

20. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM №2011613571 «Sistema upravleniya izmereniyami i rascheta parametrov Hioki ZC (polnoe soprotivlenie i emkost' p'ezoelementa) Hioki ZC v. 1.0» 06.05.2011 [Certificate of state registration of computer programs No. 2011613571 "hioki ZC measurement control and parameter calculation System (total resistance and piezoelectric element capacity) Hioki ZC V. 1.0" 06.05.2011].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.А. Строщев.

Алексунин Евгений Сергеевич – Научное конструкторско-технологическое бюро пьезоэлектрического приборостроения ЮФУ; e-mail: aleksunin@gmail.com; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10, оф. 406; тел.: +79289098093; инженер по информационной безопасности.

Aleksunin Evgeniy Sergeevich – Science design and technology bureau "Piezopribor" Southern Federal University; e-mail: aleksunin@gmail.com; 10, Mil`chakov street, of. 406, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79289098093; information security engineer.

УДК 621.311.24

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-16-29

А.С. Болдырев, А.Л. Веревкин, К.В. Пшихопова, Л.С. Веревкина
МЕТОДИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ
ПЛАТФОРМАМИ

Одним из актуальных направлений развития робототехники являются проектирование систем группового управления. В предложенной структуре группа из пяти роботизированных платформ (РП) управляется с носимого или стационарного пультов. Такой состав группы предопределяет схемы с перестраиваемыми связями между составными частями и изменением принципов функционирования. В статье приведены экспериментальные исследования вычислительной эффективности методов планирования траекторий РП в пространстве и определены оптимальный метод и требуемые параметры вычислителя РП. Рассмотрены варианты схем с разным числом РП и модели холодного резервирования РП, пультов и общего всей системы. При таком многообразии конфигураций возникают проблемы, обоснования и выбора методов расчета, и однозначного, обобщенного представления параметров надежности системы группового управления. Повышенные требования к надежности компонент системы группового управления, требуют точной оценки надежности и продиктованы значительной стоимостью оборудования и функциональным назначением. Разработанная методика предназначена для моделирования надежности разработанной системы группового управления роботизированными платформами РП. В предложенной методике показано использование структурного, вероятностного и матричного методов для расчета моделей надежности системы группового управления. А также предложен подход к моделированию надежности целочисленного, избыточного, скользящего, холодного резервирования РП и пультов управления. Полученные результаты численных расчетов параметров надежности системы группового управления, позволяют оценить риски и выбрать режимы, в зависимости от требуемой эффективности выполнения миссии.

Система группового управления; роботизированные платформы; наработка на отказ; надежность; резервирование; алгоритм; моделирование.

A.S. Boldyrev, A.L. Verevkin, K.V. Prihodova, L.S. Verevkin
METHODOLOGY AND RELIABILITY MODELING OF THE GROUP
CONTROL SYSTEM FOR ROBOTIC PLATFORMS

One of the most relevant areas of robotics development is the design of group control systems. In the proposed structure, a group of five robotic platforms (RP) is controlled from a wearable or stationary remote control. This composition of the group determines schemes

with tunable connections between the components and changes in the principles of operation. The article presents experimental studies of the computational efficiency of methods for planning RP trajectories in space and defines the optimal method and the required parameters of the RP computer. Variants of schemes with different numbers of RP are considered, as well as models of cold backup of RP, remote controls, and the entire system. With such a variety of configurations, problems arise in justifying and selecting calculation methods, and in providing an unambiguous, generalized representation of the reliability parameters of a group control system. Increased requirements for the reliability of components of the group management system require an accurate assessment of reliability and are dictated by the significant cost of equipment and functional purpose. The developed method is intended for modeling the reliability of the developed system of group control of robotic platforms RP. The proposed method shows the use of structural, probabilistic and matrix methods for calculating reliability models of a group control system. An approach to modeling the reliability of integer, redundant, sliding, and cold redundancy of RP and control panels is also proposed. The results of numerical calculations of the reliability parameters of the group management system allow us to assess the risks and choose modes, depending on the required efficiency of the mission.

Group control system, robotic platforms, time to failure, reliability, resetting, algorithm, modeling.

Введение. Одним из актуальных направлений развития робототехники являются системы группового управления, так в работах [1–4] исследуются возможности и задачи, которые эффективно решаются группой роботизированных устройств. В статье [5] решается задача движения группы роботов строем с обходом препятствий в заданный район. В статье [6] решается задача группового преследования уклоняющихся объектов. Роботы охотники должны распознать членов своей группы и совместно спланировать траектории для эффективной поимки стационарных или подвижных объектов.

1. Постановка задачи. В статье предлагается следующий подход к исследованию системы группового управления, с позиций выбора метода управления, требуемых вычислительных возможностей и повышения надежности и ставятся задачи:

- ◆ разработать гибкую расчлененную структурную схему;
- ◆ экспериментально определить требуемую вычислительную мощность бортового вычислителя РП и выбрать метод планирования движения;
- ◆ определить возможность реализации системы;
- ◆ провести анализ на соответствие требований ЕСКД, определить номенклатуру задаваемых параметров надежности и их достаточность;
- ◆ разработать методику моделирования надежности с учетом, гибкости многовариантной структуры системы и возможности резервирования структурных частей;
- ◆ выполнить численное моделирование надежности, как системы группового управления, так и составных частей.

Такой подход позволяет еще на стадии проектирования, обеспечить эффективность выполнения миссии и определиться с рисками.

2. Структура системы группового управления. В числе приоритетных направлений проектирования робототехники является надежность систем, в том числе и группового управления робототехническими платформами. Общий вид РП и задание группе РП на экране монитора, приводятся на рис. 1.



Рис. 1. Робототехническая платформа и задание группе РП на экране монитора

Система группового управления обеспечивает:

- ♦ дистанционное управление движением со стационарного пульта управления (СПУ) или носимого пульта управления (НПУ), а число РП может варьироваться от 1 до 5штук;

- ♦ управление может быть в режиме он лайн, или в виде заданного задания для всей группы или для каждой РП в отдельности.

Основные принципы формирования структуры системы группового управления, изложенные в литературе [7, 8]. Структурная схема системы группового управления РП представлена на рис. 2. Структура относится к расчлененной системе потому, что оборудование находится не на одном объекте.

Предложенная схема может работать в различных режимах и позволяет широко использовать изменение принципов функционирования схемы и структуры за счет ее большой гибкости.

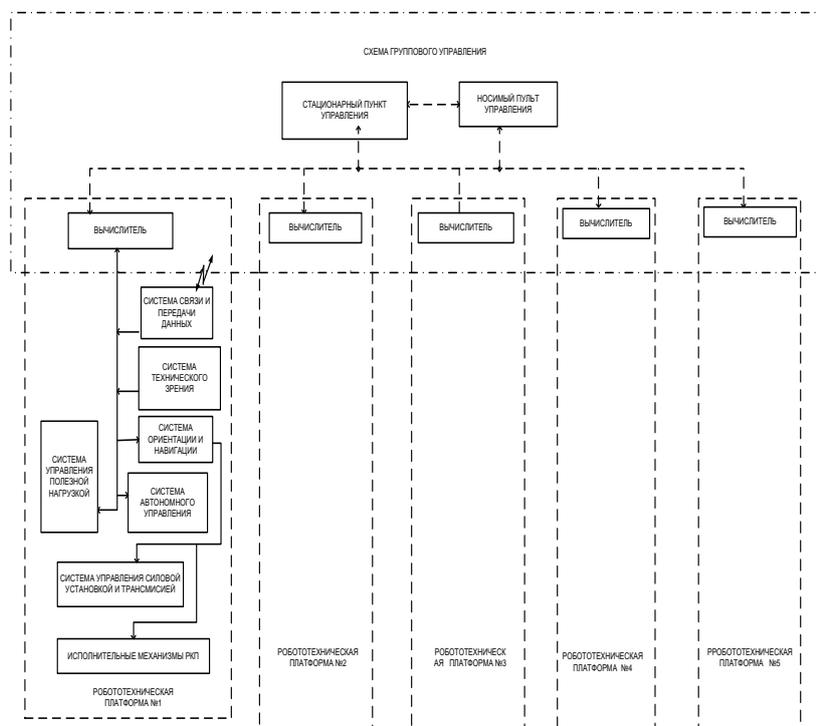


Рис. 2. Структурная схема системы группового управления РП

Роботизированная платформа в составе, которой должно быть оборудование:

- ◆ система ориентации и навигации СОН;
- ◆ система технического зрения СТЗ;
- ◆ система связи и передачи данных СПД;
- ◆ система управления полезной нагрузкой;
- ◆ системы автономного управления РТП;
- ◆ система управления силовой установкой и трансмиссией.

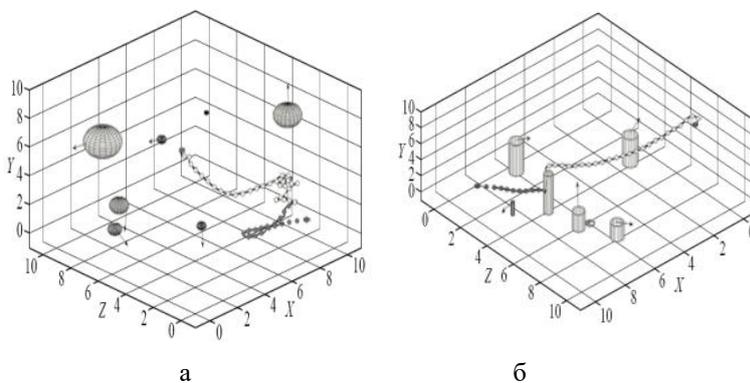
Каждая робототехническая платформа комплектуем бортовым вычислителем являющейся составной частью системы группового управления. Бортовой вычислитель позволяет перераспределить вычислительные ресурсы между ним и пультом управления.

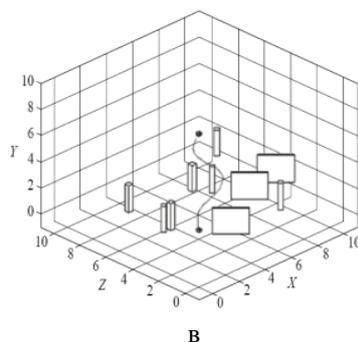
3. Экспериментальные исследования требуемой вычислительной мощности бортового вычислителя РП. В настоящее время наблюдается бурное развитие теории и методов группового функционирования роботизированных устройств. При проектировании таких систем предъявляются большие требования к вычислительным возможностям оборудования [9]. Как показано в работах [10-12] в условиях неопределенности, при применении нелинейных моделей синтез закона терминального управления становится очень сложной задачей. А для расчета оптимального пути и обхода препятствий РП, в работах [13-15] используется позиционное-траекторное управление и метод потенциальных полей. Проведены экспериментальные исследования с минимально возможной аппаратной конфигурацией бортового вычислителя, способной удовлетворить требованиям быстродействия программного обеспечения РП.

Для эксперимента выбраны методы [16], решающие задачи планирования траекторий перемещения одиночных РП в среде (пример рис. 2), с нестационарными препятствиями:

- ◆ метод виртуальных полей;
- ◆ метод на базе неустойчивых режимов;
- ◆ метод на базе неустойчивых режимов с интеллектуальным модулем;
- ◆ гибридные: VFC-метод, VVF-метод, и VFFL-метод;
- ◆ гибридный нейросетевой метод DVH3D-NN;
- ◆ базовый нейросетевой метод DVH3D;
- ◆ бионический метод интеллектуального планирования на базе нейроподобных структур.

Каждый из представленных методов оценивался объемом проводимых вычислений в единицу времени для решения задач планирования траекторий одиночных РП. Примеры конфигурации сред приведены на рис. 3:





В

Рис. 3. Примеры конфигурации сред а - VFC метода; б - VVF метода; в - DVH3D-NN метода

Полученные результаты экспериментального сравнения, характеризующего количество проведенных операций планирования траекторий за единицу времени 0,1 сек, представлены на диаграмме рис. 3.

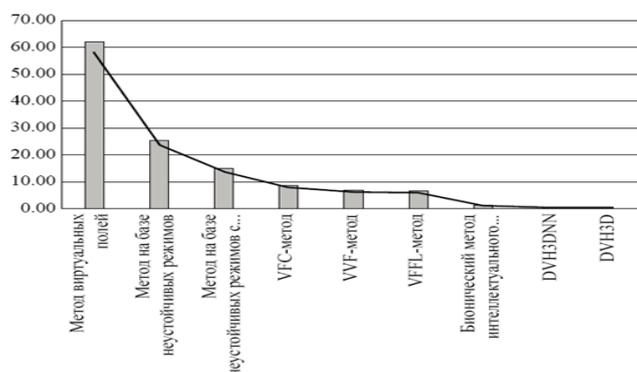


Рис. 4. Диаграмма количества проведенных операций планирования траекторий за 0,1 сек различными методами

Как показано на диаграмме, наибольшей вычислительной эффективностью обладает метод виртуальных полей.

Для управления РП выбран метод виртуальных полей. Экспертным путем определены необходимые вычисления и количество математических операций, выполняемых системой группового управления, что позволяет определиться, с мощностью применяемой ЭВМ и требуемыми характеристиками приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики бортового вычислителя системы группового управления

Характеристика	Значение
Платформа	Intel
Процессор	Intel(R) Core(TM) i7-7700
Число процессоров	1 (8 ядер)
Тактовая частота	3600 GHz
Оперативная память	32 Gb
Свободное дисковое пространство	200 Gb
Тип жесткого диска	SSD

Характеристикам табл. 1 удовлетворяет промышленная безвентиляторная встраиваемая малогабаритная ЭВМ Vecow ECS-9280.

4. Методика моделирования надежности системы. Систему группового управления расчленяется на отдельные на части так, чтобы для каждой можно определить показатели надежности, из этих частей конфигурируются структурные схемы - модели надежности системы.

Схема, расчлененной системы группового управления позволяет реализовать разные способы резервирования: холодное или горячее (целочисленное; скользящее; избыточное); мажоритарное резервирование.

Так как в составе системы группового управления есть два пульта управления и РП от одной до пяти, необходимо рассчитать показатели надежности для разных вариантов резервирования приведены в табл. 2, и обозначено О – основной, Р – резервный.

Таблица 2

Способы холодного резервирования РП

Резервирование	Структурная часть				
	РП	РП	РП	РП	РП
1. Структурное раздельное	РП	РП	РП	РП	РП
Целочисленное РП	О	Р	О	Р	-
	О	О	Р	Р	-
Скользящее РП	О	О	Р	-	-
	О	О	О	Р	
	О	О	О	Р	Р
	О	О	О	О	Р
Избыточное РП	О	Р	Р	-	-
	О	Р	Р	Р	-
	О	Р	Р	Р	Р
	О	О	Р	Р	Р
2. Общее всей системы	О	Р	-	-	-
	О	О	р	Р	-
	р	Р	О	О	О

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

Для моделирования надежности принимаем следующие допущения и предлагается следующая методика расчета.

1) РП равно надежны и полагаем, что вероятность отказа каждой РП и пультов носит экспоненциальный характер:

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

2) Строится структурная схема расчета надежности и классическим структурным методом для расчленённой сложной системы, элементы объединяются в группы $S1 \dots SN$:

- ◆ в группе $S1$ элементы стационарного пульта управления;
- ◆ в группе $S2$ элементы носимого пульта управления;
- ◆ в группе $SP11 \dots SP15$ элементы РП.

Любая группа элементов может быть, как в отключённом, так и в рабочем состоянии.

3) Для каждой группы $S1 \dots SN$ рассчитывается классическим структурным методом интенсивность отказов λ_{SN} , наработка на отказ T_{SN} и графики вероятности безотказной работы $P_{SN}(t)$ [17]:

$$\lambda_{SN} = \sum_{i=1}^n n_i \lambda_i, \quad T_{SN} = 1/\lambda_{SN}, \quad P(t) = e^{-\lambda t},$$

где n – число элементов в группе;

λ_i – интенсивность отказов элемента, с учетом режимов работы и условий эксплуатации;

SN – обозначение группы.

4) Далее для каждого варианта компоновки системы группового управления, матричным методом, рассчитывается матрица интенсивности отказов Λ_N и наработка на отказ T_N в ПО Mathcad.

$$\Lambda_N = \begin{pmatrix} \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & 0 & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & 0 \\ \lambda_{S1} & 0 & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & \lambda_{РП5} \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & 0 \\ 0 & \lambda_{S2} & \lambda_{РП1} & \lambda_{РП2} & \lambda_{РП3} & \lambda_{РП4} & \lambda_{РП5} \end{pmatrix} * 1 \quad \text{и} \quad T_N = [\Lambda_N]^{-1}$$

где $\lambda_{S1} \dots \lambda_{S2}$ – интенсивность отказов СПУ и НПУ;

$\lambda_{РП1} \dots \lambda_{РП5}$ – интенсивность отказов РП1... РП5.

Каждая строка матрицы соответствует определенной конфигурации системы группового управления с различным числом N от 1 до 5 рабочих РП.

Графики вероятности безотказной работы $P_N(t)$ для каждого количества работающих РП от 1 до 5 рассчитывают в ПО Mathcad по формуле

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{T_0}},$$

5) При холодном целочисленном резервировании РП, схемы: $N=1+1$; $2+2$ и избыточном резервировании схемы: $N=1+2$; $1+3$; $1+4$; $2+3$ определяют наработку на отказ T_{NS} по формуле, полученной вероятностным методом [18]:

$$T_{NS} = n * T_{S1},$$

где n – всего РП, основных и резервируемых в схеме.

Интенсивность отказов РП при холодном целочисленном и избыточном их резервировании рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{NS} = 1/T_{NS}.$$

6) При скользящем холодном резервировании T_{NS} , резервных РП меньше числа основных, и они находятся в выключенном состоянии. Резервная РП, может быть включена взамен любой из отказавших РП. Для схем резервирования $N=3+1$;

2+1; 4+1; 3+2; интенсивность отказов равна $n\lambda_{SI}$ и отказ системы произойдет в момент отказа $(m+1)$ -го РП, поэтому средняя наработка на отказ РП, полученная вероятностным методом, определяется по формуле [19]:

$$T_{NS} = (m+1) / n\lambda_{SI},$$

где T_{NS} – наработка на отказ всех РП при скользящем холодном резервировании; λ_{SI} – интенсивность отказов одной РП; n – основных РП; m – резервных РП.

Интенсивность отказов всех РП при скользящем холодном резервировании рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{NS} = I / T_{NS}.$$

7) Интенсивность отказов $\lambda_{N.X}$ системы в целом, при холодном резервировании, определяется как сумма интенсивности отказов пульта управления λ_{SI} , (λ_{S2}), который находится в рабочем состоянии, и интенсивности отказов РП:

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.IX}$ для схем $N=1+1$; 2+2 холодного целочисленного резервирования;

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.IX}$ для схем $N=1+2$; 1+3; 2+3 холодного избыточного резервирования;

$\lambda_{N.X} = \lambda_{SI} + \lambda_{SN.CX}$ схемы $N=3+1$; 2+1; 4+1; 3+2 холодного скользящего резервирования.

Аналогично эта задача решается в цикле и для носимого пульта управления.

8) Средняя наработка на отказ пультов управления с холодным резервированием с различными интенсивностями отказов определена вероятностным методом:

$$\lambda_{S1+S2} = \frac{\lambda_{S1} + \lambda_{S2}}{\lambda_{S1} * \lambda_{S2}}.$$

9) Нарботка на отказ при холодном общем резервировании всей системы группового управления рассчитывается для каждой схемы резервирования РП по формуле:

$$T_{N.X} = I / \lambda_{N.X}.$$

5. Численное моделирование надежности системы с разным числом РП без резервирования. Исходными данными для моделирования надежности системы группового управления является наработка на отказ структурных элементов и интенсивность отказов, приведенные в базе данных [20].

Для расчета надежности системы группового управления разработаны модели схем надежности системы группового управления без резервирования приведенные на рис. 3, число РП может быть от 1 до 5, пульт управления СПУ или НПУ.



Рис. 5. Модели надежности системы с разным числом РП

Используя формулы и приведенную методику в ПП «Mathcad» на ЭВМ выполнен расчет надежности системы группового управления. Результаты численных расчетов интенсивности отказов и наработки на отказ системы группового управления при работе с различным числом от 1 до 5 РП, без резервирования, представлены матрицами столбцами:

$$\Lambda_R = \begin{pmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \\ \Lambda_5 \\ \Lambda_{1Н} \\ \Lambda_{2Н} \\ \Lambda_{3Н} \\ \Lambda_{4Н} \\ \Lambda_{5Н} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 146,52 \cdot 10^{-6} \\ 151,05 \cdot 10^{-6} \\ 155,6 \cdot 10^{-6} \\ 160,14 \cdot 10^{-6} \\ 164,68 \cdot 10^{-6} \\ 156,61 \cdot 10^{-6} \\ 161,15 \cdot 10^{-6} \\ 165,69 \cdot 10^{-6} \\ 170,23 \cdot 10^{-6} \\ 174,77 \cdot 10^{-6} \end{pmatrix} \text{ 1/ч и } T_R = \begin{pmatrix} \Lambda_1 \\ \Lambda_2 \\ \Lambda_3 \\ \Lambda_4 \\ \Lambda_5 \\ \Lambda_{1Н} \\ \Lambda_{2Н} \\ \Lambda_{3Н} \\ \Lambda_{4Н} \\ \Lambda_{5Н} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_{1Н} \\ T_{2Н} \\ T_{3Н} \\ T_{4Н} \\ T_{5Н} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6\ 825,0 \\ 6\ 620,3 \\ 6\ 426,7 \\ 6\ 244,5 \\ 6\ 072,0 \\ 6\ 385,3 \\ 6\ 205,0 \\ 6\ 035,4 \\ 5\ 874,0 \\ 5\ 721,8 \end{pmatrix} \text{ (час).}$$

Графики вероятности безотказной работы системы группового управления, с числом от одной до пяти РП, без резервирования, показаны на рис. 3.

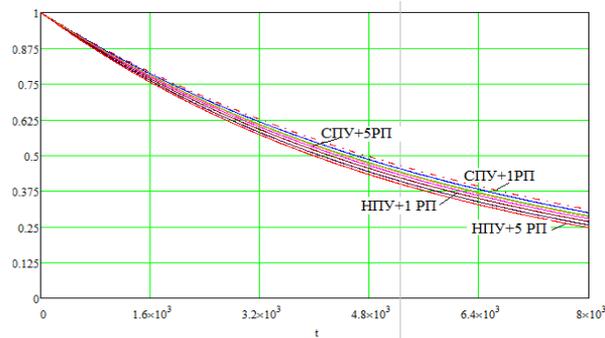
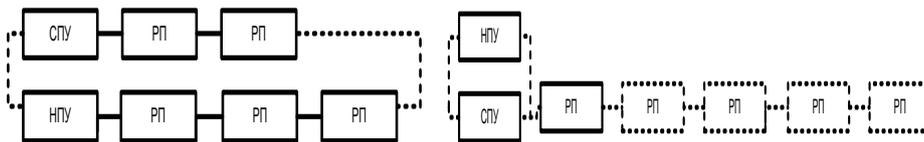
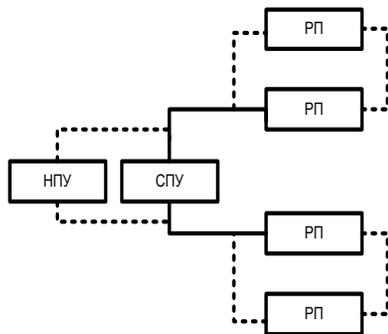


Рис. 7. Графики вероятности безотказной работы системы с РП в количестве от 1 до 5 без резервирования

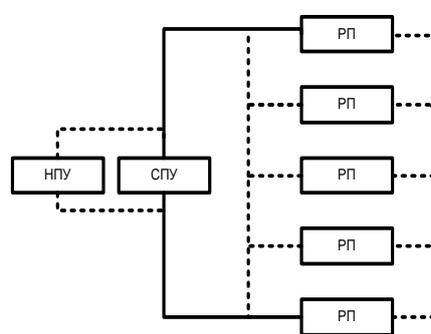
6. Численное моделирование надежности системы с холодным (ненагруженным) резервированием. Модели схем целочисленного, избыточного, скользящего резервирования структурных частей и в целом системы представлены на рис. 5.



а – модели общего и раздельного резервирования



б – целочисленное N=2+2



в – избыточное N=2+3

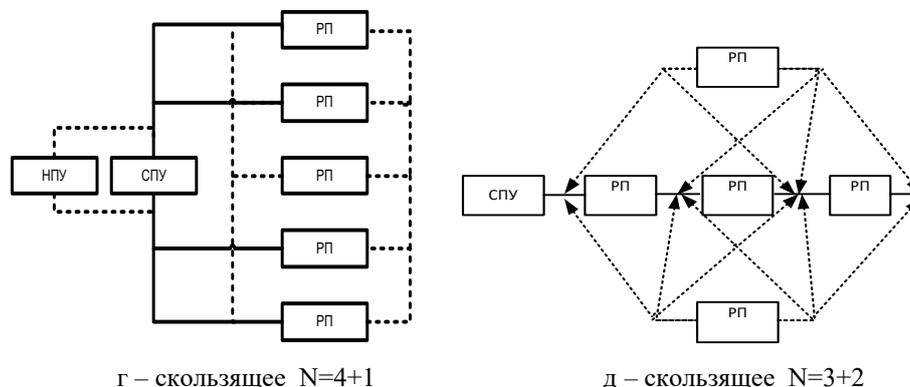


Рис. 6. Модели надежности холодного резервирования РП и пультов

Результаты моделирования интенсивности отказов и времени наработки на отказ системы группового управления со стационарным или носимым пультом управлением и разным числом РП от одной до пяти в миссии с холодным резервированием приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования надежности системы группового управления без резервирования

Параметр	Число РП				
	1	2	3	4	5
Интенсивность отказов РП, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	4,54	9,07	13,62	18,16	22,7
Интенсивность отказов СПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	141,98				
Интенсивность отказов РП+СПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	146,52	151,05	155,6	160,14	164,68
Наработка на отказ РП+СПУ, час	6 825	6620,32	6 426,74	6 244,54	6 072,38
Интенсивность отказов НПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	152,07				
Интенсивность отказов РП+НПУ, $\cdot 10^{-6}$ 1/ч	156,61	161,15	165,69	170,23	174,77
Наработка на отказ РП+ НПУ, Т, час	6 385,3	6205,4	6035,4	5874,4	5721,8

Среднее время безотказной работы стационарного пульта управления $T_{СПУ} = 7043,25$ час, а носимого пульта управления $T_{НПУ} = 6 570$ час. Носимый пульт управления может работать без подзарядки 13 часов, после чего требуется 3 часа зарядки.

Результаты моделирования надежности при холодном целочисленном, избыточном, скользящем резервировании РП, для n основных и m резервных РП, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Наработка на отказ при холодном резервировании РП

Параметр	Целочисленное		Избыточное РП			Скользящее РП		
	1+1	2+2 1+3	1+2	1+4 2+3	1+3	2+1 3+2	3+1	4+1
Наработка на отказ, час*10 ³	441	882	662	1 103	882	220	147	110

Графики наработки на отказ, при холодном целочисленном, избыточном, скользящем резервировании РП, для n основных и m резервных РП, показаны на рис. 7.

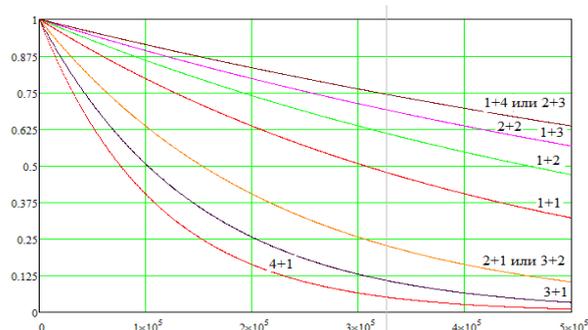


Рис. 7. Графики вероятности безотказной при холодном резервировании РП

Результаты численного моделирования надежности системы группового управления при холодном общем резервировании системы, при котором РП разделены на две группы, одна управляется с СНП, а другая с НПУ (схема рис. 6,а) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Наработка на отказ, группы основной СПУ+РП и резервной НПУ+РП холодного общего резервирования системы

Параметр	Сема общего холодного резервирования			
	(СПУ+1РПУ)/ (НПУ+1РПУ)	(СПУ+2РПУ)/ (НПУ+2РПУ)	(СПУ+3РПУ)/ (НПУ+2РПУ)	(СПУ+2РПУ)/ (НПУ+3РПУ)
Наработка на отказ, час	13 210,3	12 825,7	12 655,7	12 632,1

Заключение. Разработанная схема системы группового управления обеспечивает высокие параметры надежности в различных режимах и позволяет широко использовать: изменение принципов функционирования; изменение структуры за счет ее большой гибкости. Экспериментально определен метод управления и параметры вычислителя РП.

Предложенная методика комбинирования вероятностного, классического структурного и матричного методов расчета параметров надежности расчлененной структуры, позволяет наглядно и однозначно определять параметры надежность системы группового управления. Подтверждена возможность двукратного повышения надежности системы группового управления посредством холодного резервирования и показано, что наработка на отказ существенно зависит от конфигурации системы и ее миссии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В.И. Сырямкина. – Томск: STT, 2018. – 140 с.
2. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks // *Neurocomputing*. – 2016. – Vol. 292. – P. 292-321.
3. *Francesca G., Birattari M.* Automatic design of robot swarms: Achievements and challenges // *Frontiers Robotics AI*. – 2016. – Vol. 3 (1).
4. *Rizk Y., Awad M., Tunstel, E.W.* Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey // *ACM Computing Surveys Volume*. – 2019. – Vol. 52 (2).
5. *Yu J., Ji J., Miao Z., Zhou J.* Neural network-based region reaching formation control for multi-robot systems in obstacle environment // *Neurocomputing*. – 2019. – Vol. 333. – P. 11-21.
6. *Agrawal P., Agrawal H.* Adaptive algorithm design for cooperative hunting in multi-robots // *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. – 2018. – Vol. 10 (12). – P. 47-55.
7. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физмат, 2009.
8. *Зенкевич С.Л.* Принципы построения систем управления роботами // *Робототехнические системы и автоматическое управление: Межвуз. сб. научн. тр.* – М.: МИРЗА, 1985.
9. *Ivanov D.Ya.* Distribution of roles in groups of robots with limited communications based on the swarm interaction // *Procedia Comput. Sci.* – 2019. – Vol. 150. – P. 518-523.
10. *Yiguang Hong, Guowu Yang, Daizhan Cheng, Sarah Spurgeon.* A New Approach To Terminal Sliding Mode Control Design // *Asian Journal of Control*. – June 2005. – Vol. 7, Issue 2. – P. 177-181.
11. *Wang Shikai, Jin Hongzhang, Meng Lingwei.* Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). – 2016. – P. 6833-6837. – DOI: 10.1109/CCDC.2016.7532229.
12. *Pshikhopov V.K., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V.* Position-trajectory system of direct adaptive control marine autonomous vehicles. Authors of Document 2014 the 4th International Workshop on Computer Science and Engineering - Summer, WCSE 2014.
13. *Pshikhopov V.* Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments // eBook ISBN: 9780128123065, Paperback ISBN: 9780128123058, Imprint: Butterworth-Heinemann, 1st February 2017. – 312 p.
14. *Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A.* Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 21 Number 2015. – Vol. 10. – P. 41954-41961. – ISSN 0973-4562.
15. *Denis Belogalov, Valeriy Finaev, Mikhail Medvedev, Igor Shapovalov, Victor Soloviev.* Decentralized Control of a Group of Robots Using Fuzzy Logic // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – No. 12 (9). – P. 2492-2498.
16. *Казakov К.А., Семенов В.А.* Обзор современных методов планирования движения // *Тр. ИСП РАН*. – 2016. – Т. 28. – Вып. 4. – С. 241-294.
17. *Вережкина Л.С., Алпатова О.В., Вережкин А.Л.* Стадии разработки и уровни расчета надежности // *Всемирный технологический университет ЮНЕСКО. Московский технологический институт: Матер. международного форума*. – Вып. 2. «Человек в современном мире». – Ростов-на-Дону: Гинго, 2014. – С. 308-312.
18. https://studopedia.ru/14_58030_raschet-nadezhnosti-sistem-rezervirovaniem.html.
19. http://libraryno.ru/5-raschet-harakteristik-nadezhnosti-nevosstanavlivaemyh-rezervirovannyh-izdeliy-teor_nadejnosti/:
20. *Болдырев А.С., Вережкина Л.С., Вережкин А.Л.* Надежность компонентов многофункциональных, робототехнических и автоматизированных систем. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2019621637 от 09.09.2019.

REFERENCES

1. Kollektivny intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya [Teams of intelligent robots. Scope of application], by ed. V.I. Syryamkina. Tomsk: STT, 2018, 140 p.
2. *Bayindir L.* A review of swarm robotics tasks, *Neurocomputing*, 2016, Vol. 292, pp. 292-321.
3. *Francesca G., Birattari M.* Automatic design of robot swarms: Achievements and challenges, *Frontiers Robotics AI*, 2016, Vol. 3 (1).
4. *Rizk Y., Awad M., Tunstel, E.W.* Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey, *ACM Computing Surveys Volume*, 2019, Vol. 52 (2).

5. Yu J., Ji J., Miao Z., Zhou J. Neural network-based region reaching formation control for multi-robot systems in obstacle environment, *Neurocomputing*, 2019, Vol. 333, pp. 11-21.
6. Agrawal P., Agrawal H. Adaptive algorithm design for cooperative hunting in multi-robots, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2018, Vol. 10 (12), pp. 47-55.
7. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Models and algorithms of collective management in robot groups]. Moscow: Fizmat, 2009.
8. Zenkevich S.L. Printsipy postroeniya sistem upravleniya robotami [Principles of building robot control systems], *Robototekhnicheskie sistemy i avtomaticheskoe upravlenie: Mezhdvuz. sb. nauchn. tr.* [Robotic systems and automatic control: Intercollegiate collection of scientific papers]. Moscow: MIRZA, 1985.
9. Ivanov D.Ya. Distribution of roles in groups of robots with limited communications based on the swarm interaction, *Procedia Comput. Sci.*, 2019, Vol. 150, pp. 518-523.
10. Yiguang Hong, Guowu Yang, Daizhan Cheng, Sarah Spurgeon. A New Approach To Terminal Sliding Mode Control Design, *Asian Journal of Control*, June 2005, Vol. 7, Issue 2, pp. 177-181.
11. Wang Shikai, Jin Hongzhang, Meng Lingwei. Trajectory tracking for underactuated UUV using terminal sliding mode control 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2016, pp. 6833-6837. DOI: 10.1109/CCDC.2016.7532229.
12. Pshikhopov V.K., Fedotov A.A., Medvedev M.Yu., Medvedeva T.N., Gurenko B.V. Position-trajectory system of direct adaptive control marine autonomous vehicles. Authors of Document 2014 the 4th International Workshop on Computer Science and Engineering - Summer, WCSE 2014.
13. Pshikhopov V. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments, eBook ISBN: 9780128123065, Paperback ISBN: 9780128123058, Imprint: Butterworth-Heinemann, 1st February 2017, 312 p.
14. Soloviev V.V., Pshikhopov V.K., Shapovalov I.O., Finaev V.I., Beloglazov D.A. Planning of the mobile robot motion in non-deterministic environments with potential fields method, *International Journal of Applied Engineering Research*, 21 Number 2015, Vol. 10, pp. 41954-41961. ISSN 0973-4562.
15. Denis Belogal'zov, Valeriy Finaev, Mikhail Medvedev, Igor Shapovalov, Victor Soloviev. Decentralized Control of a Group of Robots Using Fuzzy Logic, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, No. 12 (9), pp. 2492-2498.
16. Kazakov K.A., Semenov V.A. Obzor sovremennykh metodov planirovaniya dvizheniya [Review of modern traffic planning methods], *Tr. ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2016, Vol. 28, Issue 4, pp. 241-294.
17. Verevkin A.L., Alpatova O.V., Verevkin A.L. Stadii razrabotki i urovni rascheta nadezhnosti [Stages of development and levels of reliability calculation], *Vsemirnyy tekhnologicheskii universitet YuNESKO. Moskovskiy tekhnologicheskii institut: Mater. mezhdunarodnogo foruma* [UNESCO world University of technology. Moscow Institute of technology. Materials of the international forum]. Vyp. 2. «Chelovek v sovremennom mire» [Issue 2. "Man in the modern world"]. Rostov-on-Don: Gingo, 2014, pp. 308-312.
18. Available at: https://studopedia.ru/14_58030_raschet-nadezhnosti-sistem-rezervirovaniem.html.
19. Available at: http://libraryno.ru/5-raschet-harakteristik-nadezhnosti-nevosstanavlivaemyh-rezervirovannyh-izdeliy-teor_nadezhnosti/.
20. Boldyrev A.S., Verevkin A.L., Verevkin A.L. Nadezhnost' komponentov mnogofunktsional'nykh, robototekhnicheskikh i avtomatizirovannykh sistem. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh №2019621637 ot 09.09.2019 [Reliability of components of multifunctional, robotic and automated systems. Certificate of state registration of the database no. 2019621637 dated 09.09.2019].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.И. Матвеев.

Болдырев Антон Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел. +78634371634; Институт радиотехнических систем и управления; к.т.н.; директор.

Веревкин Александр Леонидович – e-mail: verevkin.a@mail.ru; кафедра летательные аппараты; аспирант.

Пшихопова Карина Вячеславовна – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко 2; тел. +78634371694; НИИ Робототехники и процессов управления; инженер.

Веревкина Лина Станиславовна – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и механики; к.т.н.; доцент.

Boldyrev Anton Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: boldyrev@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; Institute of Radio Engineering Systems and Control; cand. tng. sc.; director.

Verevkin Alexander Leonidovich – e-mail: verevkin.a@mail.ru; the department of aircraft; graduate student.

Pshikhopova Karina Vyacheslavovna – e-mail: pshihopova@yandex.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371694; Research Institute of Robotics and Control Processes; engineer.

Verevkina Lina Stanislavovna – e-mail: lverevkina@sfnedu.ru; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand/ uf eng. sc.; associate professor.

УДК 629.735.4

DOI 10.18522/2311-3103-2020-3-29-39

О.Ю. Воронков

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «ЛЕТАЮЩЕЙ ПЛАТФОРМОЙ»

Работа посвящена синергетическому синтезу асимптотического наблюдателя гармонических возмущений для иерархической системы управления летательным аппаратом. Статья содержит общее описание вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» и асимптотического наблюдателя внешних возмущающих воздействий (например, ветровых), изменяющихся по гармоническому закону и приводящих к периодическим изменениям высоты полёта, а также углов тангажа и крена. Асимптотический наблюдатель должен обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы, выполнение технологических инвариантов, оценку ненаблюдаемых внешних воздействий по текущим значениям наблюдаемых координат состояния и поглощение гармонических ветровых возмущений. Также в статье приведена расширенная математическая модель «летающей платформы» в режиме вертикального движения в условиях внешних гармонических возмущающих воздействий, включающая математическое описание динамики возмущений, и на основе заданных технологических инвариантов синтезированы алгоритмы управления верхнего уровня иерархии. Кроме этого, проведён расчёт уравнений асимптотического наблюдателя возмущающих воздействий, которыми дополняется математическая модель «летающей платформы» в условиях возмущённого движения, и уравнений для асимптотических оценок ненаблюдаемых переменных, в дальнейшем включаемых в законы управления верхнего уровня иерархии. Возможность синтеза наблюдателя возмущений проверена с помощью критерия наблюдаемости. Наконец, показаны результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики верхнего и нижнего уровней иерархии в условиях возмущённого движения с подавлением внешних возмущений асимптотическим наблюдателем, а также результаты компьютерного моделирования нелинейной динамики аппарата в условиях возмущённого движения без асимптотического наблюдателя для возможности наглядной оценки качества работы наблюдателя путём сравнения. Актуальность работы состоит в необходимости создания вертикально взлетающего аппарата типа «летающая платформа» для повышения эффективности спасения людей из зон бедствий, где вертолёты и другие современные средства не справляются с задачами. Научная новизна работы заключена в применении синергетических подходов к разработке системы балансировки пространственного положения аппарата, оснащённой асимптотическим наблюдателем для подавления возмущающих воздействий.

«Летающая платформа»; вентилятор в кольце; синергетическая теория управления; гармонические возмущения; асимптотический наблюдатель.