napoli, 2022. Pp. 1244–1251. DOI: 10.1109/RO-MAN53752.2022.9900770
16. Jung Y., Kim H., Suh K.D., Park J.M. Human-Centered Dynamic Service Scheduling Approach in Multi-Agent Environments. *Applied Sciences*. 2022. 12(21). 10850. Pp. 1–18. DOI: 10.3390/app122110850
17. Zhang F., Zhang Y., Xu S. Collaboration effectiveness-based complex operations allocation strategy towards to human–robot interaction. *Autonomous Intelligent Systems*. 2022. 2:20. 1. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s43684-022-00039-x
18. Rahman S.M.M., Wang Y. Mutual trust-based subtask allocation for human–robot collaboration in flexible lightweight assembly in manufacturing. *Mechatronics*. 2018. No. 54. Pp. 94–109. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.07.007

Информация об авторах

Галин Ринат Романович, канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;
117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65;
grr@ipu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Галина Сания Болаткызы, мл. науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65;
ksb@ipu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5242-0996>

Мамченко Марк Владиславович, науч. сотр. лаборатории № 80 «Киберфизические системы» Института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук;
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65;
markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>

Information about the authors

Galin Rinat Romanovich, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Laboratory 80 “Cyber-Physical Systems”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;
grr@ipu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-7868>

Galina Saniya Bolatkyzy, Junior Researcher of Laboratory 80 “Cyber-Physical Systems”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;
ksb@ipu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5242-0996>

Mamchenko Mark Vladislavovich, Researcher of Laboratory 80 “Cyber-Physical Systems”, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences;
117997, Russia, Moscow, 65 Profsoyuznaya street;
markmamcha@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6366-9786>