

Труды МАИ. 2024. № 136
Trudy MAI, 2024, no. 136

Научная статья

УДК 623.4.017

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180674>

МЕТОДИКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рамис Азатович Орехович

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

orex0212@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена вопросу обеспечения отказобезопасности комплекса бортового оборудования (КБО) беспилотного летательного аппарата (БПЛА) большой продолжительности полета. Данное направление исследований является актуальным аспектом в развитии беспилотных систем. БПЛА находят широкое применение в современных вооруженных конфликтах и в различных секторах экономики, ежегодно увеличивается количество задач, возлагаемых на беспилотные системы.

В независимости от сферы применения и класса БПЛА основным свойством, которым должен обладать БПЛА это надежность функционирования. Она обеспечивается различными способами, такими как резервирование, комплексирование и реконфигурация, но необходимые значения показателей надежности не достигаются.

Создание избыточных реконфигурируемых КБО является безальтернативным путем достижения предельно возможной надежности этих комплексов в условиях, как ограниченной надежности используемых компонентов, так и воздействия широкого спектра внешних факторов. Современные подходы к управлению избыточности направлены на обеспечение выполнения функций отказавших компонентов на другие, исправные компоненты КБО.

В статье описывается экспериментальная методика функциональной реконфигурации, позволяющая оптимизировать работу КБО, обеспечить его максимальную эффективность и функциональность. Она основана на адаптивном способе функциональной реконфигурации КБО, заключающийся в внедрении блока адаптации, формирующий показатели функциональной эффективности (ПФЭ) компонентов на основе использования информации о режимах работы, командах оператора и другой внешней информации, а также информации о техническом состоянии функциональных модулей на основе нечеткого логического подхода.

Для апробации предложенной методики разработана функциональная математическая модель КБО, которая создана в интерактивной среде для программирования и численных расчетов MATLAB со специальными инструментальными средствами для анализа, проектирования и моделирования систем нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox. Рассмотрена работа методики на примере отказа одного вычислителя КБО, результатом которой является перераспределение задач между вычислителями, что повышает вероятность выполнения боевой задачи.

Предложенная в статье методика и математическая модель адаптивной функциональной реконфигурации КБО БПЛА позволяет определять ПФЭ конфигураций компонентов КБО на основе нечетко-логического подхода, что позволяет выполнить боевую задачу без потери вычислительной нагрузки с имеющимися ресурсами компонентов КБО БПЛА.

Ключевые слова: управление, надежность, беспилотный летательный аппарат, функциональная реконфигурация

Для цитирования: Орехович Р.А. Методика функциональной реконфигурации комплекса бортового оборудования беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180674>

Original article

METHODOLOGY FOR FUNCTIONAL RECONFIGURATION OF AN ON-BOARD EQUIPMENT COMPLEX OF AN UNMANNED AIRCRAFT VEHICLE

Ramis A. Orekhovich

Military Educational Center of the Air Force «N.E. Zhykovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia

orex0212@gmail.com

Abstract. The article deals with the issue of ensuring the fail-safe of the onboard equipment (OBE) complex of an unmanned aerial vehicle (UAV) with a long flight duration. This trend of research is a relevant aspect in the unmanned systems development. The UAVs find wide

application in modern armed conflicts and various sectors of the economy. The number of tasks assigned to the unmanned systems increases annually.

Regardless of the scope of application and class of the UAV, the main property that the UAV must possess is its operational reliability. It is being ensured in various ways, such as redundancy, integration and reconfiguration, but the required values of reliability indicators are not being achieved. Creation of the redundant reconfigurable OBE is the only way to achieve maximum possible reliability of these complexes under conditions of both limited components in use reliability and the impact of a wide range of external factors. Modern approaches to the redundancy management are aimed at ensuring the functions performing of the failed components by the other OBE intact components.

The article describes an experimental technique for functional reconfiguration, which allows optimizing the OBE operation, ensuring its maximum efficiency and functionality. It is based on an adaptive method of the OBE functional reconfiguration, which consists in introducing of an adaptation block that generates functional efficiency indicators (FPE) of components, based on the application of the information about operating modes, operator commands and other external information, as well as information about the technical condition of functional modules based on the fuzzy logic approach.

To test the proposed methodology, a functional the OBE mathematical model was developed, which was realized in the MATLAB interactive environment for programming and numerical calculations with special tools for analysis, design and fuzzy logic systems modeling - Fuzzy Logic Toolbox. Operation of the said technique is considered on the example of the one of the OBE computer failure, of which results in the redistribution of

tasks between the computers, which increases the probability of the combat mission completion.

The methodology and mathematical model of the adaptive functional reconfiguration of the UAV OBE proposed in the article allows defining the PFE configurations of the OBE components based on a fuzzy logic approach, which in its turn allows completing a combat mission without losing the computational load with the available resources of the UAV OBE components.

Keywords: Control, reliability, unmanned aerial vehicle, functional reconfiguration

For citation: Orekhovich RA. Methodology for functional reconfiguration of an on-board equipment complex of an unmanned aircraft vehicle. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180674>

Введение

В вооруженных конфликтах современности и в различных секторах экономики находят широкое применение беспилотные летательные аппараты (БПЛА) различного класса [1]. С каждым годом растет количество задач, которые могут быть решены с помощью БПЛА [2]. В военной сфере применяют БПЛА от малых мультироторных аппаратов, решающих задачи разведки и огневого поражения личного состава и боевой техники до многотонных комплексов обладающих сложной архитектурой построения и выполняющих широкий спектр задач мультиспектральной разведки, ретрансляции и огневого поражения объектов

противника. На рисунке 1 представлена схема полета американского БПЛА большой продолжительности полета (БПЛА БПП).



Рисунок 1 – Схема полета БПЛА

В отраслях народного хозяйства БПЛА применяются в сфере лесного и сельского хозяйства решая задачи мониторинга. В недалеком будущем, с помощью БПЛА будут решаться логистические задачи, как местного значения, с использованием мульти роторных аппаратов, так и межконтинентального уровня с применением БПЛА большой продолжительности полета.

В России разработан грузовой БПЛА «А-03» с максимальной грузоподъемностью 500 кг, дальностью действия 300 км, продолжительностью полета до 50 часов. Блочная конструкция «А-03» обеспечивает его компактность и легкость транспортировки. Этот БПЛА обеспечивает сброс груза в заданном районе, и др. Китайская компания Ehang разработала БПЛА – первое в мире автономное летающее такси массой 200 кг, представляющее собой гигантский квадрокоптер, предназначенный для перевозки одного пассажира массой до 100 кг со средней скоростью 100 км/ч [3].

В независимости от сферы применения и класса БПЛА основным свойством, которым должен обладать БПЛА это надежность функционирования. Она обеспечивается различными способами [4], но необходимые значения показателей надежности не достигаются. Применение различных способов повышения надежности обусловлено особенностями функционирования комплексов и систем БПЛА, основным из которых является комплекс бортового оборудования (КБО) – это совокупность функционально связанных бортовых систем и устройств, обеспечивающих решение задач пилотирования, навигации и целевого применения БПЛА различными способами [5].

Создание избыточных реконфигурируемых КБО подвижных объектов является безальтернативным путем достижения предельно возможной надежности этих комплексов в условиях как ограниченной надежности используемых компонентов, так и воздействия широкого спектра внешних факторов.

Согласно общепринятому определению [6], избыточностью технической системы называется наличие в ней возможностей сверх тех, которые могли бы обеспечить ее нормальное функционирование. Целями создания избыточности в различных формах являются достижение требуемых уровней надежности и отказобезопасности систем, увеличение их производительности, а также достижение иных полезных свойств за счет возможностей функционального реконфигурирования ресурсов.

В первой декаде 2000-х годов получили распространение новые подходы к разработке и использованию избыточных КБО воздушных судов (ВС), нацеленные на повышение надежности, функциональности и конкурентоспособности комплексов при одновременном снижении связанных с ними сертификационных и эксплуатационных затрат: интегрированная модульная авионика (ИМА) [7], авионика необслуживаемого бортового оборудования (АНБО) [8], управления исправностью транспортного средства (Integrated Vehicle Health Management – IVHM) [9].

В настоящее время уже активно эксплуатируются воздушные суда с избыточными распределенными КБО, такие как, пассажирские Airbus A-380, SSJ-100 и боевые F-35, Су-57. В разрабатываемые отечественные перспективные беспилотные авиационные комплексы Альтиус-РУ, Гелиос и др. заложены новые подходы к построению КБО [10].

Перспективным направлением исследований является проработка вопроса управления избыточностью КБО. В работах по управлению избыточностью [11-13] рассматривается функциональная избыточность системы, под которой понимается

возможность достижения цели использованием различных принципов, физических и информационных процессов. Вместе с тем представляет несомненный интерес использование избыточности технической системы не только для обеспечения желаемой отказоустойчивости, но и для достижения принципиально нового уровня других эксплуатационно-технических характеристик КБО перспективных объектов. Например, это может относиться к точности и надежности решения отдельных задач, экономии расходования энергии или ресурса наиболее дорогих, специально сохраняемых компонентов и др.

1. Постановка задачи

В рамках проводимого исследования объектом был выбран КБО перспективного БПЛА БПП представленного на рисунке 2.

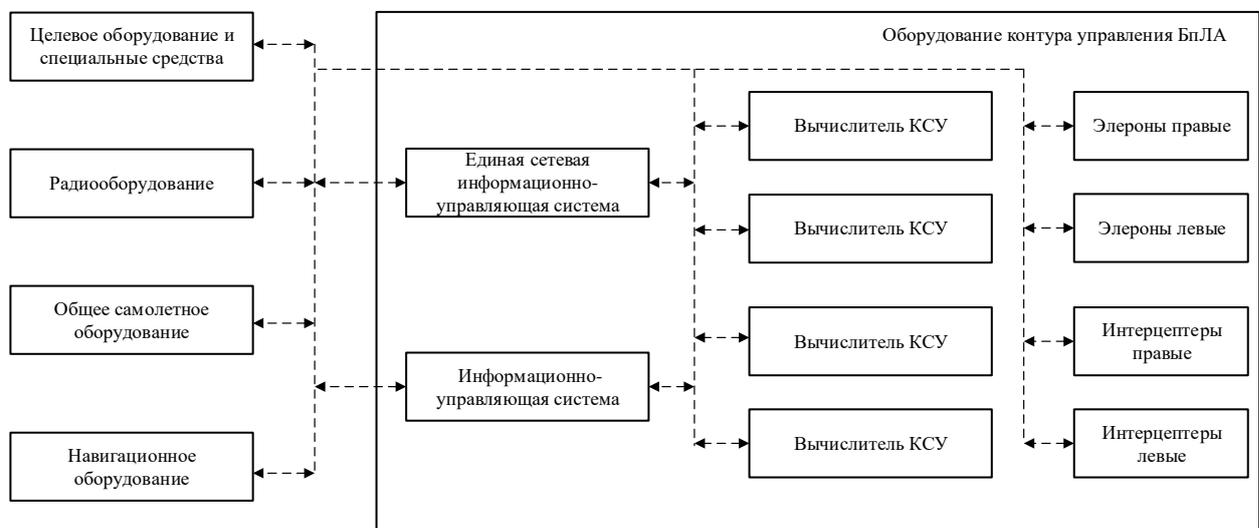


Рисунок 2 – Структурная схема КБО перспективного БПЛА БПП

Как видно из рисунка КБО БПЛА БПП состоит из нескольких вычислителей, типового набора органов управления (элероны и интерцепторы), нескольких информационно-управляющих систем, радио и навигационного оборудования,

общего самолетного оборудования в состав которого входят гидравлическая, топливная и система электроснабжения, целевого оборудования в состав которого могут входить системы управления вооружением или разведывательными системами основанных на разных физических принципах, а также информационно-коммутационной сети, которая позволяет осуществлять информационный обмен между всеми системами КБО.

Предположим, что в данном КБО реализован подход управления избыточностью с применением супервизоров конфигурации описанный в работах [14-17]. Для обеспечения длительного полета БПЛА БПП и выполнения возложенных на КБО задач ставиться задача разработки адаптивного способа функциональной реконфигурации вычислителей, который позволит обеспечить, во-первых, определение значений показателей функциональной эффективности (ПФЭ) компонентов конфигурации КБО с учетом изменения внешней информации и функциональной деградации компонентов, во-вторых, передачи сигнала для коррекции оценок функциональной эффективности в реальном времени (или с минимальными задержками) [18].

2. Адаптивный способ реконфигурации КБО БПЛА БПП

В целях повышения надежности, функциональной целостности и производительности вычислительных систем активно применяют методы реконфигурации, основанные на аппаратном резервировании однотипных вычислительных устройств, либо разнотипных устройств, выполняющих одинаковые

функции [19]. Наиболее проблемным является реализация реконфигурации вычислительных систем с большим числом разнотипных устройств [20].

Для повышения адаптационных свойств вычислительной системы, состоящей из разнотипных устройств автором разработан способ реконфигурации КБО. Он состоит из нескольких этапов: при проектировании вычислителей КБО в них закладывается возможность перераспределения ресурсов по внешней команде; при разработке программного обеспечения КБО внедряется блок адаптации, который на основе использования информации о режимах работы, командах оператора и другой внешней информации, а также информации о техническом состоянии функциональных модулей формирует показатели функциональной эффективности на основе нечеткого логического подхода [21, 22] и разрабатывается база правил на основе которых в последствии формируется ПФЭ. При эксплуатации КБО на основе сформированной базы правил и анализа поступающей информации формирует ПФЭ, которые учитываются при проведении арбитража супервизоров конфигурации.

3. Блок адаптации

Задача определения ПФЭ является многокритериальной. Проведя анализ известных способов решения многокритериальной оптимизации наиболее подходящим был определен подход, основанный на нечеткой логике.

Для некоторых практических задач решение методами «классической» математики не всегда оптимально. Появление нечеткой логики позволило принимать решения в условиях неопределенности и создавать системы управления, которые могут применять нестрогие рассуждения. Такими системами являются

автоматические и автоматизированные системы управления, использующие нечеткую логику, системы поддержки принятия решений, системы искусственного интеллекта, экспертные системы [23].

Блок адаптации структурно состоит из трех субблоков: преобразования входных данных; принятия решений и формирования ПФЭ. Входные переменные, поступающее в субблок преобразования входных данных в котором происходит процесс фазификации это процесс присвоения числовых входных данных системы нечетким множествам с некоторой степенью принадлежности. На основе ранее созданной базы правил в субблоке принятия решений, определяются ПФЭ, которые в последствии выдаются для дальнейшего участия в арбитраже.

4. Математическая модель КБО БПЛА БПШ

Для проверки работоспособности адаптивного способа реконфигурации КБО на основе супервизоров конфигурации, получения и анализа эксплуатационных характеристик моделируемого комплекса была разработана математическая модель (ММ) под которой понимается совокупность математических объектов (чисел, символов, множеств и т. д.) и связей между ними, отражающих важнейшие для проектировщика свойства проектируемого технического объекта.

Математическая модель по характеру отображаемых свойств объекта является функциональной. Функциональные ММ предназначены для отображения физических или информационных процессов, протекающих в объекте при его функционировании. Функциональные ММ представляют собой системы уравнений,

связывающих фазовые переменные, внутренние, внешние и выходные параметры, т.е. алгоритм вычисления вектора выходных параметров при заданных векторах параметров компонентов и внешних параметров.

В зависимости от места в иерархии описаний математическая модель относится к микроуровню. Особенностью ММ на микроуровне является отражение физических процессов, протекающих в непрерывном пространстве и времени с помощью дифференциальных уравнений в частных производных.

Средой разработки ММ реализующую адаптивный способ реконфигурации КБО БПЛА БПП было определена интерактивная среда для программирования и численных расчетов MATLAB со специальными инструментальными средствами для анализа, проектирования и моделирования систем нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox. Выбор указанных средств обоснован ориентированностью средств MATLAB к матричным операциям (в качестве математической основы технологии управления избыточностью стоят методы решения матричных уравнений с использованием канонизации матриц), а также возможностью последующей адаптации в программный код, подобный коду, получаемому на языке программирования C++.

На разработанную ММ возложены следующие задачи:

- оценка работоспособности адаптивного способа реконфигурации КБО БПЛА БПП под управлением СК;
- отладка адаптивного способа реконфигурации КБО БПЛА БПП под управлением СК;

- получение и анализ эксплуатационных характеристик КБО БПЛА БПП под управлением СК с применением адаптивного способа реконфигурации.

Входными данными модели являются:

- информация о техническом состоянии (индексы готовности) компонентов вычислительных устройств КБО БПЛА БПП под управлением СК;

- внешняя информация, включающая в себя команды оператора, изменение оперативной обстановки и др.;

- общее время работы системы.

Выходными данными модели являются:

- эксплуатационные характеристики КБО БПЛА БПП;

- количество выполняемых функций КБО БПЛА БПП.

Функциональная схема разработанной ММ представлена на рисунке 3.

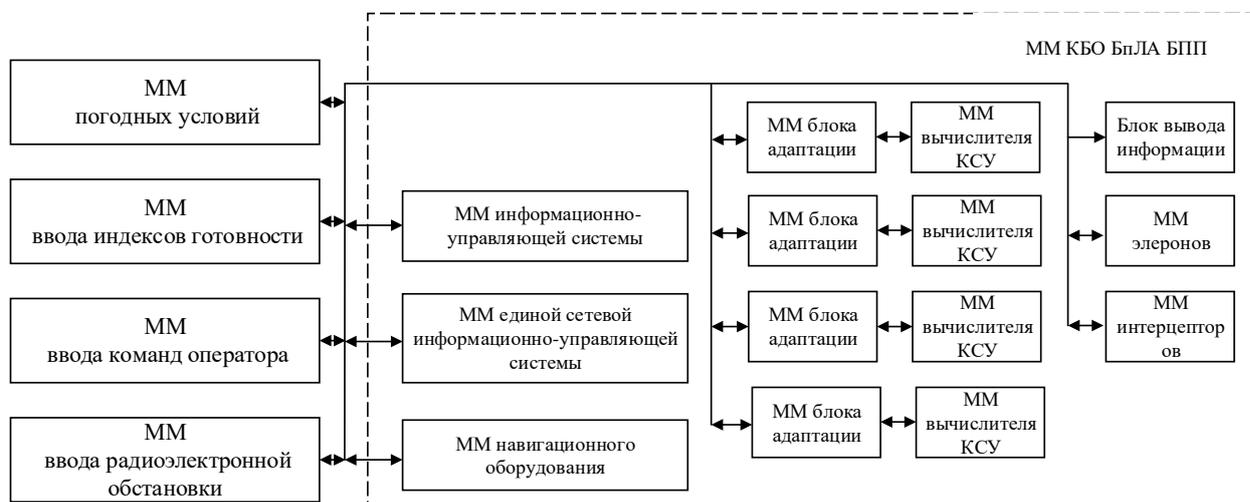


Рисунок 3 – Функциональная схема ММ КБО БПЛА БПП

Математическая модель создана с условием, что во время длительного полета КБО производит более четырехсот операций, под которой будем понимать усредненный типовой расчет одного параметра. Каждый типовой расчет может быть выполнен

всеми вычислителями из состава КБО, только за разное время. Приоритет выполнения определялся порядком поступления.

Были введены следующие обозначения: V1 KSU, V2 KSU, V3 KSU, V4 KSU – вычислители КСУ, V IUS – вычислители информационной управляющей системы, V SIUS – вычислители сетевой информационной управляющей системы, V NO – вычислитель навигационного оборудования.

Для проверки работоспособности разработанной методики рассмотрен полет разведывательного БПЛА БПП продолжительностью десять часов с предполетной и послеполетной подготовкой. Проведено математическое моделирование. На рисунке 4. представлена работа вычислительной системы на протяжении всего полета без отказов.

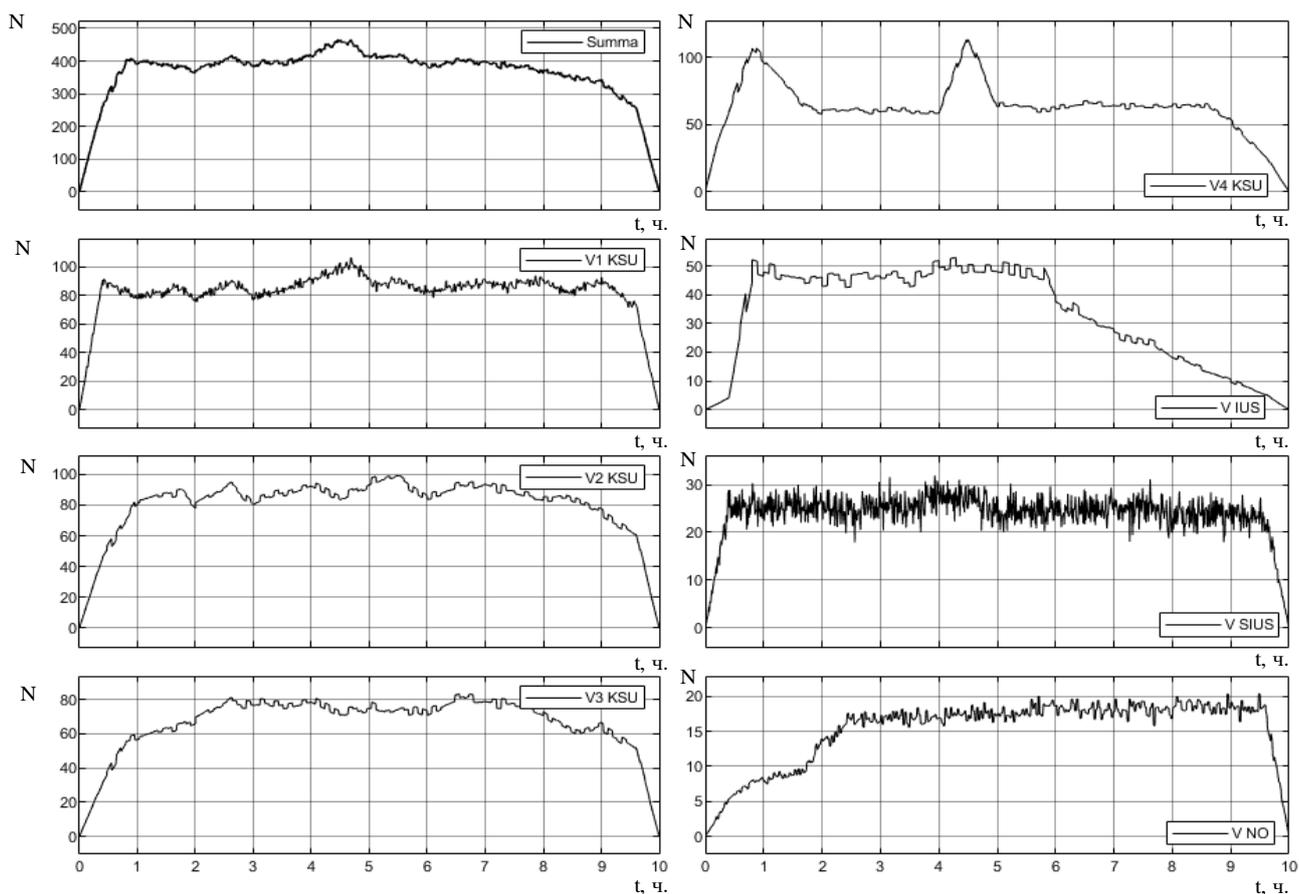


Рисунок 4 – Загрузка вычислителей КБО БПЛА БПП

Для проверки работы разработанной методики функциональной реконфигурации КБО БПЛА БПП был введен отказ первого вычислителя (V1 KSU) на четвертом часу полета. На рисунке 5 приведена загрузка вычислительной системы КБО БПЛА БПП с федеративной системой построения. Приведенные графики наглядно демонстрируют снижение количества выполняемых типовых операций, что снижает вероятность выполнения боевой задачи.

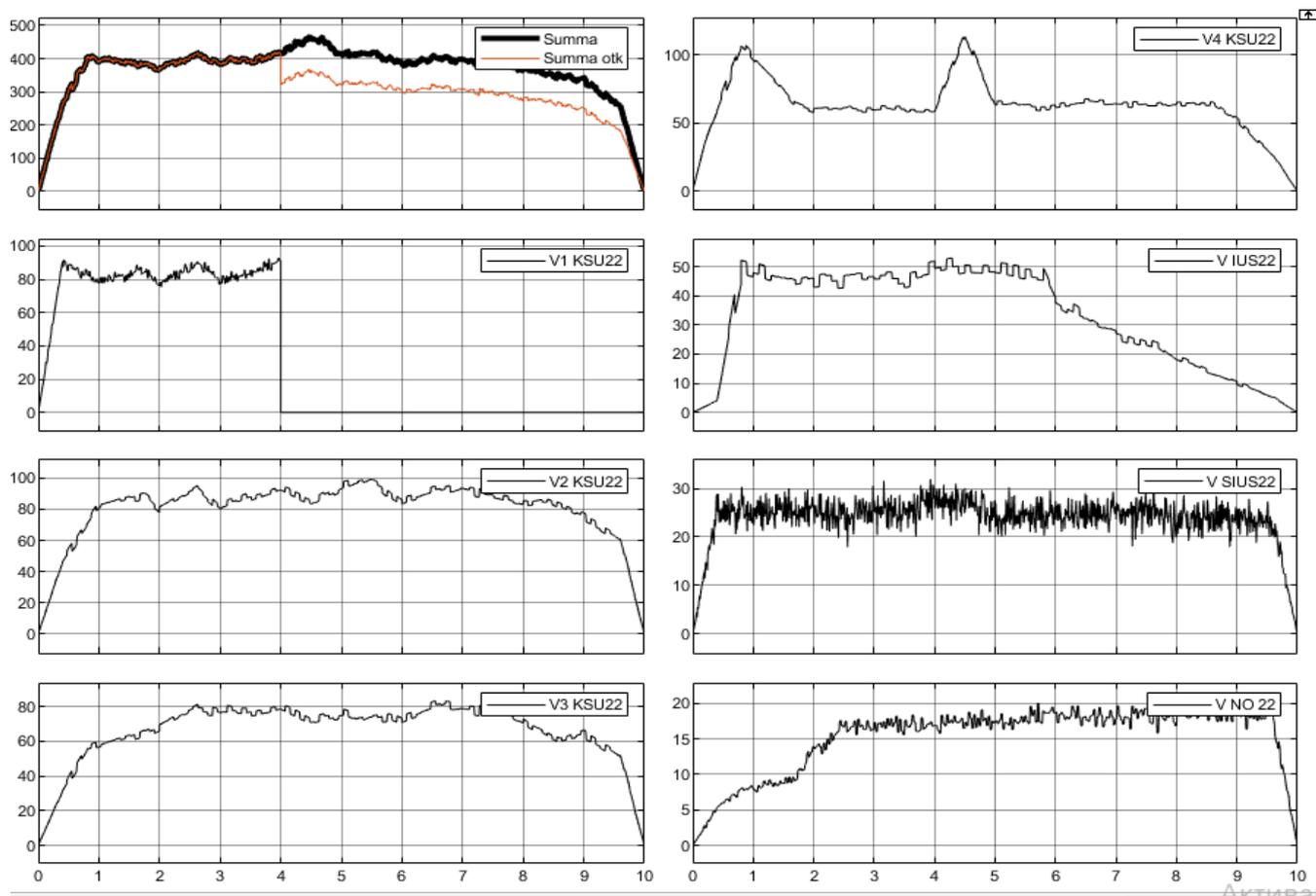


Рисунок 5 – Загрузка вычислителей КБО федеративной структуры БПЛА БПП при отказе вычислителя

На рисунке 6 приведена загрузка вычислительной системы КБО БПЛА БПП с применением методики функциональной реконфигурации. Применение методики функциональной реконфигурации позволило перераспределить задачи между вычислителями и выполнить большинство поставленных задач.

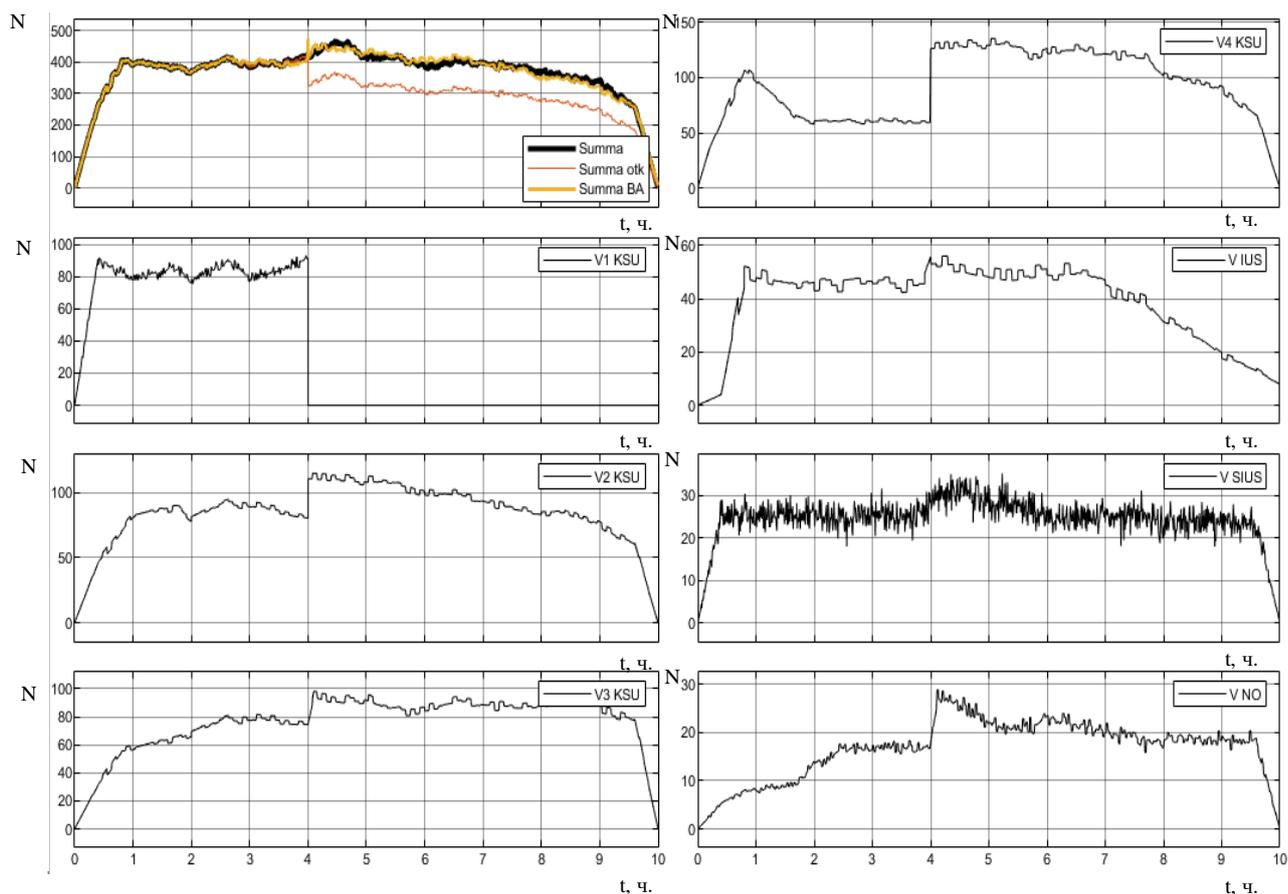


Рисунок 6 – Загрузка вычислителей КБО БПЛА БПП при отказе вычислителя с применением методики функциональной реконфигурации

Из-за ограниченного объема публикации приведен только один пример реконфигурации КБО. Проведенные исследования со всеми возможными вариантами одиночного и группового отказа в КБО доказали состоятельность предлагаемой методики и способа моделирования, применяемого при испытаниях, разрабатываемых БПЛА.

Заключение

Предложенная в работе методика функциональной реконфигурации комплекса бортового оборудования беспилотного летательного аппарата имеет следующие отличительные особенности:

1. На этапе проектирования на основании данных о функциональном назначении, решаемых задачах и располагаемых ресурсах составляется структурная схема комплекса, таким образом, чтобы выполнялись требования к его работоспособности при выходе из строя компонентов до того, как останется хотя-бы один из необходимых в данном типе исправный и необходимый для выполнения функции системы компонент.

2. Определение ПФЭ конфигурации производится на основе нечетко-логического подхода, что позволит снизить вычислительную нагрузку по определению перспективной конфигурации вычислительной системы.

3. Выбор работоспособной и оптимальной с точки зрения текущей задачи конфигурации происходит с помощью оригинального многошагового алгоритма, на основании определенных ПФЭ, в процессе которого побеждает и назначается доминирующим определенный супервизор, который через маршрутизаторы отдает команды на коммутацию победившей конфигурации КБО.

4. Математическое моделирование КБО БПЛА БПП под управлением СК позволило оценить эффективность адаптивной методики функциональной реконфигурации по сравнению количества выполненных операций при различных отказах компонентов вычислительной системы.

Продолжение исследований в данном направлении будет направлено на определение численных показателей эффективности КБО и разработку специального программного обеспечения для реализации разработанной методики.

Список источников

1. Волобуев М.Ф. Классификация беспилотных летательных аппаратов по уровню требуемой надежности // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 9. С. 39-48.
2. Джавадов Н.Г., Агаев Ф.Г., Гусейнов Г.А., Зульфугарлы П.Р. Вопросы оценки выполнимости задач, поставленных перед беспилотными летательными аппаратами // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170350>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-20](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-20)
3. Агеев А.М., Замыслов М.А., Михайленко С.Б. Управление многофункциональной целевой нагрузкой беспилотных летательных аппаратов с применением принципов функциональной реконфигурации // Транспорт: наука, техника, управление. 2018. № 2. С. 35-42.
4. Попов А.С., Фетисов Е.В., Елизаров А.В, Орехович Р.А. Анализ способов повышения надежности беспилотных летательных аппаратов различного класса // Транспорт: наука, техника, управление. 2023. № 2. С. 40-45. DOI: [10.36535/0236-1914-2023-02-7](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2023-02-7)
5. Алиева Г.В., Гусейнов О.А. Вопросы построения адаптивного режима полета разведывательного беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178471>

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 19762-1-2011. Информационные технологии. Технологии автоматической идентификации и сбора данных (АИСД). Гармонизированный словарь. Ч. 1. Общие термины в области АИСД. – М.: Стандартинформ, 2012. - 36 с.
7. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66-71.
8. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment // Proc. of 27th congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 19–24 Sept. 2010, Nice, France, ICAS 2010, CD-ROM Proc., pp. 7-1-1.
9. Jennions I.K. An Introduction to Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field, SAE International, 2011, 177 p.
10. Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления технических систем с избыточностью // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 72-82.
11. Агеев А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Система управления избыточностью комплексов бортового оборудования воздушных судов на основе супервизоров конфигураций // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 6. С. 10-18. DOI: [10.36535/0236-1914-2022-06-2](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2022-06-2)
12. Агеев А.М., Буков В.Н., Шурман В.А. Арбитражный подход к управлению избыточностью комплекса бортового оборудования на основе супервизоров конфигураций // Проблемы управления. 2022. № 2. С. 24-35. DOI: [10.25728/ru.2022.2.3](https://doi.org/10.25728/ru.2022.2.3)

13. Буков В.Н., Авакян А.А, Бельфор Г.Е. и др. Фундаментальные основы создания авионики необслуживаемого оборудования летательных аппаратов // Научно-практическая конференция «Фундаментальные исследования в направлении разработки, производства и экспорта отечественной высокотехнологичной промышленной продукции» (Москва, 22-23 апреля 2010): сборник статей. - М.: Изд-во ВУНЦ ВВС, 2010. С. 20-34.

14. Попов А.С., Мальцев А.М., Замыслов М.А. Модель формирования команд управления рулями беспилотного летательного аппарата при выполнении сложных пространственных маневров // Транспорт: Наука, Техника, Управление. 2017. № 8. С. 53-59.

15. Попов А.С. Методика управления реконфигурацией резервированного комплекса управления беспилотного летательного аппарата на основе супервизорного подхода // Транспорт: Наука, Техника, Управление. 2018. № 8. С. 30-41.

16. Попов А.С. Об управлении избыточностью бортового комплекса управления беспилотного летательного аппарата // Всероссийская научно-техническая конференция «XIV Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 13–14 апреля 2017): сборник трудов. - М.: ВУНЦ, 2017. С. 52-55.

17. Попов А.С., Агеев А.М. Способ реконфигурации бортового комплекса управления беспилотного летательного аппарата на основе супервизоров конфигурации // Сборник материалов (доклады и статьи) 3-й научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития и эксплуатации ракетно-

артиллерийского, специального вооружения и морской техники». - Севастополь: ЧВВМУ имени П.С. Нахимова, 2018. С. 196-203.

18. Павлов А.Н., Умаров А.Б., Кулаков А.Ю., Гордеев А.В. Задача планирования реконфигурации системы управления движением малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли в условиях неизвестной циклограммы его функционирования // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169004>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-18)

19. Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые вычислительные системы. - Таганрог: Издательство ЮФУ, 2016. - 461 с.

20. Масюков И.И. Метод и устройство расположения задач в реконфигурируемых вычислительных системах // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161427>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-13](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-13)

21. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. - М.: Горячая линия – Телеком, 2012. - 284 с.

22. Petrosino A., Fanelli A.M., Pedrycz W. Fuzzy Logic and Applications, Springer, 2011, 290 p.

23. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Отходы и ресурсы. 2021. № 1. С. 12. DOI: [10.15862/10ECOR121](https://doi.org/10.15862/10ECOR121)

References

1. Volobuev M.F. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2016, no. 9, pp. 39-48.

2. Dzhavadov N.G., Agaev F.G., Guseinov G.A., Zul'fugarly P.R. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170350>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-20](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-20)
3. Ageev A.M., Zamyslov M.A., Mikhailenko S.B. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2018, no. 2, pp. 35-42.
4. Popov A.S., Fetisov E.V., Elizarov A.V, Orekhovich R.A. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2023, no. 2, pp. 40-45. DOI: [10.36535/0236-1914-2023-02-7](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2023-02-7)
5. Alieva G.V., Guseinov O.A. *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178471>
6. *GOST R ISO/MEK 19762-1-2011. Informatsionnye tekhnologii. Tekhnologii avtomaticheskoi identifikatsii i sbora dannykh (AISD). Garmonizirovannyi slovar'. Ch. 1. Obshchie terminy v oblasti AISD. Information technologies (GOST R ISO/MEK 19762-1-2011. Automatic identification and data capture (AIDC) techniques. Harmonized vocabulary. Part 1 General terms relating to AIDC)*, Moscow, Standartinform, 2012, 36 p.
7. Fedosov E.A., Kos'yanchuk V.V., Sel'vesyuk N.I. *Radioelektronnye tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 66-71.
8. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment, *Proc. of 27th congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 19–24 Sept. 2010, Nice, France, ICAS 2010, CD-ROM Proc., pp. 7-1-1.
9. Jennions I.K. *An Introduction to Integrated Vehicle Health Management: Perspectives on an Emerging Field*, SAE International, 2011, 177 p.

10. Ageev A.M., Bronnikov A.M., Bukov V.N., Gamayunov I.F. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2017, no. 3, pp. 72-82.
11. Ageev A.M., Bukov V.N., Shurman V.A. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2022, no. 6, pp. 10-18. DOI: [10.36535/0236-1914-2022-06-2](https://doi.org/10.36535/0236-1914-2022-06-2)
12. Ageev A.M., Bukov V.N., Shurman V.A. *Problemy upravleniya*, 2022, no. 2, pp. 24-35. DOI: [10.25728/pu.2022.2.3](https://doi.org/10.25728/pu.2022.2.3)
13. Bukov V.N., Avakyan A.A, Bel'for G.E. et al. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Fundamental'nye issledovaniya v napravlenii razrabotki, proizvodstva i eksporta otechestvennoi vysokotekhnologichnoi promyshlennoi produktsii»*: sbornik statei. Moscow, Izd-vo VUNTs VVS, 2010, pp. 20-34.
14. Popov A.S., Mal'tsev A.M., Zamyslov M.A. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2017, no. 8, pp. 53-59.
15. Popov A.S. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2018, no. 8, pp. 30-41.
16. Popov A.S. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «KhIV Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo»*: sbornik trudov. Moscow, VUNTs, 2017, pp. 52-55.
17. Popov A.S., Ageev A.M. *Sbornik materialov (doklady i stat'i) 3-i nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy razvitiya i ekspluatatsii raketno-artilleriiskogo, spetsial'nogo vooruzheniya i morskoi tekhniki»*. Sevastopol', ChVVMU imeni P.S. Nakhimova, 2018, pp. 196-203.
18. Pavlov A.N., Umarov A.B., Kulakov A.Yu., Gordeev A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169004>. DOI: [10.34759/trd-2022-126-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-18)

19. Kalyaev I.A., Levin I.I. *Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy* (Reconfigurable Computing Systems), Taganrog, Izdatel'stvo YuFU, 2016, 461 p.
20. Masyukov I.I. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161427>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-13](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-13)
21. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti* (Fuzzy models and networks), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2012, 284 p.
22. Petrosino A., Fanelli A.M., Pedrycz W. *Fuzzy Logic and Applications*, Springer, 2011, 290 p.
23. Savchenko D.V., Reznikova K.M., Smyshlyayeva A.A. *Otkhody i resursy*, 2021, no. 1, pp. 12. DOI: [10.15862/10ECOR121](https://doi.org/10.15862/10ECOR121)

Статья поступила в редакцию 13.05.2024

Одобрена после рецензирования 18.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 13.05.2024; approved after reviewing on 18.05.2024; accepted for publication on 27.06.2024