

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ СУБД

С. В. Иванов¹, А. В. Зайченко², Е. М. Хорольский³, А. А. Колесников⁴

^{1,2} Краснодарское высшее военное училище имени С. М. Штеменко, Краснодар, Россия
^{3,4} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
¹ sta399@yandex.ru, ² zaichenko.an@yandex.ru, ³ horolskii@mail.ru, ⁴ sergo1778@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В условиях современных военных конфликтов актуализируется проблема эффективного управления большими группами роботов. Большой объем данных, связанный с работой робототехнических комплексов (РТК), обуславливает наличие ограничений на эффективное управление группами роботов, разработка, эксплуатация и создание которых требуют больших материальных затрат. Все эти факторы оказывают сильное влияние на возможность создания новых технологий и способов повышения живучести систем, важной частью которых является оценка технического состояния. *Материалы и методы.* Внедрение технологий, позволяющих с высокой точностью определить состояние как отдельных единиц, так и целых РТК, позволяет существенно повысить скорость и эффективность управления РТК двойного назначения, а также повысить живучесть системы в целом. Рассматриваются способы оценивания состояния робототехнических комплексов двойного назначения и проблемы, связанные с ними. *Результаты и выводы.* В данной работе предложен подход к определению состояния робототехнических комплексов с использованием трехуровневой архитектуры системы управления базами данных.

Ключевые слова: анализ состояния, робототехнические комплексы, обработка данных, трехуровневая архитектура СУБД, марковские процессы

Для цитирования: Иванов С. В., Зайченко А. В., Хорольский Е. М., Колесников А. А. Методика оценки состояния робототехнических комплексов двойного назначения на основе применения трехуровневой архитектуры СУБД // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 46–54. doi:10.21685/2307-4205-2022-1-6

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STATE OF DUAL-USE ROBOTIC COMPLEXES BASED ON THE USE OF A THREE-LEVEL ARCHITECTURE OF A DATABASE MANAGEMENT SYSTEM

S.V. Ivanov¹, A.V. Zaichenko², E.M. Khorolsky³, A.A. Kolesnikov⁴

^{1,2} Krasnodar Higher Military School. S. M. Shtemenko, Krasnodar, Russia
^{3,4} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
¹ sta399@yandex.ru, ² zaichenko.an@yandex.ru, ³ horolskii@mail.ru, ⁴ sergo1778@mail.ru

Abstract. *Background.* In the conditions of modern military conflicts, the problem of effective control of large groups of robots is actualized. The large amount of data associated with the operation of robotic systems (RC) determines the existence of restrictions on the effective management of groups of robots, the development, operation and creation of which requires large material costs. All this greatly actualizes the creation of technologies and ways to increase the survivability of the system, an important part of which is the assessment of the technical condition. *Materials and methods.* The introduction of technologies that allow to determine with high accuracy the state of both individual units and entire complexes of robots can significantly increase the speed and efficiency of dual-use RTC control, as well as increase the survivability of the system as a whole. The article discusses methods for assessing the state of dual-use robotic systems and the problems associated with them. *Results and conclusions.* This paper proposes an approach to determining the state of robotic systems using a three-level architecture of a database management system.

Keywords: state analysis, robotic systems, data processing, three-tier DBMS architecture, markov processes

For citation: Ivanov S.V., Zaichenko A.V., Khorolsky E.M., Kolesnikov A.A. Methodology for assessing the state of dual-use robotic complexes based on the use of a three-level architecture of a database management system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):46–54. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-1-6

Введение

В настоящее время идет стремительное развитие военной отрасли в области применения робототехнических комплексов. Одна из сложных задач, которую необходимо решать разработчикам, – оценка состояния РТК. Решением данной задачи может являться осуществление трехуровневой архитектуры программного обеспечения (ПО) РТК, которая позволяет устранить ряд недостатков классической системы оценки состояния на борту беспилотного аппарата (БЛА). Независимо от того, имеет ли оператор контроль над РТК или же РТК, действует в полностью автономном режиме вследствие применения средств РЭП противником, оценка состояния крайне необходима для функционирования всей системы управления и поэтому требует новых и эффективных подходов к выполнению данной функции.

Постановка задачи

Рассматриваемая задача сформулирована следующим образом.

Пусть имеется: РТК двойного назначения, техническое состояние которого необходимо оценить. Данный комплекс содержит на борту систему датчиков для сбора данных, позволяющих посредством анализа определить состояние J из всех состояний $W = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$. На основе этих данных оператор или искусственный интеллект (ИИ), его замещающий (при временном отсутствии управления), может сделать предположение о возможности выполнения боевой задачи, учитывая следующие показатели: $P_{\text{готов}}$ – коэффициент готовности РТК к выполнению боевой задачи; $P_{\text{бр}}$ – коэффициент боевой готовности; $P_{\text{мест}}$ – коэффициент влияния местности на видимость; $P_{\text{разв}}$ – коэффициент готовности средств разведки; $P_{\text{рес}}$ – коэффициент готовности топлива для выполнения задачи; $P_{\text{метео}}$ – влияние метеоусловий на выполнение боевой задачи.

Количество состояний согласно нормативной базе задается вектором ограничений $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, где n – число всех возможных технических состояний $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$.

Решение задачи

Совокупность данных, собираемых с датчиков, является базой данных (БД), которая ввиду своего объема и неоднородности не позволяет с достаточной оперативностью обрабатывать измерения, поступающие с датчиков [1]. В качестве решения этой проблемы предлагается алгоритм, реализующий трехуровневую архитектуру СУБД [1, 2]. Структурная схема такого решения представлена на рис. 1. Такая структура позволяет осуществлять обмен информацией между пунктом управления и РТК с достаточной эффективностью в различных условиях работы системы управления.

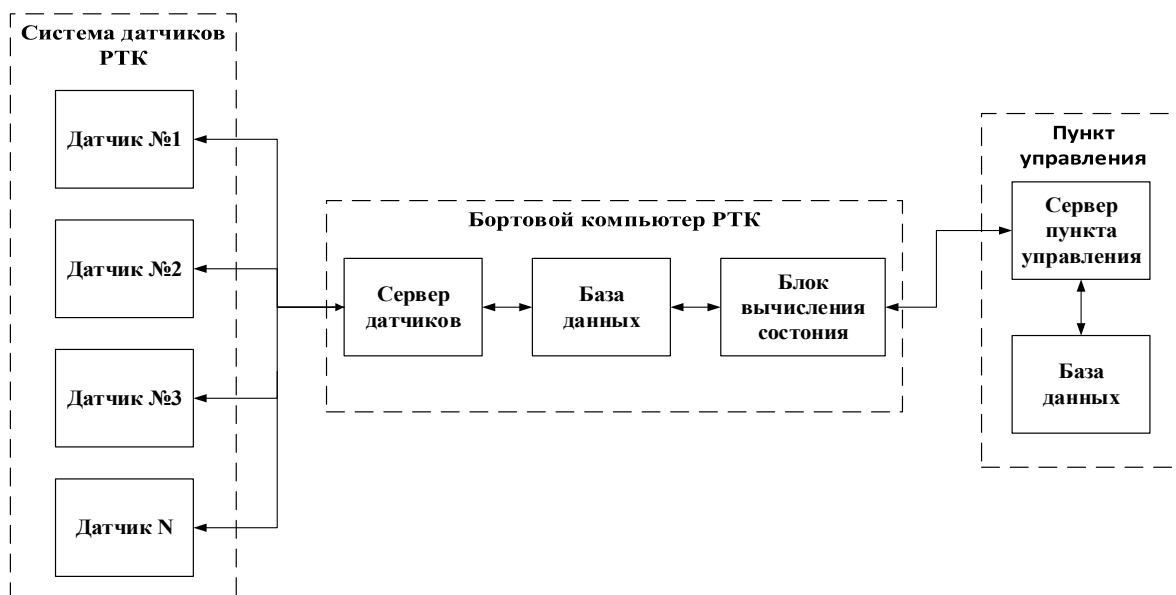


Рис. 1. Структурная схема трехуровневой архитектуры СУБД в РТК

Построение математической модели решения задачи. Для анализа состояний РТК удобно представить модель состояний РТК в виде графа (рис. 2).

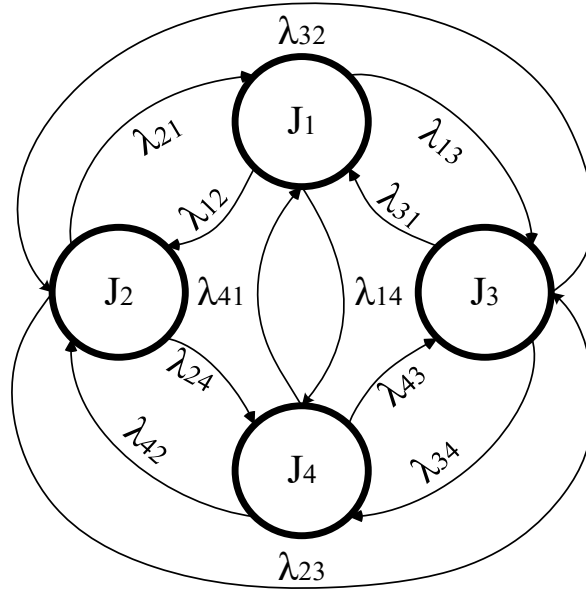


Рис. 2. Размеченный граф возможных состояний РТК: λ_i – плотность вероятности перехода между состояниями, вершины представляют собой различные состояния РТК: J_1 – «исправен», J_2 – «работоспособен», J_3 – «неработоспособен», J_4 – «неисправен»

Для определения состояния РТК в наглядном виде удобно представить числовые значения $P_{\text{готов}}$ в их словесном эквиваленте (табл. 1), для чего диапазонам значений $P_{\text{готов}}$ ставится в соответствие одно из возможных состояний РТК [3]. Для примера были взяты рассчитанные диапазоны состояния условного РТК.

Таблица 1

Зависимость состояния РТК от числового значения $P_{\text{готов}}$

Значение $P_{\text{готов}}$	[0 ; 0,3]	(0,3 ; 0,5]	(0,5 ; 0,75]	(0,75 ; 1,0]
Эквивалентное состояние	Неисправен	Неработоспособен	Работоспособен	Исправен

Обозначим через $P_i(t)$ вероятность того, что в момент времени t РТК будет находиться в одном из состояний $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$. Очевидно, что

$$\forall t: \sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \tag{1}$$

Предположим, что у данного РТК существуют предельные вероятности. Тогда в соответствии с рис. 2 построим систему дифференциальных уравнений (ДУ) Колмогорова:

$$\begin{cases} 0 = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{41}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{21} + \lambda_{23} + \lambda_{24})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{32}P_3(t) + \lambda_{42}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{34})P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{43}P_4(t), \\ 0 = -(\lambda_{41} + \lambda_{42} + \lambda_{43})P_4(t) + \lambda_{14}P_1(t) + \lambda_{24}P_2(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ 1 = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t). \end{cases} \tag{2}$$

Пусть значения интенсивностей отказа будут заданы постоянными (табл. 2).

Таблица 2

Числовые значения интенсивностей отказа λ_i

Интенсивность отказа	λ_{12}	λ_{21}	λ_{13}	λ_{31}	λ_{14}	λ_{41}	λ_{23}	λ_{32}	λ_{24}	λ_{42}	λ_{34}	λ_{43}
Числовое значение λ_i	100	20	30	5	30	40	70	10	25	60	50	15

В соответствии с выражением (2) и табл. 2 были рассчитаны вероятности состояния РТК от времени t в среде математического моделирования «Mathcad 15». Результат представлен в табл. 3.

Таблица 3

Расчет вероятности состояний РТК

Вероятность состояния	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P_3(t)$	$P_4(t)$
Значение $P_i(t)$	0,107	0,257	0,385	0,251

В соответствии с условием нормировки имеем

$$\sum_{i=1}^4 p_i(10) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t). \quad (4)$$

Подставив данные из табл. 3 в формулу (4), получим, что условие нормировки выполняется

$$\sum_{i=1}^4 p_i(10) = 0,107 + 0,257 + 0,385 + 0,251 = 1. \quad (5)$$

График зависимости вероятности состояния РТК от времени для заданных в табл. 3 значений интенсивности отказа представлен на рис. 3.

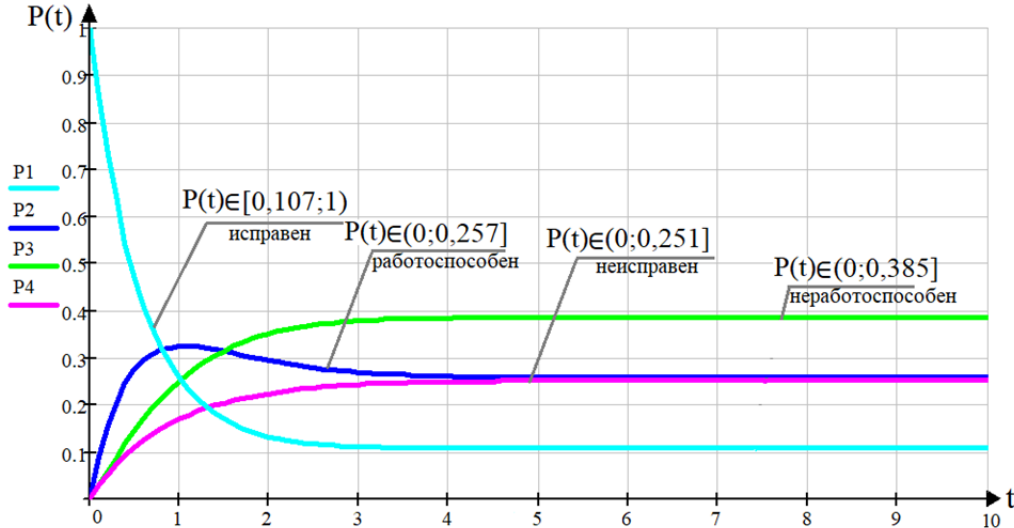


Рис. 3. Вероятностно-временные характеристики возможных состояний РТК

Для построения графика, представленного на рис. 3, была использована среда математического моделирования «Mathcad 15». На интервале времени $[0; 3]$ система оценки состояния РТК находится в стадии переходной работы, затем вероятности перехода достигают финальных состояний и не зависят от времени t , что дает возможность корректировать возможности комплекса, оказывая воздействие на отдельные характеристики РТК [1, 2].

Коэффициент боевой готовности к выполнению задачи можно получить исходя из потребности к текущему наличию боеприпасов:

$$P_{гр} = \frac{S}{P}, \quad (6)$$

где S – ресурс ракет и боеприпасов, рассчитываемый по формуле $S = w + W$, w – наличие на начало боевых действий, W – планируемое поступление; P – потребность в боеприпасах, рассчитываемая по формуле $P = w + V$, V – объем поступления.

Коэффициент видимости будет иметь следующие значения [4, 5] (табл. 4).

Таблица 4

Коэффициенты видимости для различных типов местности

Тип местности	Рельеф	Относит. превышение высот (м)	$P_{\text{местн}}$
открытая	равнинная	До 25	0,75
полузакрытая	холмистая	25–200	0,5
закрытая	холм. горная	200–1000	0,25

Коэффициент готовности средств разведки вычисляется по следующей формуле [6]:

$$P_{\text{разв}} = \frac{LT}{AT}, \quad (7)$$

где LT – дальность разведки, применяемой разведывательными средствами РТК в данных условиях видимости; AT – максимальная дальность разведки, возможная с помощью технических средств.

Коэффициент готовности топлива для прохождения выполнения задачи передвижения можно вычислить по следующей формуле [7, 8]:

$$P_{\text{рес}} = \frac{S_{\text{пути}}}{S_{\text{всего}}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{пути}}$ – путь, который может преодолеть РТК исходя из расчетов топлива;

$$S_{\text{пути}} = U \cdot T_{\text{полета}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{пути}}$ – путь, который необходимо преодолеть; U – скорость полета беспилотного аппарата; $T_{\text{полета}}$ – время, необходимое на прохождение всего пути.

Максимальное время нахождения БЛА в воздухе:

$$T_{\text{полета}} = \frac{V_{\text{топлива}}}{Q_{\text{топлива}}}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{топлива}}$ – расход топлива (литров/час); $V_{\text{топлива}}$ – объем топлива в баке.

При этом стоит учитывать возможность преодоления расстояния:

$$P_{\text{рес}_i} = f(x_i) = \begin{cases} P_{\text{рес}_{i0}}, & x_i < 1, \\ P_{\text{рес}_{i1}}, & x_i \geq 1, \end{cases} \quad (11)$$

где $P_{\text{рес}_{i0}}$ – состояние, когда РТК неспособен преодолеть расстояние [7], необходимое для выполнения боевой задачи; $P_{\text{рес}_{i1}}$ – состояние, когда РТК способен преодолеть расстояние, необходимое для выполнения боевой задачи.

Коэффициенты влияния метеоусловий на РТК представлены в табл. 5 [4, 5].

Таблица 5

Коэффициенты влияния метеоусловий на проходимость

Рельеф местности	При нормальных погодных условиях	В дождь, снег, распутицу
2	3	4
Равнинная	1,0	0,7
Открытая	0,9	0,63
Полузакрытая	0,8	0,56
Холмистая	0,7	0,49
Холмисто-горная	0,5	0,35
Горная	0,3	0,15

Совокупность всех этих факторов оказывает сильное влияние на возможности РТК, т.е. на коэффициент готовности РТК к выполнению задачи:

$$P_{\text{готовн}} = P_{\text{бг}} \cdot P_{\text{разв}} \cdot P_{\text{местн}} \cdot P_{\text{рес}} \cdot P_{\text{метео}}. \quad (12)$$

Оценка эффективности разработанной методики

Пусть необходимо оценить состояние РТК, для чего сначала нужно рассчитать все составные коэффициенты $P_{\text{готовн}}$ равенства (12). В качестве исходных данных для расчета составных коэффициентов используются пять различных наборов параметров $\{N_1, N_2, \dots, N_i\}$ одного РТК [7, 9]. Указанные данные представлены в табл. 6.

Таблица 6

Исходные наборы параметров РТК

N_i / параметр	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
w (%)	100	100	100	100	100
W (%)	20	20	20	20	20
V (%)	30	30	30	30	30
LT (м)	180	180	180	180	180
AT (м)	200	200	200	200	200
$S_{\text{всего}}$ (км)	200	200	200	200	200
U (км/ч)	70	70	70	70	70
$V_{\text{топлива}}$ (л)	9	10	11	12	13
$Q_{\text{топлива}}$ (л/ч)	5	5	5	5	5
Погода	норма	норма	норма	норма	норма
Высота (м)	175	175	175	175	175
Тип местности	закрытая	полузакр.	полузакр.	открытая	открытая
Рельеф местности	горная	холмистая	холмистая	откр.	равнина
Коэфф. видимости	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75
$T_{\text{полета}}$ (ч)	1,8	2	2,2	2,4	2,6

На основе этих данных были рассчитаны коэффициенты в соответствии с формулами (6)–(12), а также данными из табл. 4–6. Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет коэффициентов по заданным наборам параметров

N_i / коэффициент	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$P_{\text{бг}}$	0,9230769	0,9230769	0,9230769	0,9230769	0,9230769
$P_{\text{разв}}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
$P_{\text{местн}}$	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75
$P_{\text{рес}}$	0,63	0,7	0,77	0,84	0,91
$P_{\text{метео}}$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$P_{\text{готовн}}$	0,091592308	0,203538462	0,223892308	0,366369231	0,3969

На основе данных из табл. 7 были построены графики зависимости коэффициента готовности РТК, представленные на рис. 4.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4 позволяет сделать следующие выводы. Повышение значений отдельных параметров БЛА отражается на коэффициенте готовности $P_{\text{готовн}}$, что в свою очередь положительно сказывается на управлении РТК, позволяя своевременно и точно анализировать техническое состояние РТК с БЛА [9].

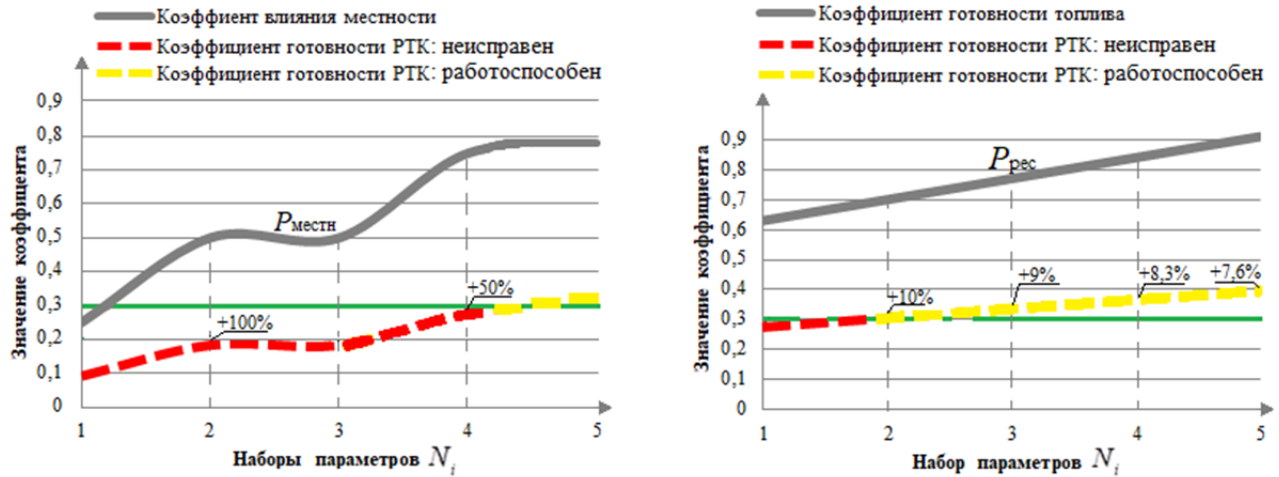


Рис. 4. Результаты влияния входных данных на коэффициент готовности РТК

Заключение

Из проведенного анализа результатов следует отметить, что диапазон значений $P_{готов}$ для различных состояний может отличаться в зависимости от множества условий и является уникальным для каждого отдельного типа РТК. Данные из табл. 5, 6 можно разделить на три различных ситуации:

1. $P_{местн}$ находится в значении 0,25, тогда при любых значениях исходных параметров РТК будет оценен как «неисправен» ($P_{готов} < 0,3$), что не в полной мере будет отражать действительную обстановку в наборах данных N_1, N_2 .

2. В наборе данных N_3 коэффициент влияния местности имеет значение, равное 0,5. Соответственно, значение 0,223892308 недостаточно для достижения технического состояния «работоспособен».

3. В случае данных из наборов N_4, N_5 видно, что повышение $P_{местн}$ до значения 0,75 привело к повышению значения $P_{готов}$ (0,366369231 – 0,3969) и переходу РТК в техническое состояние «не-работоспособен».

Предложенный в статье метод оценки состояния РТК является универсальным и позволяет РТК успешно диагностировать свое техническое состояние в различных условиях, а использование трехуровневой архитектуры ПО в РТК позволит эффективнее использовать ресурсы управления беспилотными аппаратами в ходе выполнения поставленных задач.

Список литературы

1. Иванов С. В., Петрова О. В., Запороженко М. Р. [и др.]. Методика оценки оперативности процесса сбора и обработки информации в ходе выполнения полетного задания группой беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 64–73.
2. Иванов С. В., Хорольский Е. М. Обработка информационных потоков в мультиагентных робототехнических комплексах в условиях решения разноплановых задач // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 2. С. 116–124.
3. Ушаков И. А. Оптимальные задачи. М., 1968. 292 с.
4. Гулевич С. П. Обеспечение безаварийного применения беспилотных летательных аппаратов в условиях горного рельефа местности // Проблемы безопасности полетов. 2003. № 9. С. 20–26.
5. Воробьев И. Н. Тактика – искусство боя : учебник. М., 2002. 863 с.
6. Меньшаков Ю. К. Виды и средства иностранных технических разведок. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 655 с.
7. Гулевич С. П., Исаев С. А. Методика определения гарантийного технического запаса топлива и практической дальности полета беспилотного летательного аппарата // Проблемы безопасности полетов. 2000. № 5. С. 14–21.
8. Гулевич С. П., Александровский Б. В. Обеспечение безаварийного применения беспилотного летательного аппарата по топливу при выполнении полетов в условиях холмистой местности // Проблемы безопасности полетов. 2001. № 7. С. 13–17.

9. Петрова О. В., Иванов С. В., Королев И. Д., Белоножко Д. Г. Математическая модель оценки вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в условиях неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15, № 3. С. 7–15.

References

1. Ivanov S.V., Petrova O.V., Zaporozhchenko M.R. [et al.]. Methodology for assessing the efficiency of the process of collecting and processing information during the performance of a flight task by a group of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):64–73. (In Russ.)
2. Ivanov S.V., Khorol'skiy E.M. Processing of information flows in multi-agent robotics complexes in conditions of solving diverse tasks. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii = Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 2020;(2):116–124. (In Russ.)
3. Ushakov I.A. *Optimal'nye zadachi = Optimal problems*. Moscow, 1968:292. (In Russ.)
4. Gulevich S.P. Ensuring trouble-free use of unmanned aerial vehicles in conditions of mountainous terrain. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2003;(9):20–26. (In Russ.)
5. Vorob'ev I.N. *Taktika – iskusstvo boya: uchebnyk = Tactics – the art of combat : textbook*. Moscow, 2002:863. (In Russ.)
6. Men'shakov Yu.K. *Vidy i sredstva inostrannykh tekhnicheskikh razvedok = Types and means of foreign technical intelligence*. Moscow: MG TU im. N. E. Bauman, 2009:655. (In Russ.)
7. Gulevich S.P., Isaev S.A. Methodology for determining the guaranteed technical fuel reserve and practical flight range of an unmanned aerial vehicle. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2000;(5):14–21. (In Russ.)
8. Gulevich S.P., Aleksandrovskiy B.V. Ensuring trouble-free use of an unmanned aerial vehicle for fuel when performing flights in hilly terrain. *Problemy bezopasnosti poletov = Problems of flight safety*. 2001;(7):13–17. (In Russ.)
9. Petrova O.V., Ivanov S.V., Korolev I.D., Belonozhko D.G. A mathematical model for estimating the probability of trouble-free operation of an information processing system of a multi-agent robotic complex under uncertainty. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2019;15(3):7–15. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Станислав Валерьевич Иванов

кандидат технических наук, доцент,
старший преподаватель,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: sta399@yandex.ru

Антон Вадимович Зайченко

курсант,
Краснодарское высшее военное училище
имени генерала армии С. М. Штеменко
(Россия, г. Краснодар, ул. Красина, 4)
E-mail: zaichenko.an@yandex.ru

Евгений Михайлович Хорольский

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры автоматизации
производственных процессов,
Донской государственный технический университет
(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
E-mail: horolskii@mail.ru

Stanislav V. Ivanov

Candidate of technical sciences,
associate professor, senior lecturer,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Anton V. Zaichenko

Cadet,
Krasnodar Higher Military School
named after Army General S. M. Shtemenko
(4 Krasina street, Krasnodar, Russia)

Evgeny M. Khorolsky

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of automation of production processes,
Don State Technical University
(1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Антон Александрович Колесников

магистрант,

Донской государственной технической университет

(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

E-mail: sergo1778@mail.ru

Anton A. Kolesnikov

Master degree student,

Don State Technical University

(1 Gagarin square, Rostov-on-Don, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 09.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.12.2021

Принята к публикации/Accepted 16.01.2022