

Мартirosян Александр Витальевич – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +78123288566; к.т.н.; доцент кафедры системного анализа и управления.

Ромашин Даниил Васильевич – Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; e-mail: Daniil.V-Romashin@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79620194779; аспирант кафедры системного анализа управления.

Martirosyan Alexander Vitalevich – Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II; e-mail: Martirosyan_AV@pers.spmi.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +78123288566; cand. of eng. sc.; associate professor of the Department of System Analysis and Management.

Romashin Daniil Vasilyevich – Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II; e-mail: Romashin@yandex.ru; e-mail: Romashin@yandex.ru; Saint Petersburg; Russia; phone: +79620194779; postgraduate student of the Department of System Analysis and Management.

УДК 519.21

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-249-259

В.Х. Пшихопов, А.Л. Веревкин, А.Р. Гайдук, Л.С. Веревкина

МАТРИЧНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РЕКОФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ

Представлены разработанные матричный метод одновременной оценки надёжности нескольких вариантов сложных мультиагентных реконфигурируемых систем, а также стадийный метод резервирования агентов, отличающиеся от известных простотой и широкой областью применения. Матричный метод оценки надёжности заключается в матричном отображении параметров надёжности всех агентов конкретного вариантов группы агентов системы и векторном представлении условий выполнения миссии. Предполагается, что надёжность выполнения миссии целевой группой агентов определяется только надёжностью самих агентов и характером их резервирования. Метод стадийного резервирования отличается тем, что традиционные типовые схемы резервирования используются как стадии процесса резервирования группы агентов, что позволяет существенно повысить надёжность вариантов системы. Агенты системы делятся на активных, непосредственно выполняющих текущую миссию, и пассивных, находящихся в режиме ожидания активации. Активные агенты, в свою очередь, подразделяются на основные и резервные, причём основные агенты начинают выполнение миссии, а резервные агенты, ожидая замены отказавших активных агентов, могут быть как в состоянии горячего резерва, так и в состоянии холодного резерва. Специфические условия выполнения миссии учитываются вектором поправочных коэффициентов, что существенно повышает точность оценки надёжности и прогноза времени безотказной работы группы агентов. Матричный метод оценки надёжности позволяет определить расчётную надёжность всех возможных вариантов системы и найти целесообразный вариант, который имеет требуемые параметры надёжности для выполнения данной миссии в конкретных условиях. Метод стадийного резервирования позволяет существенно повысить надёжность вариантов системы, по сравнению с традиционными методами резервирования, что значительно расширяет область применения сложных мультиагентных реконфигурируемых систем. Важной особенностью предложенных методов оценки и прогнозирования надёжности является их аналитический характер, что позволяет использовать при решении задач обеспечения требуемой надёжности выполнения миссий сложными мультиагентными системами современные быстродействующие вычислительные средства.

Сложная мультиагентная система; реконфигурация; надёжность, матричный метод; поправочный коэффициент; стадийное резервирование.

V.Kh. Pshikhopov, A.L. Verevkin, A.R. Gaiduk, L.S. Verevkina

MATRIX METHOD FOR SIMULTANEOUS RELIABILITY ASSESSMENT OF COMPLEX MULTI-AGENT RECONFIGURABLE SYSTEMS

The article presents the developed matrix method of simultaneous assessment of the reliability of several variants of complex multi-agent reconfigurable systems, as well as the staged method of reservation, which differ from the known ones in their simplicity and wide scope of application. The matrix reli-

bility assessment method consists in a matrix display of the reliability parameters of all agents of a specific variant of a group of system agents and a vector representation of the mission conditions. It is assumed that the mission reliability of a target group of agents is determined solely by the reliability of the agents themselves and the nature of their redundancy. The staged redundancy method is distinguished by its use of traditional standard redundancy schemes as stages in the process of redundant agent groups, significantly increasing the reliability of system variants. System agents are divided into active agents, directly performing the current mission, and passive agents, awaiting activation. Active agents, in turn, are divided into primary and backup agents. Primary agents initiate mission execution, while backup agents, awaiting replacement of failed active agents, can be in either an active state (hot standby) or a cold standby state. Specific mission conditions are taken into account by a vector of correction factors, significantly improving the accuracy of reliability assessment and agent group uptime prediction. An important feature of the proposed methods for assessing and predicting reliability is their analytical nature, which allows the use of modern high-speed computing tools in solving problems of ensuring the required reliability of missions performed by complex multi-agent systems.

Complex multiagent system; reconfiguration; reliability; matrix method; correction factor; staged redundancy.

Введение. В настоящее время всё более широкое применение находят сложные мультиагентные реконфигурируемые системы (СМАРС) с агентами различных типов: беспилотными авиационными системами (БАС), роботизированными колесными платформами (РКП), автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА). Для успешного выполнения своих миссий СМАРС, используют GPS, Глонас, современные системы связи и искусственный интеллект [1–5]. Так в 2025 году в Китае была продемонстрирована скоординированная работа 15947 дронов, стартовавших с наземной площадки (рис. 1, слева) с целью создания светового шоу (рис. 1, справа). Управление дронами осуществлялось с единого компьютера в городе Люяне [5]. Эта СМАРС успешно выполнила требования регистрации в книге рекордов Гиннеса, согласно которым дроны должны были одновременно подняться в воздух и оставаться в полете не менее одной минуты.



Рис. 1. Световое шоу дронов в Китае

По данным мировой печати к 2033 году мировой рынок агродронов, управляемых искусственным интеллектом, покажет четырехкратный рост и достигнет 14 миллиардов долларов [6]. Эти дроны будут способны выполнять широкий спектр задач, от посева и мониторинга состояния посевов до обрезки деревьев и аккуратного сбора отдельных фруктов, таких как яблоки, персики, сливы и айва, без нанесения им повреждений [7].

Использование таких сложных мультиагентных систем ставит необходимость разработки новых методов оценки времени их бесперебойной работы и обеспечения требуемой продолжительности миссии. Трудность заключается в том, что СМАРС, могут формировать большое число возможных вариантов групп своих агентов. Оценка показателей надёжности каждой из них с использованием разных традиционных методов [8–12] требует существенных временных и вычислительных затрат.

Постановка задачи оценки надёжности. Как и в других работах, в статье принято, что закон распределения является экспоненциальным, надёжность каждого μ -го агента A_μ определяется его интенсивностью отказов λ_μ , наработкой на отказ T_μ и вероятностью безотказной работы $p_\mu(t)$. Эти показатели оцениваются с помощью статистических методов на основе данных, полученных в ходе испытаний [13, 14].

В случае экспоненциального закона распределения интенсивность отказов каждого агента в нормальном режиме обычно принимается постоянной, т.е. $\lambda_\mu = \text{const}$, поэтому вероятность его безотказной работы определяется выражением

$$p_\mu(t) = e^{-\lambda_\mu t}, \quad (1)$$

а средняя наработка на отказ:

$$T_\mu = 1/\lambda_\mu. \quad (2)$$

Экспоненциальный закон распределения типичен для ситуации, когда множество компонентов или устройств функционируют в штатном режиме. Это характерно для радиоэлектронных и мехатронных компонентов и устройств, в частности, робототехнических систем [15].

Ввиду того, что рабочие условия агентов в рамках миссий, как правило, отличаются от условий тестовых статистических испытаний на надёжность, каждый агент характеризуется индивидуальным поправочным коэффициентом интенсивности отказов (ПКИО) k_μ , который также может учитывать специальные условия функционирования и рассчитываться по различным формулам, как показано в работах [13–15]. Этим коэффициентом определяются: условная интенсивность отказов $\lambda_{\mu y}$, условная наработка на отказ $T_{\mu y}$ и соответствующая вероятность безотказной работы $p_\mu(t)$ μ -го агента по формулам:

$$\lambda_{\mu y} = \lambda_\mu k_\mu, \quad T_{\mu y} = \frac{1}{\lambda_{\mu y}} = \frac{T_\mu}{k_\mu}, \quad p_\mu(t) = e^{-\lambda_{\mu y} t}. \quad (3)$$

Отметим, что условная наработка на отказ $T_{\mu y}$ – представляет собой ожидаемый период функционирования агента, по истечении которого условная вероятность его безотказной работы снижается до значения $e^{-1} \approx 0,368$. Однако, в реальных условиях эксплуатации, как правило, требуются более высокие значения этого параметра, варьирующиеся от 0,7 до 0,95 и выше.

В результате реконфигурации мультиагентной системы образуется некоторое подмножество, группа агентов, называемых вариантами этой системы, ориентированных на выполнение миссии, поставленной перед этой системой. Во многих случаях рассматриваемые СМАРС могут выполнить некоторую миссию, используя не все агенты, входящие в их состав. При расчёте надёжности вариантов СМАРС, как и в случаях технических систем [14–19], в зависимости от характера взаимосвязей между их компонентами, применяются различные схемы расчёта надёжности вариантов. На рис. 2 изображена последовательная схема оценки надёжности системы без резервирования, состоящей из n агентов A_μ , $\mu = \overline{1, n}$.

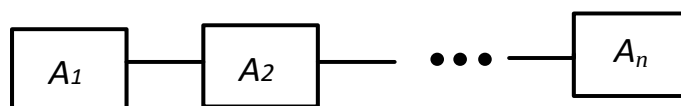


Рис. 2. Последовательная схема оценки надёжности

Здесь предполагается, что отказ любого агента влечёт невозможность выполнения системой своей функции. В этом случае, для вычисления характеристик надёжности системы применяются следующие выражения [14, 15]:

$$\Lambda_C = \sum_{\mu=1}^n \lambda_{\mu}, \quad \Lambda_{CY} = \sum_{\mu=1}^n \lambda_{\mu} k_{\mu}, \quad (4)$$

$$T_{CY} = 1 / \Lambda_{CY}, \quad p_C(t) = e^{-\Lambda_{CY} t} = \exp(-t / T_{CY}), \quad (5)$$

где Λ_C – интенсивность отказов, Λ_{CY} , T_{CY} – условные интенсивность отказов и наработка на отказ; $p_C(t)$ – вероятность безотказной работы системы – группы агентов (рис. 2); время t задаётся в интервале $0 \leq t \leq t_{\max}$, $t_{\max}$ – предполагаемое время работы группы в часах.

Выражения для определения Λ_{CY} , T_{CY} при других схемах расчета надёжности и учёта резервирования агентов приводятся в работах [14, 20, 21].

Матричный метод оперативной оценки надёжности вариантов СМАРС. Одновременная оценка условных интенсивностей отказов потенциальных вариантов СМАРС без резервирования, вычисляется по следующей формуле:

$$\Lambda_{CY} = A_{CI} K_{CI}, \quad (6)$$

где $A_{CI} = [a_{ij}]$ – $m \times n$ -матрица интенсивностей; $K_{CI} = [k_j]$ – n -вектор-столбец ПКМО активных агентов i -го варианта. Элементы A_{CI} и K_{CI} определяются выражениями:

$$a_{ij} = \begin{cases} \lambda_{\mu}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}; \\ 0, i = \overline{1, m-1}; j = \overline{i+1, n}, \end{cases} \quad (7)$$

$$k_j = k_{\mu}, \mu = j, j = \overline{1, n}, \quad (8)$$

$$m = N_C - N_1 + 1, \quad n = N_C. \quad (9)$$

В (7)–(9) $\Lambda_{CY}^T = [\Lambda_{CYi}]$, $i = \overline{1, m}$ – вектор интенсивностей отказов возможных вариантов рассматриваемой СМАРС, т.е. $\Lambda_{CY}^T = [\Lambda_{CY1} \Lambda_{CY2} \dots \Lambda_{CYm}]$; i – номер варианта СМАРС; j – номера активных агентов i -го варианта; m – число потенциальных вариантов; N_C – общее число агентов СМАРС; N_1 – число агентов её 1-го варианта;

Интенсивность Λ_{CYi} отказов i -го варианта СМАРС и число его агентов N_i , определяются выражениями:

$$\Lambda_{CYi} = A_{CIi} K_{CI}, \quad N_i = N_1 + i - 1, \quad i = \overline{1, m}, \quad (10)$$

где A_{CIi} – i -я строка матрицы A_{CI} .

Вектор условных времён наработки на отказ вариантов СМАРС:

$$T_{CY} = [1 / \Lambda_{CY1} \quad 1 / \Lambda_{CY2} \quad \dots \quad 1 / \Lambda_{CYm}]^T. \quad (11)$$

Так как СМАРС, в общем случае, может выполнить поставленную миссию с некоторой вероятностью при использовании не всех её агентов, то возникает вопрос о выборе наиболее подходящей конфигурации для успешного выполнения конкретной миссии. Согласно техническим требованиям, для того чтобы СМАРС могла гарантированно достичь цели, необходимо выполнение следующих условий:

$$p_C(t) \geq p_{TP}, \quad 0 \leq t \leq T_{TP}, \quad (12)$$

где p_{TP} – требуемое значение вероятности безотказной работы варианта СМАРС в течение требуемого времени T_{TP} . Значения p_{TP} и T_{TP} – требуемые показатели надежности выполнения конкретной миссии.

Вариант системы, показатели надёжности которого удовлетворяют условиям (12), принимается целесообразным для выполнения миссии с заданными значениями p_{TP} и T_{TP} .

Из выражений (11) и (12) следует, что если имеется m вариантов некоторой СМАРС, каждый из которых характеризуется значением групповой наработки на отказ:

$$t_{pTi} = T_{Cyi} \ln(1/p_{TP}), \quad i = \overline{1, m}, \quad (13)$$

и выполнено условие:

$$t_{pTmax} \geq T_{TP}, \quad (14)$$

где $t_{pTmax} = (\max_{i \in [1, m]} T_{Cyi}) \ln(1/p_{TP})$, то целесообразный вариант этой СМАРС для выполнения миссии, с требуемыми значениями p_{TP} и T_{TP} удобно находить на основе выражения:

$$t_{pT, i^*-1} < T_{TP} \leq t_{pT, i^*}, \quad i^* \in [1, m] \quad (15)$$

где i^* – номер целесообразного варианта, t_{pT, i^*} – групповая наработка на отказ этого варианта.

Таким образом, ключевым моментом является определение такого набора агентов (целесообразного варианта) данной СМАРС, который обладает вероятностью выполнения поставленной конкретной миссии не хуже требуемого значения p_{TP} по истечении интервала времени T_{TP} с момента начала выполнения этой миссии. Выражения (6)–(15) позволяют решить эту задачу аналитически.

Алгоритм выбора целесообразного варианта СМАРС. На основе этих выражений разработан алгоритм выбора целесообразного варианта некоторой СМАРС для выполнения миссии с заданными значениями p_{TP} и T_{TP} . Блок-схема этого алгоритма приведена на рис. 3.

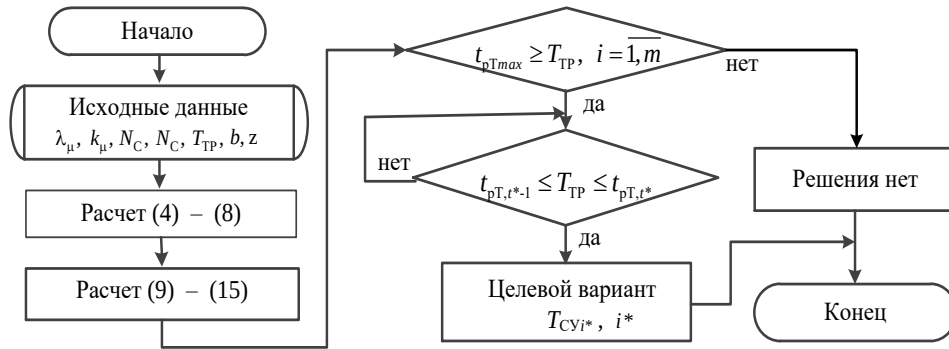


Рис. 3. Алгоритм выбора целесообразного варианта СМАРС

Матричный метод оценки надежности. Рассмотрим применение матричного метода для определения возможности применения без резервирования СМАРС, агентами которой являются один пульт и пять роботизированных колёсных платформ (РКП) (рис. 4) для выполнения миссии с требуемыми значениями вероятности безотказной работы не менее $p_{TP} = 0,85$ в течении $T_{TP} = 600$ часов.

Исходные данные: $\lambda_{\Pi} = 80 \cdot 10^{-6}$ 1/час – интенсивность отказов пульта управления; интенсивность отказов каждой РКП: $\lambda_{\text{ркп1}} = 400 \cdot 10^{-6}$ 1/час; $\lambda_{\text{ркп2}} = 500 \cdot 10^{-6}$ 1/час; $\lambda_{\text{ркп3}} = 450 \cdot 10^{-6}$ 1/час; $\lambda_{\text{ркп4}} = 550 \cdot 10^{-6}$ 1/час; $\lambda_{\text{ркп5}} = 300 \cdot 10^{-6}$ 1/час; $k_{\Pi} = 1,00$ – ПКИО пульта; и ПКИО РКП: $k_{\text{ркп},1} = 1,0$; $k_{\text{ркп},2} = 1,1$; $k_{\text{ркп},3} = 1,2$; $k_{\text{ркп},4} = 1,1$; $k_{\text{ркп},5} = 1,3$.

На основе соотношений (6)–(12) разработанного матричного метода и алгоритма выполнено имитационное моделирование оценки надёжности вомплекса с возможностью изменения состава агентов РКП от одной до пяти.



Рис. 4. СМАРС с пультом и пятью РКП

Принимая во внимание обязательное включение пульта управления во всех рассматриваемых вариантах, получаем значения параметров: $N_1 = 2$; $m = 5$; $n = 6$; тогда $A_{\text{СИ}}$ – матрица 5×6 ; $K_{\text{СИ}}$ – вектор с 6 элементами. Подставив численные значения в (7), (8) и (6) получим:

$$A_{\text{СИ}} = 10^{-6} \begin{bmatrix} 80 & 400 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 80 & 400 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 80 & 400 & 500 & 450 & 0 & 0 \\ 80 & 400 & 500 & 450 & 550 & 0 \\ 80 & 400 & 500 & 450 & 550 & 300 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,0 \\ 1,0 \\ 1,1 \\ 1,2 \\ 1,1 \\ 1,3 \end{bmatrix} = 10^{-6} \begin{bmatrix} 480 \\ 1030 \\ 1570 \\ 2175 \\ 2565 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Условная наработка на отказ каждого варианта данной СМАРС на основе результатов (16) определяется по формуле (11):

$$T_{\text{СУ}} = [2083 \quad 971 \quad 637 \quad 460 \quad 390]^T, \text{ час.} \quad (17)$$

При $p_{\text{ТР}} = 0,85$ по формуле (13) с учётом (17) находим: $t_{pT_{\text{max}}} = 338$, т.е. в данном случае условие (14) не выполняется ни при каком значении $i \in [1, 5]$, так как $T_{\text{ТР}} = 600$ часов.

Отсюда следует, что данная СМАРС без резервирования не может применяться для выполнения поставленной миссии из-за недостаточной надёжности. Что подтверждается графиками вероятности безотказной работы рассмотренных вариантов СМАРС приведенными на рис. 5. Следовательно, ни один из возможных вариантов рассматриваемой СМАРС не удовлетворяет условиям (12)–(15), и применить без резервирования рассматриваемую СМАРС, для выполнения поставленной миссии невозможно из-за низкой надёжности.

Для повышения надёжности чаще всего используется резервирование [9, 10].

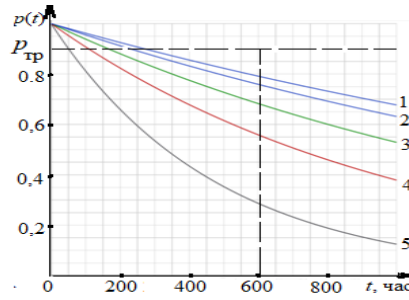


Рис. 5. Графики вероятности безотказной работы вариантов СМАРС

Метод стадийного резервирования агентов. Рассмотрим новый метод стадийного резервирования агентов, вытекающий из матричного метода расчёта надёжности. Метод стадийного резервирования заключается использовании традиционных типовых схем резервирования, как стадий процесса резервирования с целью существенного повышения надёжности технических систем.

Как отмечалось выше, в схемах расчёта надёжности СМАРС с резервированием выделяются основные и резервные агенты. Число основных агентов обозначается b , а число резервных – z . Таким образом, общее число агентов в СМАРС $N_C = b + z$ или больше.

В случае стадийного резервирования расчёт надёжности выполняется также матричным методом, но с некоторыми изменениями, так как матрица параметров агентов и вектор ПКМО определяются в этом случае по наработке на отказ T_μ или $T_{\mu\mu}$ агентов. При этом элементы вектора поправочных коэффициентов K_{CT} равны обратным значениям коэффициентов k_μ или единице. Нарботка на отказ определяется по аналогичной выражению (6) формуле:

$$T_{CY} = A_{CT} K_{CT}. \quad (18)$$

Элементы $m \times n$ -матрицы A_{CT} и n -вектора K_{CT} определяются по формулам, зависящим от схемы резервирования.

В качестве примера эффективности стадийного резервирования реконфигурируемой СМАРС, по сравнению с вариантом непосредственного использования всех агентов, рассчитаем надёжность рассмотренной выше СМАРС (рис. 4), когда пульт и первая РКП являются основными, а остальные четыре РКП – резервными. Это соответствует случаю избыточного холодного стадийного резервирования при $b = 2$ и $z = 4$. В этом случае: $N_C = 6$, $N_1 = 2$, $m = z = 4$, $n = z + 1 = 5$ [10, 11]. Элементы матрицы A_{CT} и вектора K_{CT} определяются выражениями:

$$a_{ij} = \begin{cases} T_{n1}, & i = \overline{1, m}; j = 1; \\ T_j, & i = \overline{1, m}; j = \overline{2, 5}; \\ 0, & i = \overline{1, m-1}; j = i + 2, n; \end{cases} \quad (19)$$

$$K_{CT}^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1], \quad (20)$$

$$T_{n1} = \frac{1}{\lambda_\Pi k_\Pi + \lambda_{РКП1} k_{РКП1}}, \quad T_j = \frac{1}{\lambda_\Pi k_\Pi + \lambda_{РКПj} k_{РКПj}}, \quad j = \overline{2, 5}, \quad (21)$$

где T_{n1} – наработка на отказ пульта и первой РКП (определена в выражении (17)); T_j – наработка на отказ пульта и j -ой резервной РКП.

Схема реализации рассматриваемой реконфигурируемой системы показана на рис. 5. На рис. 6 символами П и РКП обозначены те же, что и на рис. 4 пульт управления и роботизированная колёсная платформа. В горизонтальных строчках этого рисунка показаны только три варианта: 1в, 2в и 3в (для краткости), а вертикальные столбцы соответствуют стадиям резервирования: 1с, 2с, 3с и 4с.

	1с	2с	3с	4с
1в	— П — РКП1	— П — РКП2	—	—
2в	— П — РКП1	— П — РКП2	— П — РКП3	—
3в	— П — РКП1	— П — РКП2	— П — РКП3	— П — РКП4

Рис. 6. Варианты и стадии холодного резервирования

Элементы первого варианта на рис. 6 являются традиционной схемой холодного резервирования. Как видно, в последующих вариантах эта схема повторяется на каждой стадии. В этом и заключается стадийный метод резервирования, который может применяться не только при избыточном холодном резервировании, но и при других традиционных способах резервирования.

В данном случае, подставляя в формулу (21) приведённые выше значения параметров надёжности пульта и РКП, найдём значения $T_{п1}$ и T_j , $j = 2, 5$, а затем по (19) определяем значения a_{ij} , подставляя которые с учётом (20) в формулу (18), получим:

$$T_{cy} = \begin{bmatrix} 2083 & 1587 & 0 & 0 & 0 \\ 2083 & 1587 & 1613 & 0 & 0 \\ 2083 & 1587 & 1613 & 1460 & 0 \\ 2083 & 1587 & 1613 & 1460 & 2128 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3670 \\ 5283 \\ 6743 \\ 8871 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

На основе результатов (22) вектор групповой наработки на отказ вариантов рассматриваемой СМАРС при холодном стадийном резервировании и требуемой вероятности безотказной работы $p_{Tr} = 0,875$ имеет вид:

$$t_{pT} = [490 \quad 705 \quad 900 \quad 1184], \text{ час.} \quad (23)$$

Так как $T_{Tr} = 600$ час, а $t_{pT, \max} = 1184$ часов, то условие (14) выполняется и из неравенства (15) следует, что целесообразным вариантом при стадийном холодном резервировании для выполнения поставленной миссии является второй вариант, то есть $i^* = 2$. Как видно из схемы на рис. 5, этот вариант включает 4 агента, т.е. пульт и три РКП: РКП1, РКП2 и РКП3.

Корректность полученного результата подтверждается графиками, приведёнными на рис. 7.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что резервирование агентов является более эффективным методом повышения надёжности по сравнению с простым увеличением агентов в формируемых группах агентов.

Таким образом, используя рассмотренные выше методы, можно осуществить расчёт параметров надёжности других СМАРС, и осуществить определение целесообразного варианта для выполнения поставленных перед ними миссий. Для этого должны быть заданы указанные выше параметры надёжности агентов этих систем. Подчеркнём, что

предложенные в работе методы позволяют обоснованно найти не только целесообразный вариант группы агентов для выполнения поставленной миссии, но и схему резервирования агентов этой группы.

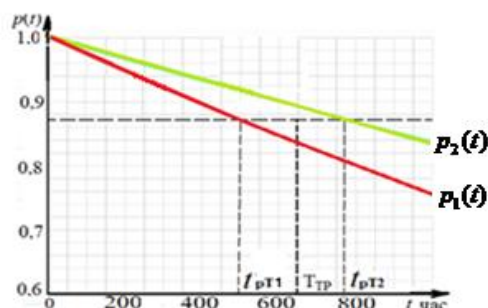


Рис. 7. Вероятности безотказной работы 1-го и 2-го вариантов

Примеры расчёта СМАРС с горячим резервированием агентов приведены в работе [15]. В случае необходимости оптимизации количества агентов некоторого варианта может использоваться генетический алгоритм, предложенный в работе [16].

Заключение. Рассмотренные методы ориентированы на применение при решении актуальных в настоящее время задач обеспечения надёжности выполнения миссий сложными мультиагентными реконфигурируемыми системами. Особую актуальность этих задач придаёт стремительное развитие беспилотных систем воздушного, подводного и наземного базирования. Эти системы могут включать значительное число обособленных автоматически действующих единиц – агентов, из которых эти системы могут формировать, путём реконфигурации группы агентов, ориентированные на решение той или иной конкретной задачи (миссии). Однако, как и любая техническая система, эти группы могут достичь поставленных целей, если только они обладают достаточно высокой надёжностью.

Рассмотренные в работе матричный методы одновременной оценки надёжности нескольких групп агентов, а также стадийный метод резервирования могут существенно повысить надёжность достижения поставленных целей. Они ориентированы на применение при использовании мультиагентных систем для решения задач промышленной, медицинской, социальной логистики, а также для решения специальных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники. – <https://robotrends.ru/robopedia/roibespilotnikov> (дата доступа: 19.12.2025).
2. Геоскан для управления роем дронов. – <https://robotrends.ru/pub/2406/geoskan-predstavil-resheniedlya-upravleniya-roem-dronov> (дата доступа: 19.12.2025).
3. Эскадрилья для тушения природных пожаров. – <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/6167e9b99a7947e8e3e8da25> (дата доступа: 19.12.2025).
4. Веревкин А.Л. Алгоритм компьютерного моделирования надёжности групп различной численности АНПА комплекса сейсморазведки океана // Проблемы современной системотехники: Сб. научных статей. Выпуск XVI. – Таганрог: Изд-ль ИП Ступин С.А., 2022. – 98 с. – С. 81-89.
5. <https://ok.ru/videoembed/9279008606777> (дата доступа: 09.12.2025).
6. Рынок агродронов к 2033 году вырастет в четыре раза. – https://uza.uz/ru/posts/rynok-agrodronov-k-2033-godu-vyrastet-v-chetyre-raza_505760 (дата доступа: 19.12.2025).
7. Дроны для сбора фруктов. Forbes.ru. – <https://www.forbes.ru/tekhnologii/485668-zacem-fermeryv-ssa-vnedraut-robotizirovannye-ul-i-i-drony-dla-sbora-fruktoy> (дата доступа: 19.12.2025).
8. Штефан Ю.В., Федоров В.К. Основы теории надёжности: учебно-методическое пособие к семинарским занятиям и лабораторным работам. – М.: МАДИ, 2023. – 168 с.
9. ГОСТ Р МЭК 61165 Надёжность в технике. Применение Марковских методов.
10. Шорохова И.С., Кисляк Н.В., Мариев О.С. Статистические методы анализа. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 300 с.

11. *Крянев А.В., Семенов С.С.* К вопросу о качестве и надёжности экспертных оценок при определении технического уровня сложных систем // *Функциональная надёжность. Теория и практика.* – <https://www.dependability.ru/jour/article/viewFile/34/98> (дата доступа: 27.10.2025).
12. ГОСТ 27.301 Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения.
13. *Пишихов В.Х., Вережкина Л.С., Вережкин А.Л.* Проектирование электротехнических устройств: учеб. пособие. Ч. 1. Стадии проектирования. Техническое задание. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 50 с.
14. *Капитанов В.А., Медведев А.И.* Теория надёжности сложных систем. – 2-е изд. перераб. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.
15. *Павлов А.П.* Методические указания к выполнению практической части курсовой работы по дисциплине «Резервирование при производстве, эксплуатации и ремонте машин». – М.: МАДИ, 2022. – 106 с.
16. *Острейковский В.А.* Теория надёжности: учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 464 с.
17. *Дулов О.А., Абрамов А.В.* Основы теории надёжности: Практикум по дисциплине «Основы теории надёжности». – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 62 с.
18. *Плютов Ю.А., Хомич Л.В.* Новые подходы к анализу надёжности // *Фундаментальные исследования.* – 2004. – № 6. – С. 70-72. – <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6298> (дата доступа: 19.12.2025).
19. *Болдырев А.С., Вережкин А.Л., Пишихова К.В., Вережкина Л.С.* Методика и моделирование надёжности системы группового управления роботизированными платформами // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2020. – № 3 (123). – С. 16-29.
20. *Болдырев А.С., Вережкин А.Л., Вережкина Л.С.* Алгоритмы моделирования надёжности систем управления группой роботизированных платформ с горячим резервированием // *Известия СПб ГТЭУ «ЛЭТИ».* – 2021. – № 4. – С. 49-57.
21. *Вережкин А.Л., Пишихова К.В., Вережкина Л.С.* Генетический алгоритм оценки надёжности многоканальной системы контроля, с учетом вариантов резервирования // *Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении, «КомТех-2019»:* Матер. Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко / отв. ред. С.И. Клевцов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 406-414.

REFERENCES

1. Analiticheskiy obzor mirovogo rynka robototekhniki [Analytical review of the global robotics market]. Available at: <https://robotrends.ru/robopedia/roi-bespilotnikov> (accessed 19 December 2025).
2. Geoskan dlya upravleniya roem dronov [Geoscan for drone swarm management]. Available at: <https://robotrends.ru/pub/2406/geoskan-predstavil-reshenie-dlya-upravleniya-roem-dronov> (accessed 19 December 2025).
3. Eskadril'ya dlya tusheniya prirodnikh pozharov [Wildfire Squadron]. Available at: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/6167e9b99a7947e8e3e8da25> (accessed 19 December 2025).
4. *Verevkin A.L.* Algoritmy komp'yuternogo modelirovaniya nadezhnosti grupp razlichnoy chislennosti ANPA kompleksa seysmorazvedki okeana [Algorithm for computer modeling of the reliability of groups of various sizes of AUVs for ocean seismic exploration], *Problemy sovremennoy sistemotekhniki: Sb. nauchnykh statey. Vypusk XVI* [Problems of modern systems engineering, collection of scientific articles. Issue XVI]. Taganrog: Izd-l' IP Stupin S.A., 2022, 98 p., pp. 81-89.
5. Available at: <https://ok.ru/videoembed/9279008606777> (accessed 19 December 2025).
6. Rynok agrodronov k 2033 godu vyrastet v chetyre raza [The agrodrones market will quadruple by 2033]. Available at: https://uza.uz/ru/posts/rynok-agrodronov-k-2033-godu-vyrastet-v-chetyre-raza_505760 (accessed 19 December 2025).
7. Drony dlya sbora fruktov. Forbes.ru [Fruit picking drones. Forbes.ru]. Available at: <https://www.forbes.ru/tekhnologii/485668-zacem-fermery-v-ssa-vnedraut-robotizirovannye-ul-i-i-drony-dla-sbora-fruktov> (accessed 19 December 2025).
8. *Shtefan Yu.V., Fedorov V.K.* Osnovy teorii nadezhnosti: uchebno-metodicheskoe posobie k seminariskim zanyatiyam i laboratornym rabotam [Fundamentals of the theory of reliability: a teaching manual for seminars and laboratory work]. Moscow: MADI, 2023, 168 p.
9. GOST R MEK 61165 Nadezhnost' v tekhnike. Primenenie Markovskikh metodov [GOST R IEC 61165 Reliability in technology. Application of Markov methods].
10. *Shorokhova I.S., Kislyak N.V., Mariev O.S.* Statisticheskie metody analiza [Statistical methods of analysis]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015, 300 p.

11. Kryanev A.V., Semenov S.S. K voprosu o kachestve i nadezhnosti ekspertnykh otsenok pri opredelenii tekhnicheskogo urovnya slozhnykh sistem [On the quality and reliability of expert assessments in determining the technical level of complex systems], *Funktsional'naya nadezhnost'. Teoriya i praktika* [Functional Reliability: Theory and Practice]. Available at: <https://www.dependability.ru/jour/article/viewFile/34/98> (accessed 27 October 2025).
12. GOST 27.301 Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnye polozheniya [GOST 27.301 Reliability in engineering. Reliability calculation. Main provisions].
13. Pshikhopov V.Kh., Verevkin A.L., Verevkin A.L. Proektirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv: ucheb. posobie. Ch. 1. Stadii proektirovaniya. Tekhnicheskoe zadanie [Design of electrical devices: tutorial. Part 1. Design stages. Terms of reference]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 50 p.
14. Kashtanov V.A., Medvedev A.I. Teoriya nadezhnosti slozhnykh sistem [Reliability theory of complex systems]. 2nd revised ed. Moscow: Fizmatlit, 2010, 608 p.
15. Pavlov A.P. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu prakticheskoy chasti kursovoy raboty po distsipline «Rezervirovanie pri proizvodstve, ekspluatatsii i remonte mashin» [Guidelines for Completing the Practical Part of the Coursework on "Redundancy in the Production, Operation, and Repair of Machines]. Moscow: MADI, 2022, 106 p.
16. Ostreykovskiy V.A. Teoriya nadezhnosti: uchebnyk dlya vuzov [Reliability theory: textbook for universities]. 2nd revised ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2008, 464 p.
17. Dulov O.A., Abramov A.V. Osnovy teorii nadezhnosti: Praktikum po distsipline «Osnovy teorii nadezhnosti» [Fundamentals of Reliability Theory: Workshop on the Course "Fundamentals of Reliability Theory"]. Ul'yanovsk: UlGTU, 2015, 62 p.
18. Plyutov Yu.A., Khomich L.V. Novye podkhody k analizu nadezhnosti [New approaches to reliability analysis], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2004, No. 6, pp. 70-72. Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6298> (accessed 19 December 2025).
19. Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Pshikhopova K.V., Verevkin A.L. Metodika i modelirovanie nadezhnosti sistemy gruppovogo upravleniya robotizirovannymi platformami [Methodology and modeling of reliability of a group control system for robotic platforms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 3 (123), pp. 16-29.
20. Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Verevkin A.L. Algoritmy modelirovaniya nadezhnosti sistem upravleniya gruppoy robotizirovannykh platform s goryachim rezervirovaniem [Algorithms for modeling the reliability of control systems for a group of robotic platforms with hot redundancy], *Izvestiya SPb GTEU «LETI»* [Bulletin of ETU "LETI"], 2021, No. 4, pp. 49-57.
21. Verevkin A.L., Pshikhopova K.V., Verevkin A.L. Geneticheskii algoritm otsenki nadezhnosti mnogokanal'noy sistemy kontrolya, s uchetom variantov rezervirovaniya [Genetic algorithm for assessing the reliability of a multi-channel control system, taking into account redundancy options] *Kompyuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii, «KomTekh-2019»: Mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem imeni professora O.N. Pyavchenko* [Computer and Information Technologies in Science, Engineering and Management, "KomTech-2019": Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation named after professor O.N. Pyavchenko], ed. S.I. Klevtsov. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 406-414.

Пшихопов Вячеслав Хасанович – Южный федеральный университет; e-mail: vpshihopov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; д.т.н.; профессор.

Веревкин Александр Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: verevkin.a@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; соискатель.

Гайдук Анатолий Романович – Южный федеральный университет; e-mail: argayduk@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371689; д.т.н.; профессор.

Веревкина Лина Станиславовна – Южный федеральный университет; e-mail: lverevkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; к.т.н.; доцент.

Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich – Southern Federal University; e-mail: vpshihopov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; dr. of eng. sc.; professor.

Verevkin Alexander Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: verevkin.a@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; applicant.

Gaiduk Anatoly Romanovich – Southern Federal University; e-mail: argayduk@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371689; dr. of eng. sc.; professor.

Verevkin Lina Stanislavovna – Southern Federal University; e-mail: lverevkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.