

33. *Lapin B.S., Ermolov I.L., Sobolnikov S.A.* THE simply integrated approach for surface parameters detection by UGV, *Extreme Robotics*, 2019, Vol. 1, No. 1, pp. 137-144.
34. *Forrest R.M., Neal S., Alonzo K.* Continuous Vehicle Slip Model Identification on Changing Terrains, *Proceedings of RSS 2012 Workshop on Long-term Operation of Autonomous Robotic Systems in Changing Environments*, July 2012.
35. *Ojeda L., Cruz D., Reina G., Borenstein J.* Current-Based Slippage Detection and Odometry Correction for Mobile Robots and Planetary Rovers, *IEEE Transactions on Robotics*, April 2006, Vol. 22, No. 2, pp. 366-378.
36. *Andreas G., Philip L., Christoph S., Raquel U.* Vision meets Robotics: The KITTI Dataset, *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, 2013.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. В.П. Носков.

Лапин Борис Сергеевич – ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»; e-mail: mail@borislap.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79175651032; инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории.

Гойдин Олег Петрович – e-mail: crer@vniia.ru; руководитель центра робототехники и аварийного реагирования.

Собольников Сергей Александрович – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru, тел.: +79263879088; к.т.н.; доцент; начальник научно-исследовательской лаборатории.

Ермолов Иван Леонидович – Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук; e-mail: ermolov@ipmnet.ru; г. Москва, Россия; тел.: 84954343547; д.т.н.; профессор РАН; зам. директора по научной работе,

Lapin Boris Sergeevich – FSUE "VNIIA"; e-mail: mail@borislap.ru; Moscow, Russia; phone: +79175651032; research engineer of the research laboratory.

Goydin Oleg Petrovich – e-mail: crer@vniia.ru; head of the Center for robotics and emergency response.

Sobolnikov Sergey Aleksandrovich – e-mail: sasobolnikov@vniia.ru; phone: +79263879088; cand. of eng. sc.; associate professor; head of the research laboratory.

Ermolov Ivan Leonidovich – Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ermolov@ipmnet.ru; Moscow, Russia; dr. of eng. sc.; professor RAS; deputy head of scientific work.

УДК 614.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-68-77

Е.В. Павлов, В.И. Ершов, А.Ю. Баранник, А.В. Лагутина

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ НЕОТЛОЖНЫХ РАБОТ

Предложен подход к обоснованию параметров робототехнического комплекса, предназначенного для проведения аварийно-спасательных работ и других неотложных работ при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах (далее – РТК). Данный подход основан на формулировании идеальной модели робототехнического комплекса и дальнейшем ее преобразовании с целью обеспечения возможности создания, на основе существующих промышленных технологий, перспективного образца, превосходящего по показателям существующие робототехнические средства. Выбранный подход определяет ряд положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий, включая теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения; способы действий при его организации; алгоритм его осуществления. В ходе достижения поставленной цели – обоснования параметров рассматриваемого РТК, были решены следующие научные задачи: проанализированы проблемы создания модели оптимизации параметров, разработана «идеальная модель» оптимизации параметров, на ос-

нове которой подготовлена рациональная модель оптимизации параметров РТК. При решении данных задач были определены основные особенности идеальных РТК: автономность, гибкость, интеллектуальность, маневренность, программируемость, обладание сенсорной обратной связью. Кроме того, идеальные РТК должны обеспечивать: исключение гибели и травматизма личного состава при ликвидации чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС); повышение эффективности проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ (далее – АСДНР); гибкость и адаптивность при проведении АСДНР. Под рационализацией идеальной модели в данной статье предлагается понимать ее преобразование путем снижения требований к соответствующим параметрам. При этом рассматривается два вида рационализации параметров РТК: – по тактическим показателям – модель, которую целесообразно реализовать в случае, если стохастическую математическую модель действий РТК удастся разработать; – по техническим показателям – модель, используемую, если упомянутая модель действий РТК создана не будет. Такой подход дает возможность оценивать степень отклонения выбранных параметров РТК и используемых методов их обоснования от наилучших вариантов, а также наметить пути по их совершенствованию.

Модель оптимизации параметров; идеальная модель; рациональная модель; технические показатели; многокритериальная оценка; метод анализа иерархий.

E.V. Pavlov, V.I. Ershov, A.Y. Barannik, A.V. Lagutina

APPROACH TO JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF A ROBOTIC COMPLEX FOR CARRYING OUT EMERGENCY RESCUE AND OTHER EMERGENCY OPERATIONS

An approach is proposed to substantiate the parameters of a robotic complex designed for emergency rescue and other urgent work in the aftermath of accidents at particularly dangerous facilities (hereinafter – RTC). This approach is based on the formulation of an ideal model of a robotic complex and its further transformation in order to ensure the possibility of creating, on the basis of existing industrial technologies, a promising sample that surpasses existing robotic tools in terms of performance. The chosen approach defines a number of provisions regarding the process of substantiating the parameters of technology and the creation of its promising samples and technologies, including theoretical provisions that should be the basis for its consideration; methods of action in its organization; the algorithm of its implementation. In the course of achieving this goal – substantiating the parameters of the RTC under consideration, the following scientific tasks were solved: the problems of creating a model for optimizing parameters were analyzed, an "ideal model" for optimizing parameters was developed, on the basis of which a rational model for optimizing RTC parameters was prepared. When solving these tasks, the main features of ideal RTCs were identified: autonomy, flexibility, intelligence, maneuverability, programmability, possession of sensory feedback. In addition, ideal RTCs should ensure: the exclusion of deaths and injuries of personnel during emergency situations (hereinafter referred to as emergencies); improving the effectiveness of emergency rescue and other urgent work (hereinafter referred to as EROUW); flexibility and adaptability during EROUW. The rationalization of an ideal model in this article is proposed to be understood as its transformation by reducing the requirements for the corresponding parameters. At the same time, two types of rationalization of RTC parameters are considered: – according to tactical indicators, it is a model that is advisable to implement if a stochastic mathematical model of RTC actions can be developed; – according to technical indicators, the model used if the mentioned RTC action model is not created. This approach makes it possible to assess the degree of deviation of the selected RTC parameters and the methods used to justify them from the best options, as well as to outline ways to improve them.

Parameter optimization model; ideal model; rational model; technical indicators; multi-criteria assessment; hierarchy analysis method.

Введение. Анализ современных методов решения проблем выбора рациональных технических инноваций [1–3] показывает, что создание нового робототехнического комплекса (РТК) должно опираться на ряд обоснованных научно-технических оснований, которые в совокупности называются *подходом к решению* этой задачи. Правильно выбранный подход к созданию техники позволяет сформировать обоснованные ее параметры, на основе которых, в свою очередь, и

производится ее разработка. Выбранный подход определяет ряд важных положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий:

- ◆ теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения;
- ◆ способы действий при его организации;
- ◆ алгоритм его осуществления.

В соответствии с исследованиями [4-6] основополагающими являются установки концептуального аспекта подхода, в которых заложена целевая направленность технических решений по созданию РТК. Они включают три группы частных подходов: 1) к техническому решению проблемы (основные исходные установки); 2) общенаучные (системный, процессуальный, ситуационный и другие); 3) направленные на поиск рациональных решений. Настоящая статья посвящена вопросам реализации подходов третьей группы, требующей определенных интеллектуальных напряжений и затрат, и обычно осуществляемых с помощью операций перебора и проб, которые зачастую носят стихийный характер.

Одним из частных подходов, направленных на поиск рациональных решений по обоснованию параметров РТК при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах, является подход в основе которого положено построение некоторой предварительно разработанной модели оптимизации параметров РТК, определенной в качестве идеальной, и дальнейшее ее последовательное изменение, обеспечивающее работоспособность преобразованной модели (рис. 1.).

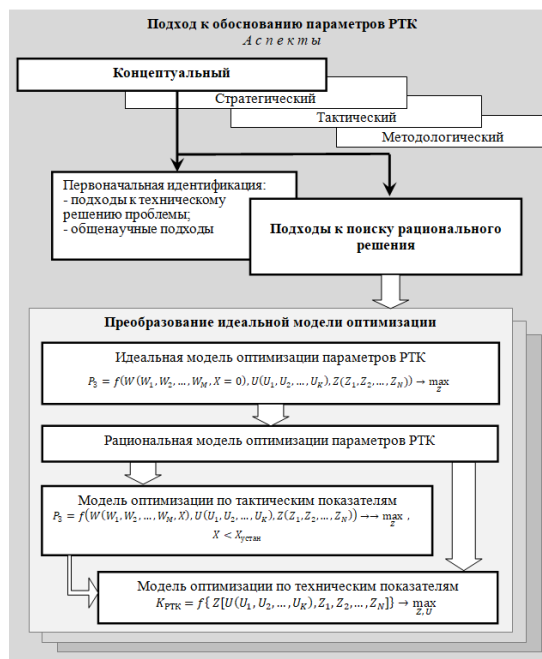


Рис. 1. Схема подхода к обоснованию параметров РТК для проведения АСДНР

Данный подход определяет ряд положений в отношении процесса обоснования параметров техники и создания ее перспективных образцов и технологий, включая теоретические положения, которые следует положить в основу его рассмотрения; способы действий при его организации; алгоритм его осуществления. В ходе достижения поставленной цели – обоснования параметров рассматривае-

мого РТК, необходимо решить следующие научные задачи: проанализировать проблемы создания модели оптимизации параметров, разработать идеальную модель оптимизации параметров и на ее основе создать рациональную модель оптимизации параметров РТК.

1. Модель оптимизации параметров РТК. Модель оптимизации параметров РТК включает формальное описание функционала, подлежащего оптимизации, а также ряд аргументов, отражающих состав подсистем РТК, их оптимизируемые параметры и условия функционирования [7–9]:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (1)$$

где P_3 – вероятность выполнения задачи;

W – вектор условий, определяющих факт выполнения задачи, включающий:

W_1 – условие обеспечения минимальных материальных потерь защищаемого объекта: $C < C_{\text{норма}}$;

W_2 – условие обеспечения минимальных материальных потерь РТК: $N_i < N_{i\text{норма}}$;

W_3 – условие оперативности пожаротушения и проведения АСДНР: $T < T_{\text{зад}}$;

...;

X – допустимые потери личного состава;

U – множество внешних условий, влияющих на результат:

U_1 – поражающие факторы;

U_2 – погодные условия;

U_3 – источники огнетушащих веществ;

U_4 – возможное усиление;

...;

Z – множество параметров подсистем, которые могут входить в состав РТК:

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

– автономное управление и искусственный интеллект; – дистанционное управление; – комплексное управление; ...;

Z_2 – шасси (варианты): – гусеничное на базе танка; – колесное; – смешанное;

Z_3 – подсистема проведения АСР: параметры Z_{31}, Z_{32}, \dots ;

Z_4 – подсистема пожаротушения: параметры Z_{41}, Z_{42}, \dots ;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: параметры Z_{51}, Z_{52}, \dots ;

Z_6 – подсистема рукавная: параметры Z_{61}, Z_{62}, \dots ;

Z_7 – подсистема насосная: параметры Z_{71}, Z_{72}, \dots

Ограничения, подлежащие учету:

♦ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

♦ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР.

Модель оптимизации параметров РТК является работоспособной, если:

1) множество возможных значений аргументов с учетом подлежащих учету ограничений не является пустым;

2) определены математическое выражение функционала и метод его оптимизации.

2. Идеальная модель оптимизации параметров РТК. Идеальная модель оптимизации параметров РТК – модель, обеспечивающая обоснование параметров идеального РТК.

Идеальный робототехнический комплекс при проведении АСДНР – это РТК, который обладает определенными характеристиками и свойствами, позволяющими выполнять задачи по предназначению с гарантированной эффективностью и максимальным результатом [10].

Идеальные РТК должны обладать следующими основными особенностями:

♦ *автономность* – способны работать и принимать решения самостоятельно, без постоянного управления оператором;

♦ *гибкость* – могут адаптироваться к различным ситуациям и изменять выполнение различные виды работ в зависимости от условий;

- ◆ *интеллектуальностью* – обладают способностью к обучению и анализу информации, что позволяет им улучшать свою производительность и эффективность;
- ◆ *маневренностью* – обладают высокой подвижностью и могут перемещаться в различных направлениях и по разным поверхностям;
- ◆ *сенсорной обратной связью* – оснащены различными сенсорами, которые позволяют воспринимать окружающую среду и реагировать на изменения в ней;
- ◆ *программируемостью* – могут быть запрограммированы для выполнения определенных задач и операций.

Идеальные РТК должны обеспечивать:

- ◆ исключение гибели и травматизма личного состава при ликвидации ЧС;
- ◆ повышение эффективности проведения АСДНР;
- ◆ гибкость и адаптивность при проведении АСДНР.

Идеальную модель оптимизации РТК можно представить в следующем формализованном виде:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X = 0), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (2)$$

где в отличие от общей модели имеются следующие особенности:

$X = 0$ – потери личного состава недопустимы;

Z – множество подсистем, которые могут входить в состав РТК;

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения: автономное управление и искусственный интеллект;

Z_2 – шасси (варианты): гусеничное на базе танка Т-72;

Z_3 – подсистема проведения АСДНР: должна функционировать, параметры;

Z_4 – подсистема пожаротушения: должна функционировать, параметры;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: должна функционировать, параметры;

Z_6 – подсистема рукавная: должна функционировать, параметры;

Z_7 – подсистема насосная: должна функционировать, параметры.

Ограничения, подлежащие учету:

◆ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

◆ тактические возможности РТК;

◆ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР;

Идеальная модель оптимизации РТК в настоящее время *не может быть реализована* по следующим причинам:

◆ не может быть гарантировано полное исключение потерь личного состава или его травмирования, так как не исключаются все способствующие этому операции;

◆ не создано автономное управление и искусственный интеллект РТК;

◆ не может быть реализовано принятие решения с использованием автономного управления и искусственного интеллекта;

◆ к настоящему времени не создана эффективная стохастическая математическая модель действий РТК, обеспечивающая получение удовлетворительных результатов расчета вероятности выполнения задачи по тушению пожара и проведения АСДНР.

3. Рациональная модель оптимизации параметров РТК. Невозможность по указанным выше причинам реализовать идеальную модель оптимизации параметров РТК вынуждает ее преобразовывать путем снижения требований к соответствующим ограничениям. В этом случае следует уже вести речь не об идеальной, а о рациональной модели [11–14]. Далее рассматривается два вида рациональной модели оптимизации параметров РТК:

◆ по тактическим показателям – модель, которую целесообразно реализовать в случае, если стохастическую математическую модель действий РТК удастся разработать;

◆ по техническим показателям – модель, используемую, если упомянутая модель действий РТК создана не будет.

Рациональная модель оптимизации РТК по **тактическим** показателям представляется в следующем виде:

$$P_3 = f(W(W_1, W_2, \dots, W_M, X), U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z(Z_1, Z_2, \dots, Z_N)) \rightarrow \max_Z, \quad (3)$$

которая в отличие от идеальной модели имеет следующие особенности:

X – допускаются потери личного состава: $X < X_{устан}$;

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

◆ дистанционное управление;

◆ комплексное управление;

...

Рациональная модель оптимизации РТК по **техническим показателям** основана на применении методов многокритериальной оценки, где в качестве множества частных критериев берутся параметры подсистем, входящих в состав РТК, а также показатели возможностей РТК по действиям в различных условиях. Авторы статьи считают целесообразным, чтобы многокритериальная оценка осуществлялась с применением метода анализа иерархий с использованием аддитивной модели попарных сравнений альтернатив (значимости параметров и подсистем) [6–8]. Использование данного метода по сравнению с другими методами снижает неопределенность в построении ранжировок альтернатив, что и определяет его выбор.

Формализованное описание модели оптимизации параметров РТК по техническим показателям имеет следующий вид [16–18]:

$$K_{РТК} = f\{Z[U(U_1, U_2, \dots, U_K), Z_1, Z_2, \dots, Z_N]\} \rightarrow \max_{Z, U}, \quad (4)$$

где $K_{РТК}$ – качество варианта исполнения РТК;

f – операции многокритериальной оценки;

U – возможности РТК по действиям в множестве внешних условий, влияющих на результат:

U_1 – поражающие факторы;

U_2 – погодные условия;

U_3 – источники ОБ;

U_4 – возможное усиление; ...

Z – множество подсистем, которые могут входить в состав РТК:

Z_1 – подсистема принятия оперативного решения с параметрами (варианты):

◆ дистанционное управление;

◆ комплексное управление;

...;

Z_2 – шасси (варианты): гусеничное на базе танка Т-72;

Z_3 – подсистема проведения АСР: параметры;

Z_4 – подсистема пожаротушения: параметры;

Z_5 – подсистема высотного пожаротушения: параметры;

Z_6 – подсистема рукавная: параметры;

Z_7 – подсистема насосная: параметры.

Ограничения, подлежащие учету:

◆ технические характеристики противопожарного оборудования и систем управления;

◆ работа в условиях поражающих факторов пожара и АСДНР.

Реализация модели оптимизации параметров РТК по техническим показателям заключается в построении ранжировки ($K_{РТК1}, \dots, K_{РТКn}$) вариантов исполнения РТК и выбора из них варианта с наибольшим значением качества $K_{РТК} = \max(K_{РТК1}, \dots, K_{РТКn})$ [9]. Построение этой ранжировки с применением метода анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений заключается в решении матричного математического выражения [19–20]:

$$(K_{РТК\ 1}, \dots, K_{РТК\ n}) = (w_1, \dots, w_m) \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где (w_1, \dots, w_m) – вектор-строка нормированных весов критериев (m – количество критериев), определяемая методом попарных сравнений значимости критериев в процессе экспертных оценок;

(x_{j1}, \dots, x_{jn}) – строки матрицы решений, являющиеся ранжировками альтернатив (n – количество типов) по каждому j -тому критерию ($j = 1, \dots, m$), определяемыми методом попарных сравнений фактических значений критериев.

При применении метода попарных сравнений ранжировка альтернатив (w_1, \dots, w_n) , $i = 1, \dots, n$ строится по величинам их *весов*, рассчитываемым с использованием квадратной матрицы попарных сравнений Y (размерностью $n \times n$, где n – количество альтернатив). Матрица Y имеет сходство со спортивной турнирной таблицей, в которой в зависимости от применяемой модели попарных сравнений (аддитивной или мультипликативной) в клетки главной диагонали $(y_{11}, y_{22}, \dots, y_{nn})$ ставятся 0.5 или 1:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где значения элементов матрицы – результаты сравнения двух альтернатив a_i и a_j – определяются в соответствии со следующими правилами для аддитивной модели:

$y_{ij} = 1$, если $a_i \succ a_j$ – при парном сравнении принято, что альтернатива a_i важнее альтернативы a_j ;

$y_{ij} = 0$, если $a_i \prec a_j$ – альтернатива a_j важнее альтернативы a_i ;

$y_{ij} = 0.5$, если $a_i \approx a_j$ – альтернативы a_i и a_j по важности примерно одинаковы;

$y_{ii} = 0.5$ (при $j = i$);

$y_{ij} = 1 - y_{ji}$.

Веса каждой из альтернатив определяются по формуле:

$$w'_i = \sum_{i=1}^n y_{1i}, \quad (7)$$

Нормированные веса определяются как

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{k=1}^n w'_k}, \quad (8)$$

Выполнение нормировки весов является удобным приемом для согласования оценок альтернатив с различными типами шкал измерения.

Заключение. В целом рассмотренный подход к обоснованию параметров РТК, предназначенного для проведения АСДНР при ликвидации последствий аварий на особо опасных объектах, позволяет построить рациональную работоспособную модель оптимизации, постепенно выполняя ее преобразования, отталкиваясь от исходной идеальной модели. Такой подход дает возможность оценивать степень отклонения выбранных параметров РТК и используемых методов их обоснования от наилучших вариантов, а также наметить пути по их совершенствованию. Из изложенного материала, согласно которому предлагается применять оптимизацию РТК по техническим показателям, следует, что для совершенствования процесса оптимизации в первую очередь следует разработать стохастическую математическую модель действий РТК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липичу Н.В., Липичу К.И. Методология научного исследования: учеб. пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – С. 24.
2. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. – М.: Либроком, 2010. – С. 134-138.

3. *Майданов А.С.* Методология научного творчества. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – С. 46-75.
4. *Abrosimov V., Mochalkin A.* Collective behavior strategy development based on friendship of robots // *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Valenciennes, France. – P. 38-4. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
5. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. – *Wit Pr/Computational Mechanics*, 2014. – 216 p.
6. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. – 2020 ed. – <https://www.semanticscholar.org>.
7. *Lan G.* Bundle-level type methods uniformly optimal for smooth and nonsmooth convex optimization // *Math. Program.* – 2015. – Vol. 149, No. 1–2. – P. 1-45.
8. *D'Aspremont A.* Smooth optimization with approximate gradient // *SIAM J. Optimizat.* – 2019. – Vol. 19, No. 3. – P. 1171-1183.
9. *Bach F., Levy K.Y.* A universal algorithm for variational inequalities adaptive to smoothness and noise // *COLT*, 2019.
10. *Павлов Е.В.* Разработка методики обоснования тактико-технических требований к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения // *Технологии гражданской безопасности*. – 2020. – Т. 17, № 2 (64). – С. 61-67.
11. Робототехника: Определение, свойства и примеры идеального класса робототехники // *Научные Статьи.Ру* – портал для студентов и аспирантов. – Дата последнего обновления статьи: 29.11.2023. – URL <https://nauchniestati.ru/spravka/idealnyj-klass-robototekhniki/> (дата обращения: 24.12.2023).
12. *Чварков С.В., Селиванов А.А., Ковальчук А.М.* Концептуальный подход к построению эмпирических основ формирования системы робототехнических комплексов военного назначения // *Вестник Академии военных наук*. – 2022. – № 1 (77). – С. 109-119.
13. *Саати Т.* Принятие решений – Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
14. *Орлов А.И.* Организационно-экономическое моделирование: учебник: в 3 ч. Ч. 2: Экспертные оценки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 486 с.
15. *Ларичев О.И.* Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2002. – 392 с.
16. *Боев В.Д., Сыпченко Р.П.* Компьютерное моделирование. Элементы теории и практики: учеб. пособие. – СПб.: ВАС, 2009.
17. *Алямовский А.А. [и др.]*. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 800 с. – ISBN 978-5-94157-994-5.
18. *Павлов Е.В., Баранник А.Ю.* Подход к разработке робототехнических комплексов, предназначенных для ведения аварийно-спасательных работ в зонах разрушений с пожарами // *Технологии гражданской безопасности*. – 2023. – Т. 20, № 4 (78). – С. 45-51.
19. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1989.
20. *Bodin Lawrence, Saul I. Gass.* Exercises for Teaching the Analytic Hierarchy Process (англ.) // *INFORMS Transactions on Education: journal*. – 2004. – January (Vol. 4, No. 2). Архивировано 21 мая 2009 года.

REFERENCES

1. *Lipchii N.V., Lipchii K.I.* Metodologiya nauchnogo issledovaniya: ucheb. posobie [Methodology of scientific research: a textbook]. Krasnodar: KubGAU, 2013, pp. 24.
2. *Novikov A.M., Novikov D.A.* Metodologiya nauchnogo issledovaniya [Methodology of scientific research]. Moscow: Librokom, 2010, pp. 134-138.
3. *Maydanov A.S.* Metodologiya nauchnogo tvorchestva [Methodology of scientific creativity]. Moscow: Izd-vo LKI, 2008, pp. 46-75.
4. *Abrosimov V., Mochalkin A.* Collective behavior strategy development based on friendship of robots, *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, Valenciennes, France, pp. 38-4. DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
5. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. *Wit Pr/Computational Mechanics*, 2014, 216 p.
6. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. 2020 ed. Available at: <https://www.semanticscholar.org>.
7. *Lan G.* Bundle-level type methods uniformly optimal for smooth and nonsmooth convex optimization, *Math. Program.*, 2015, Vol. 149, No. 1–2, pp. 1-45.
8. *D'Aspremont A.* Smooth optimization with approximate gradient, *SIAM J. Optimizat.*, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 1171-1183.

9. *Bach F., Levy K.Y.* A universal algorithm for variational inequalities adaptive to smoothness and noise, COLT, 2019.
10. *Pavlov E.V.* Razrabotka metodiki obosnovaniya taktiko-tekhnicheskikh trebovaniy k robototekhnicheskomu kompleksu mnogorezhimnogo pozharotusheniya [Development of a methodology for substantiating tactical and technical requirements for a multi-mode fire extinguishing robotic complex], *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Technologies of Civil Safety], 2020, Vol. 17, No. 2 (64), pp. 61-67.
11. Robototekhnika: Opredelenie, svoystva i primery ideal'nogo klassa robototekhniki [Robotics: Definition, properties and examples of an ideal class of robotics], *Nauchye Stat'i.Ru – portal dlya studentov i aspirantov* [Scientific Articles.<url> is a portal for students and postgraduates]. Date of the last update of the article: 11/29/2023. Available at: <https://nauchniestati.ru/spravka/idealnyj-klass-robototekhniki/> (accessed 24 December 2023).
12. *Chvarkov S.V., Selivanov A.A., Koval'chuk A.M.* Kontseptual'nyy podkhod k postroeniyu empiricheskikh osnov formirovaniya sistemy robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Conceptual approach to the construction of empirical foundations for the formation of a system of military robotic complexes], *Vestnik Akademii voennykh nauk* [Bulletin of the Academy of Military Sciences], 2022, No. 1 (77), pp. 109-119.
13. *Saati T.* Prinyatie resheniy – Metod analiza ierarkhiy [Decision-making - A method of analyzing hierarchies]. Moscow: Radio i svyaz', 1993, 278 p.
14. *Orlov A.I.* Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie: uchebnyk: v 3 ch. Ch. 2: Ekspertnye otsenki [Organizational and economic modeling: textbook: in 3 part. Part 2: Expert assessments]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011, 486 p.
15. *Larichev O.I.* Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobytij v Volshebnykh Stranakh: uchebnyk [Theory and methods of decision-making, as well as a chronicle of events in Magical Countries: Textbook]. 2nd ed. Moscow: Logos, 2002, 392 p.
16. *Boev V.D., Sypchenko R.P.* Komp'yuternoe modelirovanie. Elementy teorii i praktiki: ucheb. posobie [Computer modeling. Elements of theory and practice: Study guide]. St. Petersburg: VAS, 2009.
17. *Alyamovskiy A.A. [i dr.].* SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [Computer modeling in engineering practice]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012, 800 p. ISBN 978-5-94157-994-5.
18. *Pavlov E.V., Barannik A.Yu.* Podkhod k razrabotke robototekhnicheskikh kompleksov, prednaznachennykh dlya vedeniya avariynno-spatel'nykh rabot v zonakh razrusheniya s pozharami [An approach to the development of robotic complexes designed for conducting emergency rescue operations in areas of destruction with fires], *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* [Technologies of Civil Safety], 2023, Vol. 20, No. 4 (78), pp. 45-51.
19. *Saati T.* Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision-making. The method of hierarchy analysis]. Moscow: Radio i svyaz', 1989.
20. *Bodin Lawrence, Saul I. Gass.* Exercises for Teaching the Analytic Hierarchy Process, *INFORMS Transactions on Education: journal*, 2004, January (Vol. 4, No. 2). Archived on May 21, 2009.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.П. Чумак.

Павлов Евгений Владимирович – Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»; e-mail: pavlov-yr@mail.ru; г. Балашиха, Россия; тел.: 89167850002; старший научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматике.

Ершов Владимир Иванович – e-mail: evi-monino@mail.ru; тел.: 89690301515; к.в.н.; профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра пожарной техники и пожарной автоматике.

Баранник Александр Юрьевич – Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий; e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н., с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра «Развития технических средств и технологий».

Pavlov Evgeny Vladimirovich – All-Russian Order "Badge of Honor "Research Institute of Fire Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia"; e-mail: pavlov-vp@mail.ru; Balashikha, Russia; phone: +79167850002; senior researcher at the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Ershov Vladimir Ivanovich – e-mail: evi-monino@mail.ru; phone: +79690301515; cand. of mil. sc.; professor; leading researcher of the Research Center for Fire Engineering and Fire Automation.

Barannik Alexander Yuryevich – All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia (Federal Science and High Technologies Center); e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center Development of technical means and technologies.

УДК 519.6+004.021

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-77-88

Б.В. Румянцев, С.В. Прокопчина, А.А. Кочкаров

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОЛЕЙ

Организация непрерывного мониторинга значительных пространств с динамически меняющимися условиями и обстановкой является одной из ключевых задач в различных направлениях жизнедеятельности человека. Особо остро эта задача стоит в России с учетом ее территорий (земель), предназначенных для сельскохозяйственной деятельности. Особую важность организации непрерывного мониторинга подчеркивает и развитие концепции и технологий точного земледелия. В качестве средств для решения этой системной задачи могут использоваться различные робототехнические и беспилотные системы, оснащенные необходимым оборудованием в соответствии с локальными задачами непрерывного мониторинга. Непрерывный мониторинг при этом может быть обеспечен только применением эффективных алгоритмов построения траектории движения используемых подвижных робототехнических и беспилотных (в первую очередь авиационных) систем. Повышение эффективности таких алгоритмов с математической точки зрения всегда усложняется циклическостью траекторий движения, т.е. построением гамильтонова цикла. В рамках данной работы предлагается метод конструирования оптимальной траектории движения при выполнении задач непрерывного циклического мониторинга сельскохозяйственных полей. Метод основан на поиске гамильтонова цикла на графе карты местности и позволяет автоматически строить оптимальный замкнутый путь для произвольной карты местности. Отличительной особенностью метода является использование модифицированного алгоритма поиска гамильтонова цикла. Алгоритм может быть масштабирован для карт, соответствующих графам с большим (более 100) количеством вершин, для которых стандартный алгоритм поиска гамильтонова цикла методом перебора требует значительно большего времени выполнения, чем предложенный алгоритм. Показано, что используемый алгоритм обладает в 17 раз меньшей константой роста временной сложности, чем стандартный алгоритм поиска гамильтонова цикла. Это позволяет увеличить количество вершин графа, используемого для поиска гамильтонова цикла в режиме реального времени (от 0.1 до 100 секунд), на порядок (от 30 до 500). Разработанный алгоритм может быть внедрён в современные беспилотные системы мониторинга состояния сельскохозяйственных полей для оптимизации траектории движения беспилотных аппаратов в режиме реального времени (0.1-100 секунд), внося тем самым вклад в динамично развивающуюся область точного земледелия.

Теория графов; Гамильтонов цикл; временная сложность; мониторинг; точное земледелие.