

## Раздел III. Системы энергетики, приводная и датчиковая аппаратура

УДК 614.8

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-183-192

А.Ю. Баранник, Е.А. Дудоров, А.В. Лагутина

### ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКТА СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

*Целью исследования является обоснование эффективности применения различных видов навесного и съёмного рабочего оборудования робототехнических комплексов на базе автономных платформ для выполнения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. Исследования, проведенные в рамках создания экспериментальной робототехнической платформы «Маркер», позволили приступить к разработке аварийно-спасательных мобильных робототехнических комплексов, способных выполнять задачи в зоне ЧС в автономном режиме. Предложено, на основе анализа задач, выполняемых в зоне ЧС, а также перечня специального оборудования машин, имеющих массогабаритные показатели близкие к аналогичным показателям платформы «Маркер», оценить оптимальный набор навесного и съёмного рабочего оборудования, обеспечивающего выполнение задач с минимальными временными затратами. В ходе проведения исследований был предложен подход, позволяющий решать подобные задачи для любых роботизированных платформ, независимо от используемого базового шасси. Также предложенный подход позволил определить основные направления доработки автономной робототехнической платформы «Маркер» с целью обеспечения возможности выполнения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. К таким направлениям относятся разработка гидросистемы, позволяющей осуществлять управление навесным и съёмным оборудованием, как при выполнении технологических операций, так и при перемещении по зоне ЧС, и выполнении манипуляций, связанных с их заменой, в том числе в автоматическом режиме. В качестве второго направления была определена необходимость доработки конструкции путем усиления точек крепления навесного и рабочего оборудования, а также основных несущих элементов, которые будут задействованы при выполнении технологических операций с использованием расчетного комплекта навесного и съёмного оборудования. Третьим направлением авторы считают необходимость разработки алгоритмов и программного обеспечения управления автономной робототехнической платформой при выполнении технологических операций в зоне ЧС, включая землеройные операции, погрузочно-разгрузочные операции, поисково-спасательные операции, а также действия, связанные с мониторингом обстановки в районе ведения аварийно-спасательных работ.*

*Робототехнический комплекс; специальное оборудование; автономная робототехническая платформа; аварийно-спасательные работы.*

А.Yu. Barannik, E.A. Dudorov, A.V. Lagutina

### JUSTIFICATION OF THE SET OF SPECIAL EQUIPMENT INTENDED FOR RESCUE OPERATIONS USING MULTIFUNCTIONAL AUTONOMOUS ROBOT PLATFORM

*The purpose of the study is to substantiate the effectiveness of the use of various types of mounted and removable working equipment of robotic complexes based on autonomous platforms for emergency rescue operations in the emergency zone. The research carried out within the framework of the creation of the experimental robotic platform "Marker" allowed us to begin the development of emergency rescue mobile robotic complexes capable of performing tasks in an emergency zone in*

*autonomous mode. It is proposed, based on the analysis of tasks performed in the emergency zone, as well as a list of special equipment of machines with weight and size indicators close to those of the Marker platform, to evaluate the optimal set of mounted and removable working equipment that ensures the performance of tasks with minimal time costs. During the research, an approach was proposed that allows solving similar tasks for any robotic platforms, regardless of the base chassis used. Also, the proposed approach made it possible to determine the main areas of improvement of the autonomous robotic platform "Marker" in order to ensure the possibility of performing emergency rescue operations in the emergency zone. These areas include the development of a hydraulic system that allows you to control mounted and removable equipment, both when performing technological operations and when moving around the emergency zone, and performing manipulations related to their replacement, including in automatic mode. As a second direction, the need to refine the design by strengthening the attachment points of attachments and working equipment, as well as the main load-bearing elements that will be involved in performing technological operations using a calculated set of attachments and removable equipment was determined. The authors consider the third direction to be the need to develop algorithms and software for controlling an autonomous robotic platform when performing technological operations in an emergency zone, including earthmoving operations, loading and unloading operations, search and rescue operations, as well as actions related to monitoring the situation in the area of emergency rescue operations.*

*Robotics complex; special equipment; autonomous robotic platform; emergency rescue operations.*

**Введение.** Эволюция современных мобильных наземных робототехнических комплексов (далее – РТК) идет по пути наращивания возможностей выполнения задач в автономном режиме с постепенным снижением задействования оператора в процессе управления РТК [1–4]. Определенный прогресс в создании мобильных наземных автономных РТК сделал актуальным исследование проблем применения таких комплексов при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ в ходе ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера [5].

Для повышения уровня автономности таких РТК требуется развитие ряда ключевых технологий, которые в совокупности определяют облик перспективных РТК. Поэтому актуальным является разработка технологий робототехники и доведение их до уровня готовности, позволяющего применять создаваемые технологии на перспективных автономных РТК в реальных условиях [6–9].

При этом, прежде чем приступить к проведению экспериментов по использованию таких автономных РТК, например, экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» [10], созданной в ходе реализации проекта Национального центра развития технологий и базовых элементов робототехники Фонда перспективных исследований и Научно-производственное объединение «Андроидная техника», необходимо определиться какое специальное оборудование будет использоваться при их адаптации под задачи МЧС России [11].

**Описание проблемы.** Основными задачами, которые будут решаться РТК, состоящими на оснащении формирований МЧС России являются: мониторинг и обследование аварийных зон средствами визуального, приборного и радиационно-химического контроля; определение местоположения объектов и состояния технологического оборудования в зоне аварии; выявление мест и характера поврежденных аварийного оборудования; проведение погрузочно-разгрузочных и транспортных работ с целью доставки технических средств и материалов в аварийную зону; проведение инженерных работ по расчистке завалов и разборке аварийных конструкций; сбор и транспортировка опасных объектов в район их утилизации; расширение спектра манипуляционных технологических работ по монтажу и демонтажу оборудования, нанесению и удалению покрытий, контейнеризованию опасных отходов и веществ; сварку и резку металлоконструкций, сверление, бурение, разборка строительных конструкций, вскрытие дверей и люков; выполнение задач по дезактивации местности, строений и оборудования; пожаротушение; поиск людей в зоне чрезвычайной ситуации и их последующая эвакуация [12–14].

Уже сам данный перечень задач показывает, необходимость проведения исследований связанных, с оптимизацией перечня оборудования, которое должно быть интегрировано с автономными платформами [15, 16].

Необходимо отметить, что похожая задача решается при создании многофункциональных дорожно-строительных машин. При этом, рабочие органы различаются не только по видам выполняемых работ и сложности устройства, но и по способам установки и навески, дополнительным приводным устройствам, времени замены. Одинаковые по назначению сменные рабочие органы устанавливаются и навешиваются на машины разными способами, что по-разному проявляется в условиях работы. Классификация такого рабочего оборудования представлена на рис. 1 [17].



Рис. 1. Классификация рабочего оборудования многофункциональных РТК для ведения аварийно-спасательных работ, по способам установки (крепления)

**Методический подход к оптимизации комплекта оборудования.** Для выявления эффективности, сопоставления и выбора мобильных наземных автономных РТК для проведения аварийно-спасательных работ с различными типами рабочего оборудования при работе в зоне ЧС воспользуемся известным критерием оценки эффективности – временем для выполнения аварийно-спасательных работ [18, 19].

$$T_e = \frac{S_{зчс}}{v_{тр}} + \frac{V_{зчс}}{П}, \quad (1)$$

где  $S_{зчс}$  – дальность перемещения РТК в зоне ЧС, км;  $v_{тр}$  – средняя скорость перемещения РТК, км/ч;  $П$  – эксплуатационная производительность, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{зчс}$  – объем работ в зоне ЧС, м<sup>3</sup> или т.

При этом эффективность многофункциональных РТК, использующих для выполнения аварийно-спасательных работ с разнородными технологическими операциями, необходимо рассчитывать исходя из перечня основных технологических операций, выполняемых в зоне ЧС [20]. В ходе выполнения каждой технологической операции  $j$  (объемом  $V_j$ ) и с каждым типом сменного оборудования производительность РТК будет разной. Для учета этой специфики в формуле (1) воспользуемся так называемой приведенной производительностью.

В случае, когда объемы разных видов работ можно выразить в одинаковых измерителях, например, в м<sup>3</sup> (или тоннах – для грузоподъемного оборудования), и, следовательно, общий объем в зоне ЧС можно подсчитать, суммируя объемы отдельных технологических операций  $V_{зчс} = \sum V_j$ , эксплуатационная производительность может быть приведена к суммарному объему работ:

$$\sum V_j = \frac{П_{зчс}}{T_{зчс}}, \quad (2)$$

где  $T_{зчс}$  – общее время выполнения всех разнородных технологических операций в зоне ЧС;

$$T_{зчс} = \sum T_{ij} = \sum \frac{V_i}{П_{ij}}, \quad (3)$$

где  $T_{ij}$  – время выполнения  $j$ -й работы многофункционального РТК с  $i$ -м типом сменного оборудования;

$\Pi_{ij}$  – эксплуатационная производительность многофункциональной машины с  $i$ -м типом съемного рабочего оборудования на  $j$ -м виде технологических операций. Этот показатель необходимо определять для всех технологических операций (рассчитывается обычным образом или принимается по производственным нормам выработки).

Приведенная производительность, таким образом, это средневзвешенная эксплуатационная производительность, при которой суммарный объем разнородных технологических операций выполняется за суммарное время работы.

Для уменьшения расчетов по формуле (1) при выявлении эффективности можно считать, что сопоставление многофункциональных РТК с разными типами съемного рабочего оборудования всегда производится при выполнении одних и тех же работ и их объемов в зоне ЧС. Поэтому сопоставление и оценку можно провести по общим временным затратам на выполнение механизированных работ:

$$T_{зчс} = \sum T_e = \sum \left( \frac{S_{зчс}}{v_{тр}} + \frac{V_{зчс}}{\Pi} \right),$$

$$T_j = T_{раб.сум.} + T_{зам} = T_{раб.сум.} + \lambda t_{зам}, \quad (4)$$

где  $T_j$  – время выполнения технологической операции;

$T_{зам}$  – продолжительность одной замены сменного оборудования (при переходе от одной работы к другой), ч;

$\lambda$  – число замен сменного оборудования на объекте при выполнении всего объема работ  $\sum V_j$ .

Причем число замен  $\lambda$  не всегда совпадает с числом видов работ, так как часто по технологии или организации работы сменное оборудование несколько раз меняют при выполнении одной и той же технологической операции, т. е.  $\lambda \geq \sum j$ .

Графики областей рационального применения обычно представляют в зависимости от объема работы, для этого время работы  $T_{раб.сум.}$  подставим из формулы (2):

$$T_{раб.сум.} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс}}$$

Конечное выражение для  $T_{зчс}$  получим в виде:

$$T_{зчс} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс}} + \lambda t_{зам} + \frac{S_{зчс}}{v_{тр}}, \quad (5)$$

Таким образом, суммарное время выполнение задачи, выражено через работы на объекте, время, затраченное на перемещение между объектами, продолжительность одной замены сменного оборудования, а также через параметры, определяющие условия работы машины на объекте:  $\sum V_j$ ;  $\lambda$ .

На основе показателя  $T_{зчс}$  определим области рационального применения многофункциональных РТК с разными типами сменного оборудования. В соответствии с методикой определения этих областей из выражений критерия  $T_{зчс}$  попарно сравним РТК с различным оборудованием, т.е. составим уравнение границы их областей рационального применения, где суммарные показатели времени равны. Обозначая одну из машин индексом  $k$ , а вторую машину индексом  $(k+1)$ , по условию  $T_{зчс k} = T_{зчс(k+1)}$  на основании формулы (5) приравниваем правые части, составленные для двух РТК:

$$\sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс k}} + \lambda t_{зам k} + \frac{S_{зчс}}{v_{тр k}} = \sum \frac{V_j}{\Pi_{зчс(k+1)}} + \lambda t_{зам(k+1)} = \frac{S_{зчс}}{v_{тр(k+1)}}$$

Отсюда находим уравнение границы областей рационального применения:

$$\lambda_{\text{Гр}} = \frac{(\Pi_{\text{зчс}k} - \Pi_{\text{зчс}(k+1)}) \cdot \Sigma V_j \cdot \frac{S_{\text{зчс}}}{v_{\text{Гр}k}} \cdot \frac{S_{\text{зчс}}}{v_{\text{Гр}(k+1)}}}{t_{k+1} - t_k} \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет граничное сочетание значений независимых параметров  $\lambda$  и  $\Sigma V_j$ , при котором затраты  $T_{\text{зчс}}$  сопоставляемых машин  $k$  и  $(k+1)$  равны.

**Пример применения методического подхода через анализ графика расчетных данных.** В ходе исследования были проведены расчеты в которых сравнивались возможности по выполнению работ по снятию и контейнеризованию загрязненных грунтов с выполнение штатного и двухчелюстного ковшей. Полученные данные представлены на графике (рис. 2). Анализ данного графика показывает что, при сопоставлении областей рационального применения РТК с набором быстросменного рабочего оборудования (1) и многоцелевого оборудования в виде двухчелюстного ковша (2) видно, что область рационального применения оборудования (2) находится в зоне малых объемов работ, когда продолжительность замены сменного рабочего оборудования имеет существенное значение. Быстросменное рабочее оборудование (1) с немного большими затратами времени на одну замену по сравнению с оборудованием (2) выгодно на повышенных объемах работ, когда эти затраты времени становятся менее влияющими. С увеличением числа замен области рационального применения (1) и (2) расширяются. Значительные потери времени на каждой замене обычного сменного рабочего оборудования с шарнирно-пальцевым креплением отодвигают его области рационального применения (3) в зону еще больших объемов, хотя оно и дешевле по сравнению с быстросменным рабочим оборудованием. При этом с увеличением числа замен существенно увеличиваются и общие потери времени на замены, поэтому области рационального применения (3) сужаются вверху. Если на объекте производится всего одна замена, то сменное рабочее оборудование с шарнирно-пальцевым креплением всегда выгоднее всех других типов рабочего оборудования (область 3 на рис. 2).

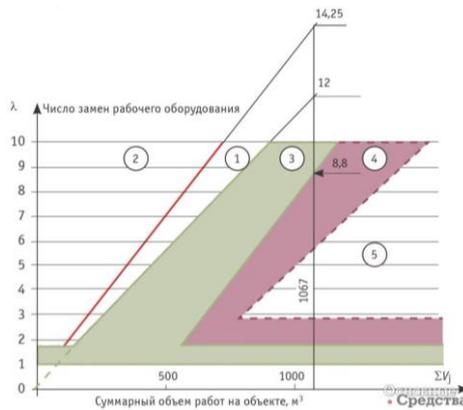


Рис. 2. Графики областей рационального применения многофункциональных дорожно-строительных машин с разными типами сменного рабочего оборудования

Двойное независимое рабочее оборудование на многофункциональных машинах выгодно на повышенных объемах работ, так как эти РТК более дорогие и дороже обходится их перебазирование. Граница 3/4 зависит также от типа навески сменного рабочего оборудования на каждом из рабочих органов.

В зоне еще больших объемов работ находится область рационального применения (5) РТК с комплектом независимо установленных рабочих органов.

Если в зоне ЧС используют только два рабочих органа, то двойное независимое рабочее оборудование выгоднее комплекта независимо установленных рабочих органов (область 4, см. рис. 2).

Графики областей рационального применения, таким образом, наглядно представляют возможности многофункциональных РТК и сменного рабочего оборудования и позволяют оперативно подобрать многофункциональную машину и сменное оборудование к ней из имеющихся в наличии машин по двум параметрам – суммарному объему работ  $\sum V_j$  и числу замен рабочего оборудования  $\lambda$ , необходимому для выполнения разнотипных работ на объекте.

По графикам областей рационального применения, построенным для типичных или часто повторяющихся технологических операций, можно судить об оптимальном составе оборудования РТК.

Границы областей рационального применения на графиках, зависят от стоимостных показателей РТК и рабочего оборудования, от набора технологических операций и их доли в общем объеме при ликвидации ЧС. При изменении этих параметров графики надо перестраивать заново.

При разовом сопоставлении и выборе многофункциональных РТК и сменного оборудования для конкретной ЧС можно без построения графиков областей рационального применения определить время на ликвидацию ЧС по формуле (5) или (7).

**Алгоритм расчетов.** Последовательность процедур и расчетов по подбору сменного оборудования для РТК представлена в виде блок-схемы алгоритма на рис. 3.

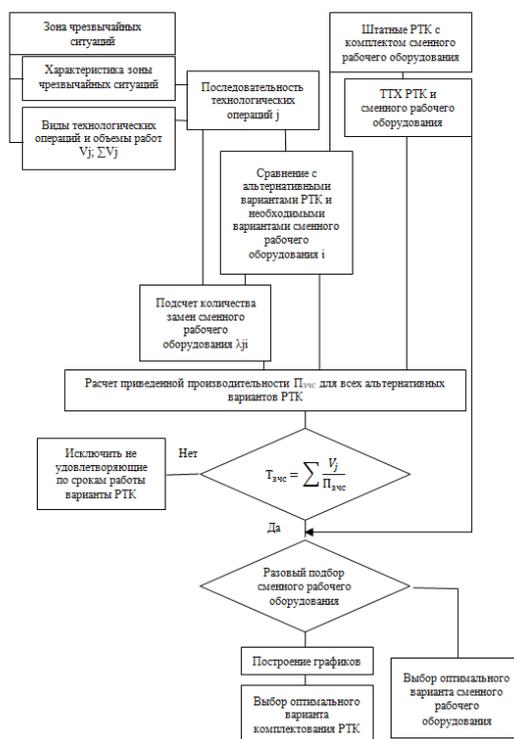


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подбора оптимального варианта сменного рабочего оборудования для РТК, предназначенного для ведения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС

Предварительный анализ показывает, что массогабаритные показатели экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» в значительной мере соответствуют аналогичным показателям малогабаритных универсальных погрузчиков типа Bobcat S590 Bobcat S630 [21]. Исходя из этого можно предположить, что комплект навесного и съемного рабочего оборудования можно рассматривать в качестве основы для адаптации экспериментальной робототехнической платформы «Маркер» для решения задач выполняемых в ходе ликвидации ЧС.

Типовой комплект такого оборудования включает: молот гидравлический; захват промышленный; захват штыковой; устройство наклона ковша Tilt Tatch; бункер самосвальный; культиватор роторный; ковш общего назначения; дисковая фреза; ковш каркасный; бетонолом; вилы палетные с гидравлическим сдвигом; бур шнековый; кирковщик; фреза для вырезания люков; ковш низкопрофильный; ковш двухчелюстной; отвал бульдозерный; захват для бревен; стальные гусеницы; обратная лопата; ковш строительный/промышленный; отвал снегоуборочный V-образный; траншекопатель.

**Заключение.** В настоящее время существует большой набор специализированных рабочих органов, навесного и съемного специализированного оборудования, которое позволяет достаточно эффективно выполнять технологические операции в ходе ведения аварийно-спасательных работ в зоне ЧС. Однако массогабаритные показатели полного комплекта такого оборудования кратно превышают аналогичные показатели самого РТК. И поэтому использование всего комплекта практически невозможно, в первую очередь в связи с проблемами, возникающими при транспортировке. Предлагаемый метод позволяет рассчитать и сформировать оптимальные комплекты оборудования для РТК увязанные с их массогабаритными показателями.

При этом в целом применение мобильных наземных автономных РТК для ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера приобретает все большую актуальность [1]. И решение задачи по оптимизации рабочих органов, навесного и съемного специализированного оборудования позволит определить требования связанные с адаптацией экспериментальных автономных платформ, их доработку путем обеспечения возможности навески типового оборудования, применяемого в аварийно-спасательных машинах, разработку гидропривода управления этим оборудованием, усиление корпуса в местах крепления навесного и съемного оборудования, создание специального программного обеспечения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мошков В.Б., Баранник А.Ю. Перспективы развития системы робототехники МЧС России в интересах повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. Спецвыпуск. – 2021. – С. 124-126.
2. Переяслов А.Н. Основные цели и задачи развития робототехнических средств для решения задач МЧС России // I Международная научно-практическая конференция по развитию робототехники в области обеспечения безопасности жизнедеятельности «RoboEmercom»: Сб. материалов конференции. МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2021. – С. 196-175.
3. Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H. Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach // Ann Math Artif Intell. – 2008. – 52: 109. – <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
4. Hazon N. Robust and Efficient Multi-Robot Coverage. – Gal A. Kaminka's Publications, 2005. – <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>.
5. Тодосейчук С.П., Самойлов К.И., Климачева Н.Г. и др. Научно-методические основы создания и применения робототехнических средств для решения задач МЧС России. МЧС России. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 192 с.

6. Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R. Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment // Proceedings of the OCEANS'03 Conference. – San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003. – P. 1119-1125.
7. Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. Децентрализованное управление группой однородных подвижных объектов в двумерной среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 5. – С. 346-353.
8. Galceran E., Carreras M. A survey on coverage path planning for robotics // Robotics and Autonomous Systems. – December 2013. – Vol. 61, Issue 12. – P. 1258-1276. – <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
9. Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A. Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. – March 2008. – Vol. 6. – P. 107-120.
10. <https://fpi.gov.ru/projects/fiziko-tekhnicheskie-issledovaniya/marker/>.
11. Носков С.С., Байков А.В., Найденов Д.С. Пути расширения возможностей робототехнических средств при ликвидации ЧС // Применение робототехнических комплексов специального назначения: Сб. трудов секции № 5 XXIX Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь», 21 марта 2019 г. ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России. – 2019. – С. 103-111.
12. Справочник спасателя: Кн. 2: Спасательные работы при ликвидации последствий землетрясений, взрывов, бурь, смерчей и тайфунов. ВНИИ ГОЧС. – М., 1995. – 195 с.
13. Using robots in hazardous environments. Ed. by Y. Baudion and Maki K. Habib. – Woodhead Publishing Limited, 2011.
14. Acar E.U., Choset H., Rizzi A., Atkar P.N., Hull D. Morse Decompositions for Coverage Tasks // I. J. Robotics Res. – 2002. – Vol. 21. – P. 331-344.
15. Исследование операций: учебник / под ред. д-ра техн. наук профессора Юркова Б.Н. – М.: Издание ВИА. – 1990.
16. Казанцев А.К., Киселев В.Н., Рубвальтер Д.А., Рудневский О.В. NBIC-технологии: Инновационная цивилизация XXI века / под ред. д.э.н. А.К. Казанцева и д.э.н. Д.А. Рубвальтера. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 384 с. – (Научная мысль).
17. Дворковой В., Дворковой Д. Многофункциональные дорожно-строительные машины (Ч. 2). Рациональное применение. – <https://os1.ru/article/4482-ratsionalnoe-primeneniemnogofunktsionalnye-dorojno-stroitelnye-mashiny-ch-2>.
18. Дворковой В., Дворковой Д. Многофункциональные дорожно-строительные машины (Ч. 1). Обзор типов сменного рабочего оборудования. – <https://os1.ru/article/4477-obzor-tipov-smennogo-rabocheho-oborudovaniya-mnogofunktsionalnye-dorojno-stroitelnye-mashiny-ch-1>.
19. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – October 2001. – Vol. 31. – P. 113-126. – <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
20. Одинцов Л.Г., Парамонов В.В. Технология и технические средства ведения поисково-спасательных и аварийно-спасательных работ: Справочное пособие. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004, – 232 с.
21. <https://www.bobcat.com/cis/ru/index>.

## REFERENCES

1. Moshkov V.B., Barannik A.Yu. Perspektivy razvitiya sistemy robototekhniki MChS Rossii v interesakh povysheniya effektivnosti vedeniya avariyno-spatatel'nykh rabot [Prospects for the development of the robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the interests of improving the efficiency of emergency rescue operations], *Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. Spetsvypusk* [Civil Security Technologies. Special issue], 2021, pp. 124-126.
2. Pereyaslov A.N. Osnovnye tseli i zadachi razvitiya robototekhnicheskikh sredstv dlya resheniya zadach mchs Rossii [The main goals and objectives of the development of robotic means to solve the problems of the Russian Emergencies Ministry], *I Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po razvitiyu robototekhniki v oblasti obespecheniya bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti «RoboEmercom»: Sb. materialov konferentsii. MChS Rossii* [I International Scientific and Practical Conference on the Development of Robotics in the Field of Life Safety "RoboEmercom": Collection of materials of the conference]. EMERCOM of Russia. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs), 2021, pp. 196-175.

3. *Rekleitis I., New A.P., Rankin E.S., Choset H.* Efficient Boustrophedon Multi-Robot Coverage: an algorithmic approach, *Ann Math Artif Intell.*, 2008, 52: 109. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10472-009-9120-2>.
4. *Hazon N.* Robust and Efficient Multi-Robot Coverage. Gal A. Kaminka's Publications, 2005. Available at: <http://u.cs.biu.ac.il/~galk/Publications/Papers/noam-msc.pdf>.
5. *Todoseychuk S.P., Samoylov K.I., Klimacheva N.G.* i dr. Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i primeneniya robototekhnicheskikh sredstv dlya resheniya zadach MChS Rossii. MChS Rossii [Scientific and methodological foundations for the creation and use of robotic tools for solving the problems of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. EMERCOM of Russia. Moscow: FGBU VNII GOChS (FTs), 2011, 192 p.
6. *Charles M.C., Zurawski C.W., Dobeck G.J., Weilert D.R.* Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment, *Proceedings of the OCEANS'03 Conference*. San-Diego, USA: MTS/IEEE, 2003, pp. 1119-1125.
7. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Detsentralizovannoe upravlenie gruppy odnorodnykh podvizhnykh ob"ektov v dvumernoy srede s prepyatstviyami [Decentralized control of a group of homogeneous moving objects in a two-dimensional environment with obstacles], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2016, Vol. 17, No. 5, pp. 346-353.
8. *Galceran E., Carreras M.* A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, December 2013, Vol. 61, Issue 12, pp. 1258-1276. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
9. *Atkar P.N., Conner D.C., Greenfield A., Choset H., Rizzi A.A.* Hierarchical Segmentation of Piecewise Pseudoextruded Surfaces for Uniform Coverage, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, March 2008, Vol. 6, pp. 107-120.
10. Available at: <https://fpi.gov.ru/projects/fiziko-tekhnicheskije-issledovaniya/marker/>.
11. *Noskov S.S., Baykov A.V., Naydenov D.S.* Puti rasshireniya vozmozhnostey robototekhnicheskikh sredstv pri likvidatsii ChS [Ways to expand the capabilities of robotic means in the elimination of emergencies], *Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov spetsial'nogo naznacheniya: Sb. trudov sektsii № 5 XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Predotvrashchenie. Spasenie. Pomoshch'», 21 marta 2019 g.* [The use of robotic systems for special purposes: Proceedings of section No. 5 of the XXIX International scientific and practical conference "Prevention. The rescue. Help", March 21, 2019] FGBVOU VO AGZ EMERCOM of Russia, 2019, pp. 103-111.
12. *Spravochnik spasatelya: Kn. 2: Spasatel'nye raboty pri likvidatsii posledstviy zemletryaseniy, vzyrovov, bur', smerchey i tayfunov* [Rescuer's Handbook: Book 2: Rescue work in the aftermath of earthquakes, explosions, storms, tornadoes and typhoons]. VNII GOChS. Moscow, 1995, 195 p.
13. *Using robots in hazardous environments.* Ed. by Y. Baudion and Maki K. Habib. Woodhead Publishing Limited, 2011.
14. *Acar E.U., Choset H., Rizzi A., Atkar P.N., Hull D.* Morse Decompositions for Coverage Tasks, *I. J. Robotics Res.*, 2002, Vol. 21, pp. 331-344.
15. *Issledovanie operatsiy: uchebnik* [Operations research. Textbook], ed. by dr. of eng. sc., professor Yurkov B.N. Moscow: Izdanie VIA, 1990.
16. *Kazantsev A.K., Kiselev V.N., Rubval'ter D.A., Rudnevskiy O.V.* NBIC-tehnologii: Innovatsionnaya tsivilizatsiya XXI veka [NBIC Technologies: Innovative Civilization of the 21st Century], ed. by dr. of econ. sc. A.K. Kazantseva and dr. of econ. sc. D.A. Rubwalter. Moscow: INFRA-M, 2012, 384 p. (Scientific thought).
17. *Dvorkovoy V., Dvorkovoy D.* Mnogofunktsional'nye dorozhno-stroitel'nye mashiny (Ch. 2). Ratsional'noe primeneniye [Multifunctional road construction machines (Part 2). Rational application]. Available at: <https://os1.ru/article/4482-ratsionalnoe-primeneniye-mnogofunktsionalnyeh-dorozhno-stroitelnyeh-mashin-ch-2>.
18. *Dvorkovoy V., Dvorkovoy D.* Mnogofunktsional'nye dorozhno-stroitel'nye mashiny (Ch. 1). Obzor tipov smennogo rabocheho oborudovaniya [Multifunctional road construction machines (Part 1). An overview of the types of interchangeable working equipment]. Available at: <https://os1.ru/article/4477-obzor-tipov-smennogo-rabocheho-oborudovaniya-mnogofunktsionalnyeh-dorozhno-stroitelnyeh-mashin-ch-1>.

19. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, October 2001, Vol. 31, pp. 113-126. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
20. Odintsov L.G., Paramonov V.V. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva vedeniya poiskovo-spasatel'nykh i avariyno-spasatel'nykh robot: Spravochnoe posobie [Technology and technical means of conducting search and rescue and rescue operations: a reference guide]*. Moscow: Izd-vo NTS ENAS, 2004, 232 p.
21. Available at: <https://www.bobcat.com/cis/ru/index>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Овчинников.

**Баранник Александр Юрьевич** – Федеральное государственное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)); e-mail: [auba@yandex.ru](mailto:auba@yandex.ru); г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н., с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

**Лагутина Анна Викторовна** – e-mail: [anya-lagutina@yandex.ru](mailto:anya-lagutina@yandex.ru); тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

**Дудоров Евгений Александрович** – Научно-производственное объединение «Андроидная техника»; e-mail: [dudorov@npo-at.com](mailto:dudorov@npo-at.com); г. Москва, Россия; тел. 8904974-7199; к.т.н.; доцент; исполнительный директор.

**Barannik Alexander Yuryevich** – Federal State Budgetary Establishment «All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia» (Federal Science and High Technologies Center) (VNI GOChS (FC)); e-mail: [auba@yandex.ru](mailto:auba@yandex.ru); Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center.

**Lagutina Anna Viktorovna** – e-mail: [anya-lagutina@yandex.ru](mailto:anya-lagutina@yandex.ru); phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center.

**Dudorov Evgeny Alexandrovich** – Scientific and Production Association "Android technology"; e-mail: [dudorov@npo-at.com](mailto:dudorov@npo-at.com); Moscow, Russia; phone: +79049747199; cand. of eng. sc.; associate professor; Executive Director.

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-192-204

**А.А. Кабанов, А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, В.Ф. Филаретов, В.А. Крамарь**

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРИВОДАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*В работе рассматривается задача идентификации дефектов в приводах робототехнических систем, модель динамики которых описывается линейными дифференциальными уравнениями. Решение задачи идентификации дефектов предложено искать на основе решения вспомогательной задачи оптимального управления для динамической системы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, которое должно обеспечить минимум функционалу невязки. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления предложен диагностический наблюдатель дефектов. При этом сам дефект находится через решение соответствующего алгебраического уравнения Риккати и дифференциального уравнения для вспомогательной переменной. В отличие от популярных подходов к решению задачи идентификации дефектов, основанных на наблюдателях, работающих в скользящем режиме, предлагаемый метод позволяет расширить класс систем, для которых может быть решена задача идентификации. Известно, что методы проектирования наблюдателей скользящего режима накладывают определенные ограниче-*