



УДК 629.7.05
ГРНТИ 59.03.13

СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗОВ В ДУБЛИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

А.В. БРЯЗГУНОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

М.Ф. ВОЛОБУЕВ, кандидат технических наук, доцент

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье разработан способ обнаружения внезапных отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» в дублированных системах. Способ основан на контроле выходных параметров, которые изменяется скачкообразно при наступлении внезапных отказов. С использованием математического моделирования проведена оценка эффективности обнаружения внезапных отказов в дублированной системе.

Ключевые слова: дублированная система; внезапный отказ; контроль выходных параметров; резервирование.

METHOD FOR DETECTING SUDDEN FAILURES IN FAIL-OPERATIVE SYSTEM SYSTEMS

A.V. BRYAZGUNOV

MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

M.F. VOLOBUEV, Candidate of technical sciences, Associate Professor

MESC AF "N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy" (Voronezh)

The article developed a method for detecting sudden failures such as "open circuit" and "short circuit" in fail-operative system. The method is based on controlling the output parameters, which change abruptly in the event of sudden failures. Using mathematical modeling the detecting sudden failures efficiency in a duplicated system was evaluated.

Keywords: fail-operative system; sudden failure; output parameters monitoring; reservation.

Введение. Как известно, постоянное резервирование в первую очередь направленно на устранение последствий внезапных отказов типа «обрыв цепи» или «короткое замыкание» [1], которые во временной области представляют в виде $\delta(t)$ – дельта функции, а интенсивность отказов – константа. Обнаружению таких отказов в системах, содержащих три канала, посвящено множество работ [2-5], в которых с высокой эффективностью обнаруживаются отказы одного из каналов. Разработаны устройства обнаружения отказов, управления и восстановления работоспособности трехканальных систем с использованием контроля по пороговой величине [6-7], позволяющие системе с тремя каналами функционировать при отказе двух из них.

Актуальность. В настоящее время для повышения надежности бортовых систем беспилотных летательных аппаратов применяют резервирование с минимальным числом резервных каналов (дублирование), что обусловлено массовыми и габаритными ограничениями. Однако обнаружение отказов в дублированной системе существенно отличается от обнаружения отказов в системах с двумя и более резервными каналами. Так, когда параметры выходных сигналов неизвестны ни до наступления отказа, ни после его наступления, невозможно определить какой из каналов отказал, что приводит к



необходимости отключать оба канала. Однако у внезапных отказов типа «обрыв цепи» или «короткое замыкание» имеется скачкообразное изменение выходных сигналов, что является признаком, позволяющим локализовать отказавший канал. Для локализации отказавшего канала в дублированных системах необходимо сформировать сигналы оповещения, которые в дальнейшем будут использоваться для её реконфигурации.

Цель работы – разработка способа обнаружения внезапных отказов типа «обрыв цепи» и «короткое замыкание» в дублированных системах, а также модели устройства обнаружения отказов для оценки эффективности предложенного способа.

Рассмотрим вопросы формирования сигналов оповещения об отказе элементов в двухканальных резервированных системах на основе применения элементов аналоговой и цифровой техники (аналоговых и цифровых микросхем).

В работах [2,4,5] рассмотрено обнаружение отказов на основе сравнения рабочей системы со среднеарифметическим значением выходных параметров нескольких систем. Условием отказа системы в этом случае считается ситуация, когда отклонение выходного параметра системы X от математического ожидания m_x (истинного значения)

превышает допустимый предел $|X - m_x| = \overset{\circ}{X} > \Delta$. Использование в качестве оценки математического ожидания случайной величины средней арифметической величины наблюдаемых значений представляется наиболее предпочтительным, так как такая оценка является состоятельной и несмещенной, а при нормальном распределении случайной величины (наиболее часто встречаемом на практике) также и наиболее эффективной [5]. Обнаружитель содержит рабочий элемент (РЭ) и несколько элементов сравнения (ЭС), входы которых подключены к входу РЭ, а выходы к входу суммирующего устройства (СУ), к входу которого подключен также выход РЭ. Сигнал с выхода СУ подается на умножитель, где умножается на число обратное сумме $(n+1)$, где n -число ЭС и далее поступает вход вычитающего устройства (ВУ), ко второму входу которого подключен выход РЭ. На выходе ВУ формируется сигнал, равный разности выходного параметра РЭ и математического ожидания выходных параметров системы РЭ и n ЭС, несущий информацию об отказе.

Такому обнаружителю отказов присущи следующие недостатки: отсутствует возможность идентификации таких типов внезапных отказов (сбоев) как скачки значений выходного параметра системы вверх или вниз относительно среднего значения; вероятностные характеристики обнаружения существенно зависят от числа систем сравнения, чем их больше, тем лучше вероятностные характеристики обнаружения [5].

Предложенный в [6,7] подход к обнаружению внезапных отказов в трехканальных системах, может быть применен и для обнаружения отказов типа «обрыв цепи» или «короткое замыкание» в двухканальных системах. Устройство обнаружения таких отказов в двухканальной системе должно включать новые каналы фиксации направления скачков параметров рабочего канала (РК), запасного канала (ЗК) и средства их преобразования и коммутации: два вычитающих устройства (ВУ), три пороговых устройства (ПУ), два логических элемента «НЕ», логический элемент «И» и устройство реконфигурации системы. Структурная схема устройства обнаружения отказов в дублированной системе представлена на рисунке 1.

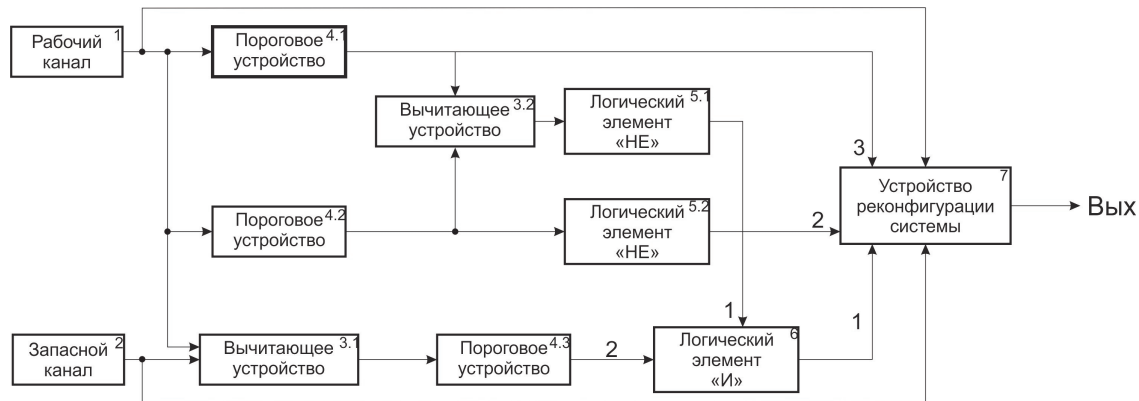


Рисунок – 1 Структурная схема устройства обнаружения отказов в дублированной системе

В устройстве обнаружения отказов, представленном на рисунке 1, вычитающие устройства 3.1, 3.2 могут быть выполнены в виде типового сумматора на интегральной микросхеме (ИМС) прецизионного операционного усилителя (ОУ) КМ551УД1А [4,6]. Пороговые устройства 4.1-4.3 – на ИМС К155ТЛ1 или К554СА2 по схеме триггера Шмитта или компаратора соответственно [6]. Логические схемы «НЕ» (отрицания) 5.1 и 5.2, могут быть выполнены в виде типовых инверторов на цифровых ИМС, например на ИМС К155ЛН1, логические схемы И 6.1 и 6.2 – на типовых цифровых ИМС, например ИМС К155ЛИ5, а устройство реконфигурации системы (УРС) на простейшем микроконтроллере PIC16F628 [8].

В работах [2,4,5] также рассмотрено обнаружение отказов, основанное на принципе мажоритарной логики (принципе выбора по большинству). Этот принцип широко используется для обнаружения внезапных и постепенных отказов в системах резервирования путем выборки из множества. В этом случае состояние рабочей системы сравнивается с состоянием ряда таких же систем. Признаком безотказности рабочей системы является совпадение её состояния с состоянием большинства систем. Считается, что состояния рабочей и i -й системы сравнения одинаковы, если разность их выходных параметров меньше ε : $|X - X_i| = \left| \overset{\circ}{X} - \overset{\circ}{X}_i \right| = |Z_i| < \varepsilon$, где ε – произвольная положительная величина (абсолютное значение порога сравнения).

Формирование сигналов, содержащих информацию о таких отказах (сбоях), как скачки параметров рабочего элемента системы вверх (типа короткого замыкания) производится с использованием РК, первого ПУ, на выходе которого создаётся положительный импульс, если выходной параметр РК превысил верхнюю границу допустимого предела изменения параметра Δ , и УРС, на третий вход которого поступает импульс с первого порогового устройства.

Сигналы, содержащие информацию о таких отказах (сбоях), как скачки параметров РК вниз (типа обрыв соединения) формируются с использованием РК, второго ПУ, первого элемента «НЕ» и УРС на второй вход которого поступает положительный импульс с первого элемента «НЕ». При этом на выходе второго ПУ создаётся отрицательный импульс, если выходной параметр РК вышел за нижнюю границу допустимого предела изменения параметра Δ .

С использованием РК, ЗК, двух ВУ, трех ПУ, второго элемента «НЕ», логического элемента «И» и УРС, на первый вход которого поступают положительные импульсы с логического элемента «И» формируется сигнал, несущий информацию только о факте



отказа какого-либо элемента резервированной системы (РК или ЗК), так как порог сравнения ε может быть превышен как в случае отказа ЗК.

На рисунке 2 приведена временная диаграмма функционирования устройства обнаружения отказа с использованием контроля по пороговой величине.

Рассмотрим работу устройства обнаружения отказов в двухканальной резервированной системе. Рабочий канал 1 и запасной канал 2 работают одновременно (так называемый нагруженный резерв). Сигнал с выхода РК U_{PK} (случайная реализация сигнала) подается на вход ВУ 3.1, на другой вход поступает сигнал с ЗК ($U_{ЗК}$), а также на входы ПУ 4.1 и 4.2. Пороговое устройство 4.1 имеет порог срабатывания U_{BC} и порог отключения U_{BO} , которые определяют верхнюю границу допустимого отклонения параметра рабочего канала, а пороговое устройство 4.2 – пороги U_{HC} и U_{HO} , определяющие нижнюю границу допустимого отклонения параметра РК. На выходе ВУ 3.1 формируется сигнал $U_{BV1} = U_{PK} - U_{ЗК}$, который поступает на ПУ 4.3. При превышении этими сигналами порога сравнения ε , на выходе ПУ 4.3 формируются импульсы высокого уровня U_{OC} (логическая единица). Этот импульс подается на второй вход логического элемента «И» 6.1. Сам по себе импульс несет информацию только о наличии отказа в системе, т. е. о том, что отказал либо РК, либо ЗК. Если произошел отказ РК, то при превышении значением параметра РК пределов допустимого отклонения Δ вверх на выходе ПУ 4.1 формируется положительный скачок единичной амплитуды $U_{ПВкз}$, а при снижении ниже Δ – в пороговом устройстве 4.2, отрицательный скачок $U_{ПВоб}$, поступающие на первый и второй входы ВУ 3.2. На выходе этого вычитающего устройства 3.2 формируется последовательность единичных импульсов U_{BV2} , которая после инвертирования (отрицания) элементом «НЕ» 5.2 ($U_{НЕ2}$) подается на первые входы логического элемента «И». С выхода элемента «И» импульсы поступают на первый вход устройства реконфигурации системы, и несут информацию о наличии факта отказа в системе.

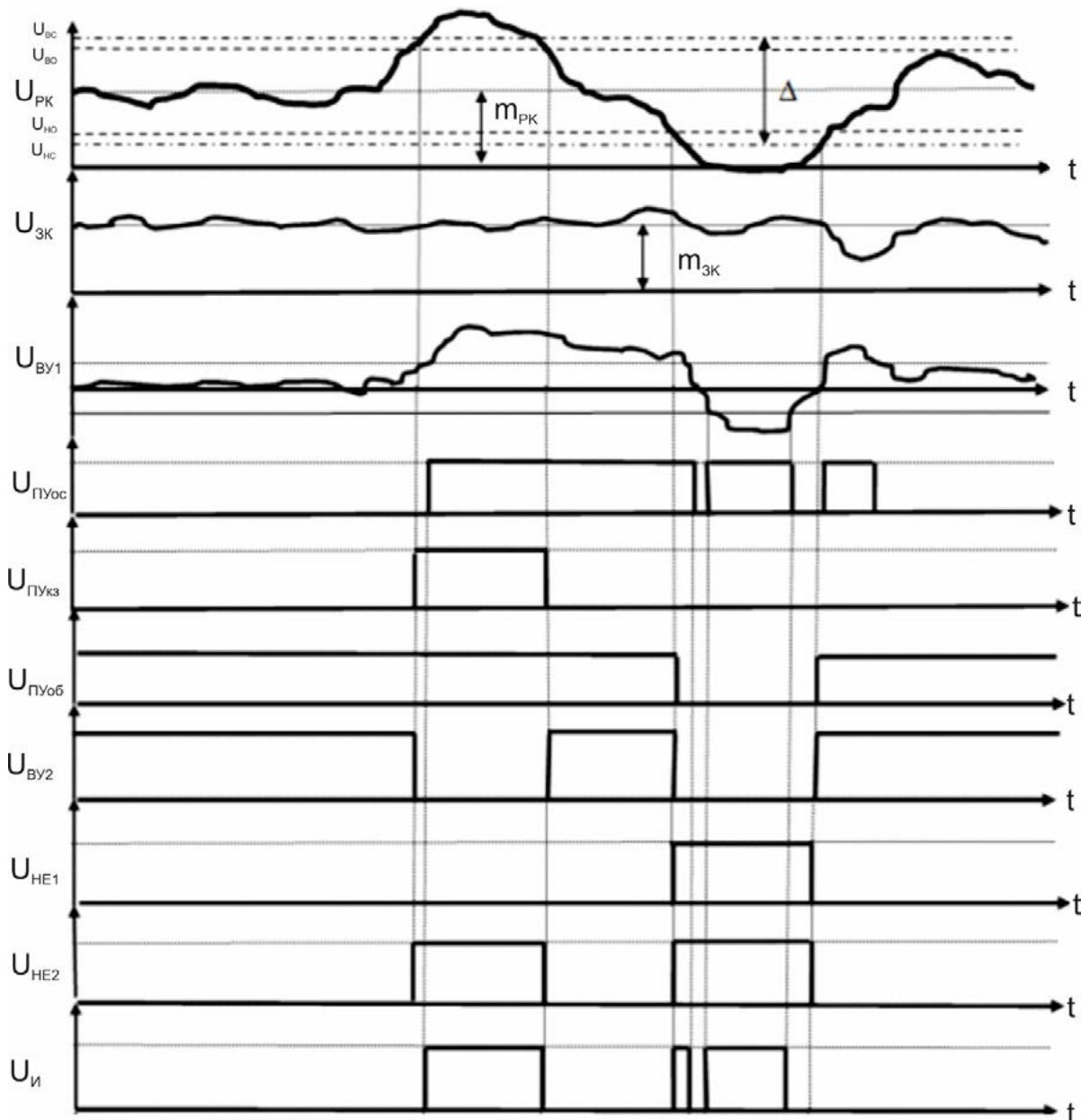


Рисунок 2 – Временная диаграмма функционирования устройства обнаружения отказов

Положительные импульсы с выхода ПУ 4.1 поступают на второй вход УРС и индицируются как отказы рабочего канала типа «короткое замыкание», то есть, как скачок параметра РК вверх.

Импульсы с элемента «НЕ» 5.1 подаются на второй вход УРС 7 и воспринимаются устройством реконфигурации системы, как отказы типа «обрыв соединения», то есть как скачок параметра РК вниз.

Таким образом, во время функционирования резервированной системы на устройство реконфигурации системы поступают импульсы описывающие состояние системы: с логического элемента «И» информация о наличии или отсутствии отказа в системе; с логического элемента «НЕ» 5.1 информация о наличии или отсутствии отказа типа «обрыв цепи» в рабочем канале; с порогового устройства 4.1 о наличии или отсутствии отказа типа «короткое замыкание» в рабочем канале.

Разработанное устройство обнаружения отказов обеспечивает возможность локализации отказавшего канала в двухканальной резервированной системе при наступ-



лении таких отказов, как «короткое замыкание» и «обрыв цепи». Для исследования статических характеристик устройства обнаружения отказов на основе структурной схемы, представленной на рисунке 1 было проведено математическое имитационное моделирование процесса его функционирования с использованием пакета прикладных программ (ППП) *Mathcad*, а также машинное макетирование предполагаемого устройства с использованием расширения *Simulink* ППП *MATLAB*. С их использованием были оценены вероятности обнаружения отказов предлагаемым устройством обнаружения, пороговые устройства которого построены на базе триггера Шмитта, а логические элементы НЕ, И, ИЛИ на ИМС 155 серии [6]. При этом в качестве характеристик устройства обнаружения рассматривались относительная ширина порога допустимых изменений параметров Δ/σ и относительная ширина порога обнаружения отказов в исследуемом устройстве ε/σ .

Для исследования статистических характеристик устройства обнаружения отказов на основе структурной схемы, представленной на рисунке 1, было проведено математическое имитационное моделирование процесса его функционирования с использованием пакета прикладных программ (ППП) *Mathcad*, а также машинное макетирование предлагаемого устройства с использованием расширения *Simulink* ППП *MATLAB*. С их использованием были оценены вероятности обнаружения отказов предлагаемым устройством обнаружения, пороговые устройства которого построены на базе триггера Шмитта, а логические элементы НЕ, И, ИЛИ на ИМС 155 серии [8]. При этом в качестве характеристик устройства обнаружения рассматривались относительная ширина порога допустимых изменений параметров Δ/σ и относительная ширина порога обнаружения отказов в исследуемом устройстве ε/σ .

При статистическом моделировании функционирования рассматриваемого устройства обнаружения отказов в резервированной системе выходной сигнал РЭ представлялся нестационарным случайным процессом, имеющим нормальное распределение с переменными значениями математического ожидания и СКО, соответствующими состояниям устойчивой работы и отказам типа «короткое замыкание» и «обрыв цепи». Значения порогов обнаружения изменения параметров РК в верх и в низ выбирались соответственно равными $U_B = m_{PK} + 3 \cdot \sigma_{PK}$ и $U_H = m_{PK} - 3 \cdot \sigma_{PK}$, где m_{PK} , σ_{PK} - математическое ожидание выходного сигнала рабочего канала без отказов и среднеквадратичное отклонение (СКО) выходного сигнала РК соответственно.

Работа устройства обнаружения отказов исследовалась в два этапа: на первом этапе оценивались вероятностные характеристики идеальной резервированной системы с замещением; на втором этапе моделировалось функционирование предложенного устройства обнаружения отказов в двухканальной резервированной системе.

При условии одинаковой вероятности безотказной работы каждого канала, вероятность безотказной работы идеальной двухканальной системы с замещением рассчитывается с помощью следующего выражения:

$$P_{БРС} = 1 - (1 - P_{отк})^2, \quad (1)$$

где – $P_{отк}$ – вероятность отказа канала.

Результаты расчетов и моделирования приведены на рисунке 3, где представлены значения вероятностей безотказной работы системы при различных соотношениях Δ/σ и ε/σ .

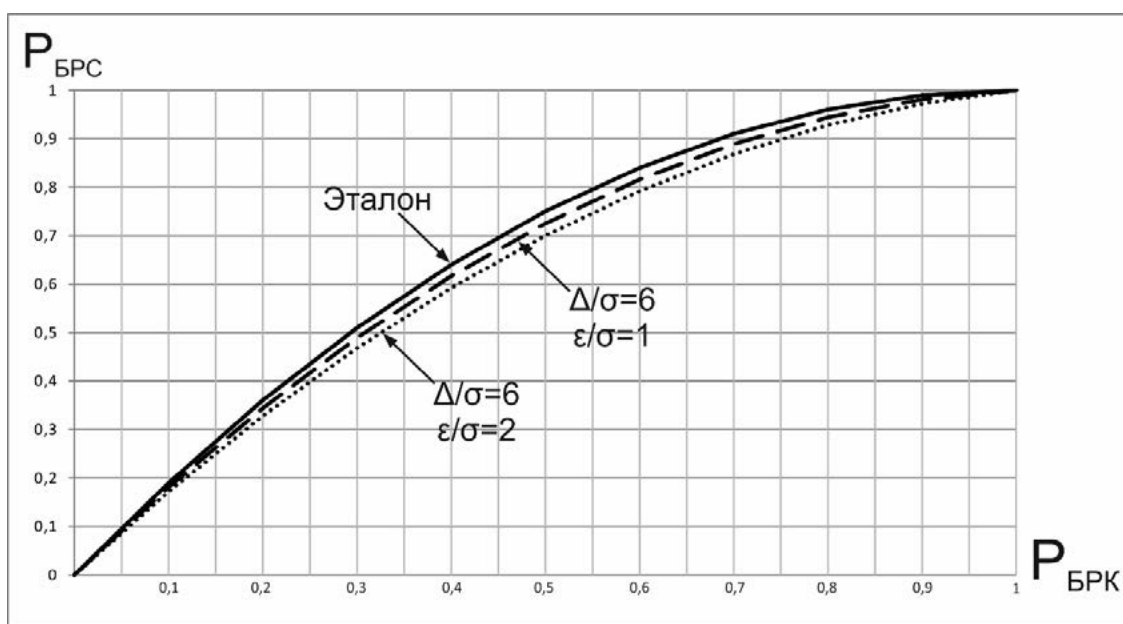


Рисунок 3 – Зависимость вероятности безотказной работы системы от вероятности безотказной работы канала при различных соотношениях Δ/σ и ϵ/σ

Анализ полученных результатов показывает, что описанное выше устройство позволяет с высокой вероятностью (0.9-0.95) обнаруживать и идентифицировать такие отказы рабочего элемента как скачки его выходных параметров вверх типа «короткого замыкания» или вниз типа «обрыв цепи».

Выводы. Таким образом, рассмотренное устройство, реализующие способ обнаружения внезапных отказов позволяет:

- повысить безотказность дублированной бортовой системы управления полетом БЛА в условиях наступления внезапных отказов типа «короткого замыкания» и «обрыв цепи»;
- повышать безотказность широкой номенклатуры резервированных систем за счет выбора и установки соответствующих предельных границ (порогов) допустимого изменения параметров рабочего канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотова Т.М., Кербников Ф.И., Розенблат М.А. Резервирование аналоговых устройств автоматики // Москва: Энергия, 1975, 127 с.
2. Белгородский С.Л. Автоматизация управления посадкой самолета // Москва: Транспорт, 1972, 352 с.
3. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета показателей надежности технических систем // Москва: Издательство ЛЕНАНД, 2014, 254 с.
4. Оболенский Ю.Г. Управление полетом маневренных самолетов // Москва: филиал Воениздат, 2007, 480 с.
5. Шевцов Г.А., Шермет Е.М. Логическое резервирование // Львов: Издательство Львовского университета. 1973, 130 с.
6. Волобуев М.Ф., Замыслов М.А. и др. Устройство обнаружения отказов в резервированной системе Патент №2487389 РФ, МПК С2, G05В 23/02, G01R 31/02, опубл. 10.07.2013, бюл. №19, 16 с.



7. Волобуев М.Ф., Замыслов М.А. и др. Устройство управления резервированной с помощью мажоритарных элементов системой. Патент №2451995 РФ, МПК С1, G06F 15/00, опубл. 27.05.2012, бюл. №15, 23с.

8. Волобуев М.Ф., Мальцев А.М., Соколов И.В. Экспериментальные исследования макета резервированной системы, управляемой нечетким контроллером // Информационные технологии. Т.23, №7, 2017, С. 491-498.

REFERENCES

1. Zolotova T.M., Kerbnikov F.I., Rozenblat M.A. Rezervirovanie analogovykh ustrojstv avtomatiki // Moskva: ENnergiya, 1975, 127 s.

2. Belgorodskij S.L. Avtomatizatsiya upravleniya posadkoj samoleta // Moskva: Transport, 1972, 352 s.

3. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. Modeli i metody rascheta pokazatelej nadezhnosti tekhnicheskikh sistem // Moskva: Izdatel'stvo LENAND, 2014, 254 s.

4. Obolenskij YU.G. Upravlenie poletom manevrennykh samoletov // Moskva: filial Voenizdat, 2007, 480 s.

5. SHevtsov G.A., SHermet E.M. Logicheskoe rezervirovanie // L'vov: Izdatel'stvo L'vovskogo universiteta. 1973, 130 s.

6. Volobuev M.F., Zamyslov M.A. i dr. Ustrojstvo obnaruzheniya otkazov v rezervirovannoj sisteme Patent №2487389 RF, МПК S2, G05B 23/02, G01R 31/02, opubl. 10.07.2013, byul. №19, 16 s.

7. Volobuev M.F., Zamyslov M.A. i dr. Ustrojstvo upravleniya rezervirovannoj s pomoshh'yu mazhoritarnykh ehlementov sistemoj. Patent №2451995 RF, МПК S1, G06F 15/00, opubl. 27.05.2012, byul. №15, 23 s.

8. Volobuev M.F., Mal'tsev A.M., Sokolov I.V. ENksperimental'nye issledovaniya maketa rezervirovannoj sistemy, upravlyaemoj nechetkim kontrollerom // Informatsionnye tekhnologii. Т.23, №7, 2017, S. 491-498.

© Брызгунов А.В., Волобуев М.Ф., 2018

Брызгунов Андрей Владимирович, начальник отделения подготовки данных УТК, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru

Волобуев Михаил Федорович, кандидат технических наук, доцент, докторант, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, vaiu@mil.ru