

УДК 621.311.24

А. С. Болдырев, А. Л. Веревкин, Л. С. Веревкина  
Южный федеральный университет,  
Институт радиотехнических систем и управления

## Алгоритм моделирования надежности системы управления группой роботизированных платформ с горячим резервированием

*Одним из актуальных направлений развития робототехники является управление группами роботизированных платформ. При проектировании таких систем предъявляются повышенные требования к надежности, что продиктовано значительной стоимостью оборудования. Цель статьи – исследовать надежность разработанной системы группового управления и определить возможности повышения ее надежности. Группа из пяти роботизированных платформ и двух пультов управления позволяет формировать различные конфигурации из составных частей. Представленный алгоритм предназначен для моделирования надежности разработанной системы группового управления с горячим (нагруженным) резервированием, роботизированных платформ, пультов управления и всей системы в целом. Существуют разрозненные методы оценки надежности устройств. При этом не был разработан подход для наглядного и обобщенного представления параметров надежности системы группового управления. Приводятся схемы моделей горячего резервирования и предложена комбинация методов расчета надежности с целочисленным, избыточным, скользящим, горячим и мажоритарным резервированием роботизированных платформ. Общее горячее резервирование системы в целом также рассмотрено. Для моделирования используются структурный, вероятностный и предложенный матричный методы. Представлены следующие результаты: модели надежности системы группового управления, численные расчеты интенсивности отказов, наработки на отказ в виде матриц, графики вероятности безотказной работы. Реализация алгоритма позволяет рассчитать надежность системы группового управления, оценить риски и выбрать режим в зависимости от требуемой эффективности выполнения задания.*

### Система группового управления, роботизированные платформы, наработка на отказ, надежность, горячее резервирование, алгоритм, моделирование

Одним из актуальных направлений развития робототехники являются системы группового управления. Так, в [1]–[4] исследуются возможности и задачи, эффективно решаемые группой роботизированных устройств; в [5] решается задача движения группы роботов в заданный район строим с обходом препятствий; в [6] – задача группового преследования уклоняющихся объектов (роботы-охотники должны распознать членов своей группы и совместно спланировать траектории для эффективной поимки стационарных или подвижных объектов). В [7] решается задача группового обнаружения и сопровождения объектов (людей, животных) с помощью мультикоптеров.

Основные принципы формирования структуры системы группового управления изложены в литературе ([8], [9]). Дальность полета мультикоптеров ограничена их временем полета – не более 55 мин при максимальной скорости не более

80 км. Использование роботизированных платформ и интернет-связи позволяет доставлять группу мультикоптеров к месту обследования территории. Пример роботизированной платформы (РП) и вид задания группы РП на экране планшета приведены на рис. 1.

Система группового управления обеспечивает:

- дистанционное управление движением со стационарного пульта управления (СПУ) или переносного пульта управления (ППУ), а число РП может варьироваться от 1 до 5;

- управление может осуществляться в режиме онлайн или в виде задания для всей группы или для каждой РП в отдельности.

Оператор задает общее групповое маршрутное задание, которое загружается в бортовые вычислители РП, где формируются индивидуальные маршрутные задания для каждой РП.



Рис. 1

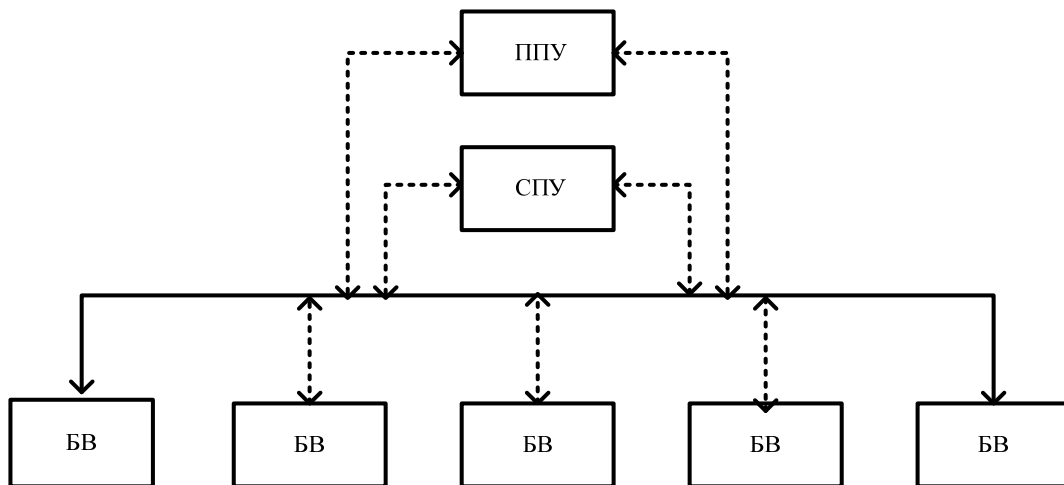


Рис. 2

Каждая РП укомплектована бортовым вычислителем, который распределяет вычислительные ресурсы между устройствами системы группового управления.

Для группового (мультиагентного) управления рассматриваемых пяти роботизированных платформ используется сочетание методов траекторного и позиционного управления, автономного или с оператором в зависимости от задания, и алгоритмы «пчелиный», «муравьиный рой» и др., которые вместе составляют распределенную базу данных для ЭВМ.

Система группового управления, состав которой представлен на рис. 2, имеет гибкую структуру.

Реализуется система группового управления на устройствах общего промышленного применения:

- 1) БВ (бортовой вычислитель РП) – промышленная безвентиляторная, встраиваемая, малогабаритная ЭВМ Vecow ECS-9280;
- 2) ППУ – планшет Samsung Galaxy Tab S4;
- 3) СПУ в составе:
  - компьютер Acer predator 21 xgx21-71-76lz,
  - LED-телевизор SAMSUNG,
  - клавиатура RAZER BlackWidow Ultimate Stealth 2016,
  - монитор ЖК ASUS MX34VQ 34,
  - мышь RAZER Abyssus v2 оптическая проводная USB,

На этапе проектирования систем группового управления важно определить численные значения параметров надежности как всей системы, так и ее составных частей. При этом необходимо проводить исследования достаточности номенклатуры задаваемых параметров надежности, выбора методов моделирования надежности, разработки алгоритмов, что позволяет еще на стадии проектирования прогнозировать эффективность выполнения задания и риски.

**Методика моделирования надежности.** Систему группового управления расчленим на отдельные части так, чтобы для каждой можно было определить показатели надежности. Из этих частей конфигурируются структурные схемы – модели надежности системы.

Схема расчлененной сложной системы группового управления позволяет реализовать способы резервирования:

- 1) горячее (нагруженное):
  - целочисленное резервирование;
  - скользящее резервирование;
  - избыточное резервирование.
- 2) мажоритарное резервирование.

Поскольку в составе системы группового управления есть два пульта управления и РП в количестве от одной до пяти, необходимо рассчитать показатели надежности для разных моделей надежности.

При таком многообразии вариантов моделей схем резервирования как РП, так и пультов управления СПУ и ППУ, а также возможности общего резервирования системы возникают проблемы выбора методов расчета и однозначного, обобщенного представления параметров надежности системы группового управления, которые решаются в данной статье.

Для расчета надежности принимаем следующие допущения.

1. РП равно надежны; полагаем, что вероятность отказа  $P(t)$  каждой РП и пультов носит экспоненциальный характер:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов устройства,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $t$  – время, ч.

2. Строится структурная схема для расчета надежности классическим методом для расчлененной сложной системы, элементы объединяются в группы  $S$  и  $N$ :

- $S1$  – стационарный пульт управления;
- $S2$  – переносной пульт управления;
- $N = 1...5$  – вычислители пяти роботизированных платформ РП1...РП5.

Любая группа элементов может находиться как в отключенном, так и в рабочем состоянии.

3. Для каждой группы  $S1, S2$  пультов и  $N$  вычислителей РП1...РП5 рассчитывается классическим структурным методом интенсивность отказов  $\lambda$ , наработка на отказ  $T$  и графики вероятности безотказной работы  $P(t)$  [10]:

$$\lambda = \sum k_i \lambda_i, \quad T = 1/\lambda,$$

где  $k_i$  – количество однотипных  $i$ -х элементов в группе;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента,  $\text{ч}^{-1}$ .

4. Далее для всей системы группового управления матричным методом рассчитывается матрица интенсивности отказов  $\Lambda_{SN}$  и наработка на отказ  $T_{SN}$  в ПО MathCad. Каждая строка матрицы соответствует конфигурациям системы группового управления с различным числом  $N$  от 1 до 5 работающих РП:

$$\Lambda_{SN} = \begin{vmatrix} \lambda_{S1} & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 \end{vmatrix},$$

$$T_{SN} = |\Lambda_{SN}|^{-1},$$

где  $\lambda_{S1}, \lambda_{S2}$  – интенсивность отказов СПУ и ППУ соответственно;  $\lambda_1... \lambda_5$  – интенсивность отказов вычислителей роботизированных платформ РП1...РП5.

Графики вероятности безотказной работы  $P_N(t)$  для каждого количества работающих вычислителей РП от 1 до 5 рассчитывают и строят в ПО MathCad.

5. Далее выполняется расчет надежности при горячем (нагруженном) целочисленном резервировании РП. Формулы расчетов наработки на отказ получены вероятностным методом.

Наработку на отказ целочисленного резервирования РП  $T_{2+2Ц}$  схемы  $N = n + m = 2 + 2$  определяют по формуле [11]

$$T_{2+2Ц} = T_2 \sum_0^m \frac{1}{1+m!},$$

где  $T_2$  – наработка на отказ двух РП;  $n$  – количество работающих РП;  $m$  – количество РП в резерве.

Интенсивность отказов РП при горячем целочисленном резервировании РП схемы  $N = 2 + 2$  определяют по формуле

$$\lambda_{2+2Ц} = 1/T_{2+2Ц}.$$

6. Нарботка на отказ избыточного горячего резервирования РП  $T_{МИ}$  схем:  $N = 1 + 1; 1 + 2; 1 + 3; 1 + 4$  для числа  $m = 1; 2; 3; 4$  определяют по формуле [8]

$$T_{МИ} = T_1 \sum_{0}^m \frac{1}{1+m!},$$

где  $T_1$  – наработка на отказ одного вычислителя РП.

Рассчитывается матрица наработки на отказ избыточного горячего резервирования РП, каждая строка соответствует схеме резервирования:

$$T_{МИ} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & \frac{1}{1+2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & \frac{1}{1+2} & \frac{1}{1+3} & 0 \\ \frac{1}{1+0} & \frac{1}{1+1} & \frac{1}{1+2} & \frac{1}{1+3} & \frac{1}{1+4} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_1 \\ T_1 \\ T_1 \\ T_1 \end{pmatrix}.$$

Интенсивности отказов избыточных схем  $N = 1+1; 1+2; 1+3; 1+4$  горячего резервирования РП, получаем в виде матрицы-столбца

$$\Lambda_{МИ} = |T_{МИ}|^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_{1+1} \\ \lambda_{1+2} \\ \lambda_{1+3} \\ \lambda_{1+4} \end{pmatrix}.$$

7. Нарботка на отказ при горячем скользящем резервировании РП схем:  $N = 3 + 1; 2 + 1; 3 + 2; 4 + 1$ , рассчитывается по формуле [11]

$$T_{NC} = \frac{1}{n\lambda_1} + \frac{1}{(n+1)\lambda_1} + \dots + \frac{1}{(n+m)\lambda_1},$$

где  $T_{NC}$  – средняя наработка РП, при горячем скользящем резервировании;  $\lambda_1$  – интенсивность отказов одного вычислителя РП;  $n$  – основных РП: 2; 3; 4;  $m$  – резервных РП: 1; 2.

Результаты расчетов записываются в виде матрицы  $T_{NC}$ , интенсивности отказов при скользящем резервировании РП определяются в виде матрицы-столбца  $\Lambda_{NC}$ :

$$T_{NC} = \begin{pmatrix} T_{2+1C} \\ T_{3+1C} \\ T_{3+2C} \\ T_{4+1C} \end{pmatrix}; \quad \Lambda_{NC} = |T_{NC}|^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_{2+1C} \\ \lambda_{3+1C} \\ \lambda_{3+2C} \\ \lambda_{4+1C} \end{pmatrix}.$$

8. Интенсивности отказов системы группового управления для каждой схемы  $N$  горячего резервирования РП определяют как сумму интенсивности отказов пульта СПУ  $\lambda_{S1}$  (или ППУ  $\lambda_{S2}$ ), и интенсивности отказов РП  $\lambda_N$  для каждой схемы  $N$  горячего резервирования по формулам

$$\Lambda_{S1N} = \lambda_{S1} + \lambda_N; \quad \Lambda_{S2N} = \lambda_{S2} + \lambda_N.$$

Нарботку на отказ системы группового управления для каждой схемы  $N$  горячего резервирования РП рассчитывают по формулам

$$T_{S1N} = 1/\Lambda_{S1N}; \quad T_{S2N} = 1/\Lambda_{S2N}.$$

Графики вероятности безотказной работы системы группового управления  $P_{SN}(t)$  при горячем резервировании рассчитывают в ПО MathCad для каждой схемы резервирования.

9. Выполняется расчет надежности системы группового управления при мажоритарном резервировании РП, когда при работе функционально изменяется схема и полагают, что результаты измерений верны, если при сравнении сигналов совпадают от 2 из 3 или от 3 из 5 РП.

Для мажоритарного резервирования РП 2 из 3 вероятностным методом получена формула для расчета времени наработки на отказ [9]:

$$\begin{aligned} T_{2из3} &= \int_0^{\infty} P_{2из3} dt = \int_0^{\infty} (3P^2 - 2P^3) dt = \\ &= \int_0^{\infty} (3\ell^{-\lambda t^2} - 2\ell^{-\lambda t^3}) dt; \end{aligned}$$

выполнив интегрирование, получим формулу для расчета времени наработки на отказ

$$T_{2из3} = \frac{3}{2\lambda_1} + \frac{2}{3\lambda_1} = \frac{5}{6\lambda_1}.$$

Интенсивность отказов РП при мажоритарном резервировании РП 2 из 3 рассчитывается по формуле

$$\lambda_{2из3} = 1/T_{2из3}.$$

Интенсивность отказов  $\Lambda_{SNM}$  системы группового управления при мажоритарном резервировании РП 2 из 3 вычисляется по формуле

$$\Lambda_{SNM} = \lambda_S + \lambda_{2из3}.$$

$$\lambda_{2из3} = 1/T_{2из3}.$$

Интенсивность отказов  $\Lambda_{SNM}$  системы группового управления при мажоритарном резервировании РП 2 из 3 вычисляется по формуле

$$\Lambda_{SNM} = \lambda_S + \lambda_{2из3}.$$

Наработка на отказ  $T_{SNM}$  системы группового управления при мажоритарном резервировании 2 из 3 РП определяется по формуле

$$T_{SNM} = 1/\Lambda_{SNM}.$$

10. Задают схему общего резервирования системы, распределив все РП на две группы так, что у каждой группы есть свой пульт управления – СПУ или ППУ. Рассчитывают интенсивность отказов  $\Lambda$  и наработку на отказ  $T$  схем общего резервирования системы.

11. Формируют сводную таблицу параметров надежности системы группового управления с разным числом работающих РП и различными способами резервирования.

**Алгоритм моделирования надежности.** Алгоритм расчета надежности структур мульти-агентного управления определяется заданием на расчет надежности, на основании которого и последующего изучения описания работы устройства составляются последовательность расчета и расчетные формулы.

Согласно представленной методике синтезирован алгоритм и матричная модель надежности, которые в ПО MathCad позволяют рассчитать численные значения наработки на отказ системы группового управления при работе с разным числом РП и при различных способах их резервирования.

Входными данными для алгоритма расчета служат:

– описание переменных и структурных схем расчета надежности:

– интенсивности отказа элементов пультов управления СПУ и ППУ;

– интенсивности отказа вычислителя РП.

Формализованная запись укрупненного алгоритма представлена на рис. 3 и предполагает строгую последовательность выполнения расчетов.

1. Задание исходных данных элементов и описание переменных.

2. Расчет надежности структурных частей:  $\lambda_S$  – интенсивности отказов пультов управления  $S = 1$  для СПУ и  $S = 2$  для ППУ.

3. Расчет интенсивности отказов системы без резервирования.

4. Расчет времени наработки на отказ структурных частей и системы без резервирования.

5. График вероятности безотказной работы системы без резервирования.

6. Задание схем моделирования надежности целочисленного резервирования РП.

7. Расчет наработки на отказ и интенсивности отказов целочисленного резервирования РП.

8. Задание схем моделирования надежности избыточного резервирования РП.

9. Расчет матриц наработки на отказ и интенсивности отказов избыточного резервирования РП.

10. Задание схем моделирования надежности скользящего резервирования РП.

11. Расчет наработки на отказ скользящего резервирования РП в цикле для каждой схемы.

12. Расчет матрицы интенсивности скользящего резервирования РП.

13. Расчет интенсивности отказов и наработки на отказ системы (в цикле для каждой схемы резервирования РП).

14. Задание схем надежности мажоритарного резервирования РП.

15. Расчет наработки на отказ мажоритарного резервирования РП.

16. Расчет интенсивности отказов мажоритарного резервирования РП.

17. Расчет интенсивности отказов наработки на отказ системы и мажоритарного резервирования РП.

18. Задание схем надежности горячего общего резервирования системы.

19. Расчет наработки на отказ общего резервирования системы.

20. Графики вероятности безотказной работы системы с резервированием РП.

21. Вывод рассчитанных графиков и таблиц параметров надежности.

22. Конец.

В алгоритме приняты обозначения:  $\lambda_S$  – интенсивность отказов пультов управления ( $S = 1$  для СПУ и  $S = 2$  для ППУ);  $\lambda_{MЦ}$ ,  $\lambda_{MI}$ ,  $\lambda_{NC}$ ,  $\lambda_{NM}$  – интенсивность отказов  $N = n + m$  схем при Ц – целочисленном, И – избыточном С – скользящем, М – мажоритарном резервировании РП соответственно;  $n$  – количество РП работающих;  $m$  – количество РП в резерве;  $T_{MЦ}$ ,  $T_{MI}$ ,  $T_{NC}$ ,  $T_{NM}$  – наработка на отказ схемы  $N$  при Ц-, И-, С-, М-резервировании РП;  $T_{SN}$ ,  $\Lambda_{SN}$  – наработка на отказ и интенсивность отказов системы как суммы  $S$  пульта и  $N$  схемы резервирования РП;  $T$ ,  $\Lambda$  – наработка на отказ и интенсивность отказов общего резервирования системы.

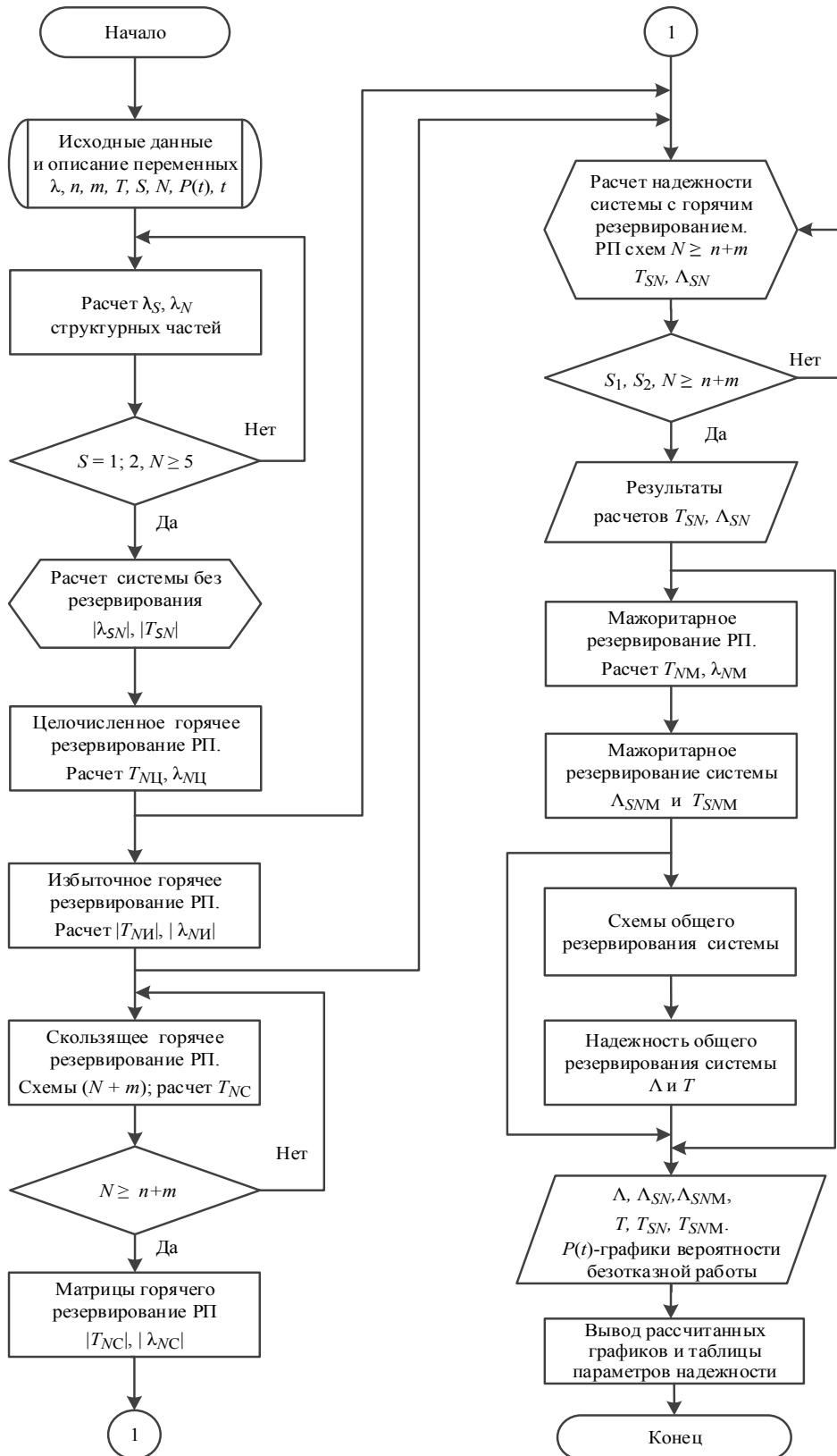


Рис. 3

Предложенный алгоритм отличается от известных: самой последовательностью, в которой предыдущие расчетные значения используются в

последующих формулах; для различных режимов работы (миссий) получены аналитические выражения параметров надежности, которые используются как циклические вложения в линейный

Наименование устройства	Наработка на отказ, ч	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, \text{ч}^{-1}$	Количество, шт.
Стационарный пульт управления	7043	141.98	1
Переносной пульт управления	6570	152.07	1
Вычислитель РП	220 264	4.54	1...5

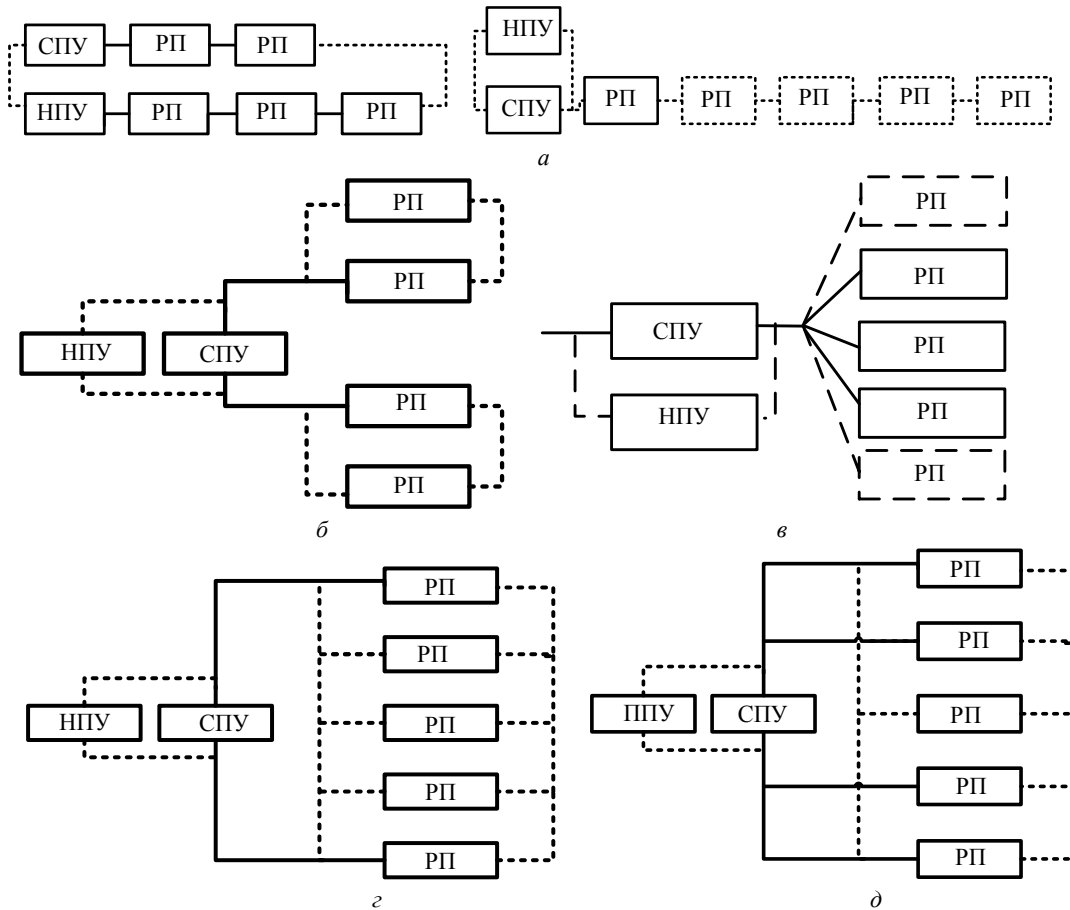


Рис. 4

алгоритм; в алгоритме матричные математические преобразования позволяют одновременно рассчитывать несколько режимов работы или вариантов компоновки и получать наглядный результат в виде матриц времени наработки на отказ или интенсивности отказов.

**Результаты моделирования.** Исходными данными для численных расчетов параметров надежности служат интенсивности отказов структурных частей системы группового управления, приведенных в базе данных [12] (табл. 1).

Используя приведенные методику и алгоритм, в ППП MathCad на ЭВМ выполнен расчет интенсивности отказов системы группового управления без резервирования. Результаты представлены в виде матрицы интенсивности отказов системы группового управления. Каждой строке матрицы соответствует конфигурация системы с 1...5 РП и первые пять строк с СПУ, а с пятой по десятую строку – с ППУ. Время наработки на от-

каз получено возведением в минус первую степень матрицы интенсивности отказов. Представление матрицами-столбцами интенсивности отказов и наработки на отказ системы группового управления дает наглядную картину надежности системы.

$$\Lambda_{S+N} = \begin{matrix} \Lambda_{S1+1} \\ \Lambda_{S1+2} \\ \Lambda_{S1+3} \\ \Lambda_{S1+4} \\ \Lambda_{S1+5} \\ \Lambda_{S2+1} \\ \Lambda_{S2+2} \\ \Lambda_{S2+3} \\ \Lambda_{S2+4} \\ \Lambda_{S2+5} \end{matrix} = \begin{matrix} 146.52 \cdot 10^{(-6)} \\ 151.05 \cdot 10^{(-6)} \\ 155.60 \cdot 10^{(-6)} \\ 160.14 \cdot 10^{(-6)} \\ 164.68 \cdot 10^{(-6)} \\ 156.61 \cdot 10^{(-6)} \\ 161.15 \cdot 10^{(-6)} \\ 165.69 \cdot 10^{(-6)} \\ 170.23 \cdot 10^{(-6)} \\ 174.77 \cdot 10^{(-6)} \end{matrix} \text{ч}^{-1}$$

и

$$T_{S+N} = \begin{pmatrix} \Lambda_{S1+1} \\ \Lambda_{S1+2} \\ \Lambda_{S1+3} \\ \Lambda_{S1+4} \\ \Lambda_{S1+5} \\ \Lambda_{S2+1} \\ \Lambda_{S2+2} \\ \Lambda_{S2+3} \\ \Lambda_{S2+4} \\ \Lambda_{S2+5} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} T_{S1+1} \\ T_{S1+2} \\ T_{S1+3} \\ T_{S1+4} \\ T_{S1+5} \\ T_{S2+1} \\ T_{S2+2} \\ T_{S2+3} \\ T_{S2+4} \\ T_{S2+5} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6825.0 \\ 6620.3 \\ 6426.7 \\ 6244.5 \\ 6072.0 \\ 6385.3 \\ 6205.0 \\ 6035.4 \\ 5874.0 \\ 5721.8 \end{pmatrix} \text{ ч.}$$

При эксплуатации таких систем широко распространен способ повышения их надежности за счет РП, которые могут работать как основные или как резервные.

На рис. 4 представлено моделирование надежности: *a* – общее и раздельное; *b* – целочисленное,  $N = 2 + 2$ ; *v* – мажоритарное, 3 из 5; *z* – избыточное,  $N = 2 + 3$ ; *d* – скользящее,  $N = 4 + 1$ . При общем резервировании система резервируется в целом, а при раздельном – резервируются отдельные части системы (рис. 4, *a*).

В результате моделирования надежности согласно алгоритму и приведенной методике рассчитано время наработки на отказ системы группового управления при горячем и мажоритарном резервировании. Для схем с *n* основными и *m* резервными РП наработка на отказ системы при общем горячем резервировании представлена в табл. 2.

Нарботка на отказ системы при мажоритарном резервировании представлена в табл. 3.

Графики вероятности безотказной работы системы группового управления при горячем резервировании рассчитаны в ПП MathCad. Графики вероятности безотказной работы системы с резервированием: 2 + 2 – целочисленным; 2 из 3 и 3 из 5 – мажоритарным; 1 + 4 – избыточным; 4 + 1 и 2 + 1 – скользящим, – на рис. 5.

В результате компьютерного исследования надежности получены численные значения, которые могут использоваться как справочные или необходимые данные для задания параметров проектирования и испытаний по надежности подобных объектов, их составных частей, что имеет прикладную значимость.

Таблица 2

Параметр	Схема горячего резервирования СПУ + ППУ + РП ( <i>n</i> + <i>m</i> )								
	1 + 1	1 + 2	1 + 3	1 + 4	2 + 2	2 + 1	3 + 1	4 + 1	3 + 2
Нарботка на отказ, ч	16 824	16 981	17 068	17 120	16 010	9350	9151	8961	9320

Таблица 3

Параметр	Пульт управления	Схема мажоритарного резервирования РП	
		2 из 3	3 из 5
Нарботка на отказ без резервирования СПУ, ч	СПУ	6783	6767
Нарботка на отказ без резервирования ППУ, ч	ППУ	6343	6329
Нарботка на отказ с горячим резервированием пультов, ч	СПУ + ППУ	9354	9322

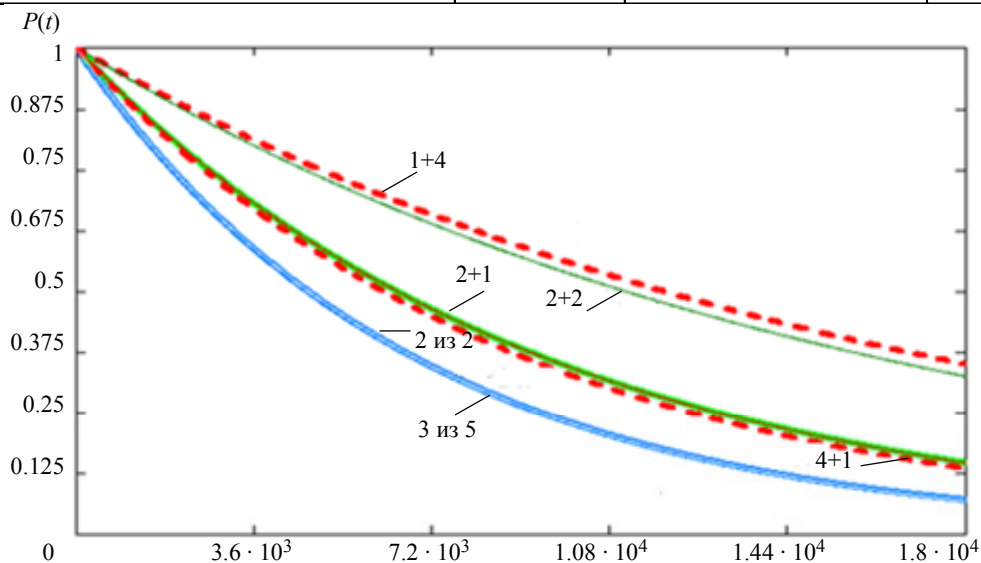


Рис. 5



Разработанная схема системы группового управления обладает гибкой структурой и относится к расчлененным системам. Показана особенность таких систем – их параметры надежности зависят от режимов работы, которым соответствуют различные конфигурации из частей системы. Для расчета параметров надежности подобных систем предложены алгоритм и методика с использованием вероятностного, классического структурного и матричного методов. Результаты наглядно и однозначно представлены матрицами параметров надежности системы группового управления.

В результате численного моделирования показано следующее: 1) отдельное резервирование

обеспечивает более высокий уровень безотказности по сравнению с общим резервированием при одном и том же количестве резервных элементов; 2) наработка системы группового управления с 5 РП без резервирования – 6072 ч, а в зависимости от схемы горячего резервирования РП – больше на 50–150 %.

Подтверждена возможность повышения надежности системы группового управления посредством резервирования. Полученные результаты расчетов позволяют выбрать схему резервирования, обеспечить требуемую надежность и прогнозировать риски.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В. И. Сырякина. Томск: СТТ, 2018.
2. Bayindir L. A review of swarm robotics tasks // *Neurocomputing*. 2016. Vol. 292. P. 292321.
3. Francesca G., Birattari M. Automatic design of robot swarms: Achievements and challenges // *Frontiers Robotics AI*. 2016. Vol. 3 (1). P. 1–9.
4. Rizk Y., Awad M., Tunstel E. W. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey. *ACM Computing Surveys Volume*. 2019. Vol. 52 (2). P. 1–31.
5. Neural network-based region reaching formation control for multi-robot systems in obstacle environment / J. Yu, J. Ji, Z. Miao, J. Zhou // *Neurocomputing*. 2019. Vol. 333. P. 11–21.
6. Agrawal P., Agrawal H. Adaptive algorithm design for cooperative hunting in multi-robots // *Intern. J. of Intelligent Systems and Applications*. 2018. Vol. 10 (12). P. 47–55.
7. Deep neural network-based cooperative visual tracking through multiple micro aerial vehicles / E. Price, G. Lawless, R. Ludwig, I. Martinovic, H. H. Bulthoff, M. J. Black, A. Ahmad // *IEEE Robotics and Automation Lett*. 2018. Vol. 3 (4). P. 3193–3200.
8. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009.
9. Зенкевич С. Л. Принципы построения систем управления роботами // *Робототехнические системы и автоматическое управление: Межвуз. сб. науч. тр.* М.: МИРЗА, 1985.
10. Балдин К. В., Башлыков В. Н. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. М.: Дашков и К, 2016.
11. Блягоз З. У. Теория вероятностей и математическая статистика. Курс лекций: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018.
12. Болдырев А. С., Вережкина Л. С., Вережкин А. Л. Надежность компонентов многофункциональных, робототехнических и автоматизированных систем. Св. о гос. регистрации базы данных № 2019621637 от 09.09.2019.

A. S. Boldyrev, A. L. Verevkin, L. S. Verevkina

*Southern Federal University, Institute of Radio Engineering Systems and Management*

### ALGORITHM FOR MODELING THE RELIABILITY OF A CONTROL SYSTEM FOR A GROUP OF ROBOTIC PLATFORMS WITH HOT REDUNDANCY

*One of the most relevant areas of robotics development is the management of groups of robotic platforms. When designing such systems, increased reliability requirements are imposed, which is dictated by the significant cost of equipment. The purpose of the work is to investigate the reliability of the developed group management system and determine the possibilities for improving reliability. A group of five robotic platforms, two control panels, allows you to form various configurations of the components. The presented algorithm is intended for modeling the reliability of the developed group control system with hot (loaded) redundancy, robotic platforms, control panels, and the entire system as a whole. There are disparate methods for assessing the reliability of the devices. However, an approach was not developed for a visual and generalized representation of the reliability parameters of the group management system. This paper presents schemes of hot redundancy models and offers a combination of methods for calculating reliability with integer, redundant, sliding, hot and majority redundancy of robotic platforms. The overall hot reservation of the system as a whole is also considered. Structural, probabilistic, and proposed matrix methods are used for modeling. The paper presents the following results: reliability models of the group control system, numerical calculations of the failure rate in, failure times in the form of matrices, graphs of the probability of failure-free operation. Implementation of the algorithm allows you to calculate the reliability of the group management system, assess the risks and select the mode depending on the required efficiency of the mission.*

**Group control system, robotic platforms, time to failure, reliability, hot redundancy, algorithm, simulation**