

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ КОМПЛЕКСОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ СУПЕРВИЗОРОВ КОНФИГУРАЦИЙ**Кандидат техн. наук, доцент **Агеев А.М.**

(ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж),

доктор техн. наук, профессор **Буков В.Н.**

(АО «Научно-исследовательский институт авиационного оборудования», г. Жуковский),

**Шурман В.А.**

(Фиалиал АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», г. Жуковский)

**REDUNDANCY MANAGEMENT SYSTEM FOR AIRCRAFT ON-BOARD EQUIPMENT COMPLEXES BASED ON CONFIGURATION SUPERVISORS****A.M. Ageev**, Ph.D. (Tech), Associate Professor

(Military Air Force Training and Research Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", city of Voronezh),

**V.N. Bukov**, Doctor (Tech), Professor

(Research Institute of Aviation Equipment, city Zhukovsky),

**V.A. Shurman**,

(Ramenskoye Instrument-Making Design Bureau, city Zhukovsky)

**Аннотация.** Излагается подход к организации информационной структуры и алгоритмов управления реконфигурированием комплексов бортового оборудования воздушных судов с избыточностью неоднородных компонентов с целью повышения эффективности авиационных транспортных систем. Автоматическое реконфигурирование преследует такие цели, как обеспечение высокой отказоустойчивости и достижение требуемых эксплуатационно-технических характеристик, включая точность и качество функционирования системы, сохранение ресурса отдельных подсистем и пр. Приводится методический пример.

**Abstract.** The suggestions for the practical implementation of the reconfiguration management for aircraft onboard equipment complexes with the redundancy of heterogeneous components in order to improve the efficiency of aviation transport systems are presented. Automatic reconfiguration pursues such goals as ensuring high fault tolerance and achieving the required operational and technical characteristics, including the accuracy and quality of system functioning, saving the resource of individual subsystems, etc. A methodical example is given.

**Ключевые слова:** комплекс бортового оборудования, авионика необслуживаемого бортового оборудования, реконфигурирование, управление избыточностью, супервизор конфигурации

**Keywords:** onboard equipment complex, avionics of zero-maintenance equipment, reconfiguration, redundancy management, configuration supervisor

**Введение**

Одним из генеральных направлений развития авиационных систем в основном транспортного назначения [1, 2] является создание высоконадежных авиационных комплексов бортового оборудования (КБО), обладающих широким диапазоном возможностей и спектром решаемых задач.

Многообещающий подход этого направления сочетает концепции [3]:

– интегрированной модульной авионики (ИМА): открытая сетевая архитектура с гибкими связями между компонентами, единая вычислительная платформа, возможность объединения аппаратных и программно-информационных ресурсов для решения единой целевой задачи комплекса, возможность раздельной сертификации аппаратных (платформа) и программных (функциональные приложения) средств, переносимость приложений на новые платформы [4, 5];

– авионики необслуживаемого бортового оборудования (АНБО): автоматический мониторинг, диагностирование технического состояния и использование ак-

тивных средств обеспечения отказоустойчивости, в том числе путем реконфигурирования при обнаруженных отказах или повреждениях оборудования с целью сохранения или минимизации деградации функциональности комплекса [6, 7].

Конечным эффектом АНБО является исключение необходимости в обслуживании комплекса в межрейсовые периоды с сохранением требуемых эксплуатационно-технических характеристик и за счёт этого значительное снижение стоимости эксплуатации; повышение готовности к штатному применению самолета и эффективности транспортной системы (минимальные задержки вылетов, возможность увеличения интенсивности полётов); повышение безопасности полётов (снижение количества лётных инцидентов).

В условиях ограниченной надёжности элементной базы [8] безальтернативным путем достижения указанного эффекта является создание реконфигурируемых КБО, позволяющих удовлетворить требование по отказоустойчивости за счёт использования системных свойств КБО.

Наряду с традиционными решениями в области реконфигурирования бортовых ресурсов [9, 10] для реализации в перспективных поколениях КБО разрабатываются новые подходы, среди которых можно указать:

- применение алгоритмов реконфигурирования программного обеспечения, включающие в себя распределение функциональных задач между доступными аппаратными ресурсами многопроцессорных систем [11],

- использование принципа мультиагентного взаимодействия бортовых вычислителей на основе локальных диспетчеров, располагаемых в каждом процессорном узле вычислительной системы и осуществляющих ее периодическое диагностирование и реконфигурирование [12].

Вместе с тем общим ограничением указанных подходов является их узкая ориентированность на конкретный вид управляемых ресурсов и сосредоточенность исключительно на отказоустойчивости.

С целью преодоления указанных ограничений предложено научно-практическое направление, названное *управлением избыточностью* [13-23], под которым предложено понимать совокупность операций, включающую как мониторинг состояния компонентов избыточного КБО, так и парирование его неисправностей, направленных на обеспечение заданных уровней отказоустойчивости и достижением высоких значений других эксплуатационно-технических характеристик.

#### Постановка задачи

Любой КБО является результатом объединения различных по назначению и принципам функционирования компонентов. Избыточный КБО, рассматриваемый здесь как объект управления избыточностью, должен содержать:

- а) избыточное число в общем случае разнородных и неуниверсальных компонентов (аппаратных и/или программных), как правило с встроенными средствами контроля (ВСК);

- б) распределенную бортовую интегрированную вычислительную среду (БИВС), образующую единое информационное пространство, в составе

- бортовой центральной вычислительной системы (БЦВС) с резервированными вычислителями, объединенными центральной сетью,

- периферийных систем и устройств с локализованными в них вычислительными средствами, часто профильного назначения и с обусловленными этим особенностями,

- коммуникационных средств, выполняющих коммутацию каналов и доставку данных к местам дислокации аппаратных составляющих;

- в) программные средства управления избыточностью.

Современные технические и технологические решения, имеющиеся в распоряжении разработчиков, позволяют синтезировать, испытывать и сертифицировать интегрированные КБО и их системы, однако соответствующие возможности, как правило, ограничены различными частными случаями и не предполагают единой методологии проектирования систем управления избыточностью КБО.

В настоящей статье ставится задача создания общего подхода к организации информационной структуры и алгоритмов управления реконфигурированием избыточного комплекса с охватом возможно широкого круга

аспектов проблемы управления избыточностью. Конечной практической целью подхода является построение перспективной системы управления избыточностью (СУИ) комплексов бортового оборудования, решающей весь комплекс задач управления избыточностью.

#### Задачи управления избыточностью

В основе концепции управляемой избыточности лежит понятие конфигурации избыточных ресурсов, как функционально приемлемой, выделенной для решения задач КБО взаимосвязанной совокупности его аппаратных и/или программных компонентов. В общем случае задача управления избыточностью КБО сводится к выбору и реализации предпочтительной конфигурации его компонентов [14]. Управление избыточностью заключается в мониторинге состояния конфигураций, выборе наилучшей в текущих условиях конфигурации и ее реализации с использованием доступных средств (коммутация, инициализация, запуск программ и др.).

Задачами управления избыточностью в процессе функционирования КБО являются [20]:

- периодический мониторинг технического состояния аппаратных компонентов КБО и каналов передачи данных, целостности и правильности функционирования программных модулей;

- формирование индексов готовности (ИГ) и показателей функциональной эффективности (ПФЭ) компонентов и конфигураций;

- выбор предпочтительной конфигурации из множества допустимых (из соображений исправности, принадлежности к классу решаемых задач и т.д.) конфигураций;

- валидация (подтверждение соответствия требованиям) предпочтительной конфигурации;
- реализация предпочтительной конфигурации через коммуникационные средства БИВС и механизм распределения функциональных приложений по вычислительным модулям.

#### Супервизоры конфигураций

Центральным понятием предлагаемого подхода является понятие *супервизора конфигурации* [13, 20, 22]. Супервизор конфигурации (СК) представляет собой сложную информационно-управляющую структуру, предназначенную для «надзора» над соотнесенной с ним конфигурацией, задачами которого являются:

- проведение или организация мониторинга работоспособности охватываемых компонентов и в целом своей конфигурации;

- участие в конкурсе (межсупервизорном арбитраже) на выявление конфигурации, предпочтительной в текущих условиях (с приобретением по его итогам победившим в нем СК – статуса доминирующего супервизора (ДСК), а соотнесенной с ним конфигурации – статуса доминирующей конфигурации);

- активизация своей конфигурации при победе в арбитраже (с замещением ею предыдущей конфигурации КБО) путем управления коммутационной системой и распределением приложений.

СК может быть реализован как программный или программно-аппаратный модуль. Для СУИ, базирующейся на ресурсах центральной вычислительной системы КБО, наибольший практический интерес представляет программная реализация СК, описанная ниже.

Рис. 1 иллюстрирует место совокупности СК в общей архитектуре КБО.

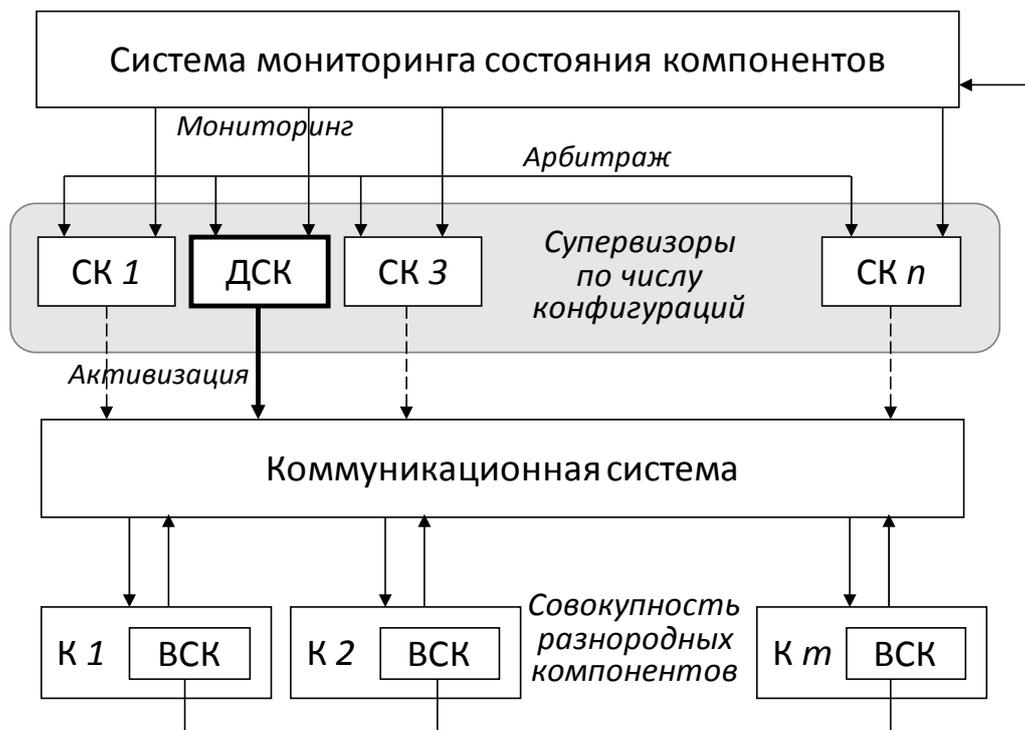


Рис. 1. Роль и место супервизоров конфигураций в структуре КБО.

Для участия в любой формируемой конфигурации каждый компонент должен предоставить соответствующему супервизору информацию о своей готовности (индекс готовности – ИГ) к выполнению возложенных на него функций на основе следующих данных встроенного самоконтроля:

- наличие и правильное функционирование необходимого обеспечения (питание, охлаждение, ресурсы выделенной памяти и процессорного времени и пр.),
- доступность для коммуникации (наличие проводной и/или беспроводной связи, готовность к работе буферов, портов и пр.),
- работоспособность (положительные результаты самотестирования, подтвержденная ранее надлежащим выполнением основных функций, отсутствие или приемлемая частота зафиксированных ранее сбоев),
- завершение установки и запуска исполняемых программ (при наличии),
- завершение загрузки необходимых для работы массивов библиотечных данных (при наличии).

Каждый супервизор независимо от других решает следующие задачи:

- содержит информацию о соотношенной с ним конфигурации КБО (состав и правила взаимодействия и активизации/инициализации аппаратных и программных компонентов, входящих в его конфигурацию);
- содержит информацию о компонентах, входящих в его конфигурацию, необходимую для обработки ИГ и ПФЭ (порядковые номера, соотношение с группами компонентов, адреса и протоколы обращения к ВСК и т.д.);
- осуществляет периодический мониторинг готовности компонентов, входящих в его конфигурацию, с формированием ИГ конфигурации;
- формирует команды на выбор ПФЭ компонентов, формирования ПФЭ конфигурации в целом, а также приоритета выбора групп ПФЭ для участия в арбитраже;

– реализует процедуры арбитража СК в соответствии с установленным регламентом<sup>1</sup>;

– производит валидацию конфигурации, соотношенной с ДСК, т.е. осуществляет защиту от ошибок оперативного объединения компонентов в конфигурацию, соответствующую решаемой задаче и режиму функционирования КБО;

– управляет коммутационной системой и программной системой распределения функциональных приложений с целью реализации (подготовка и активация) конфигурации, соответствующей ДСК;

– находясь в статусе ДСК, организует согласованную циклическую работу всех функций управления избыточностью.

Таким образом, совокупность всех СК содержит информацию обо всех возможных и просчитанных заранее конфигурациях, приемлемых для конкретного КБО, и, кроме того, занимается формированием каждой отдельной конфигурации.

Супервизорный способ во многом схож с подходом на базе распределенного локального диспетчера [12], однако выгодно отличается от него возможностью управления избыточностью не только вычислительных ресурсов, но всего разнородного оборудования комплекса. Кроме того, благодаря использованию ПФЭ супервизорный способ позволяет не только поддерживать отказоустойчивость, но и обеспечивать различные предпочтительные (желаемые, задаваемые) характеристики системы.

#### Информационная структура супервизора

Для практической реализации программных СК в бортовых вычислителях необходима рациональная организация соответствующих информационно-управляющих структур в составе системного программного обеспечения управления избыточностью (СПО УИ) [20].

<sup>1</sup> Правила проведения арбитража являются предметом отдельного рассмотрения.

Структурная схема супервизора конфигурации представлена на рис. 2.

В состав супервизора конфигурации входят следующие программные модули:

- *таблица конфигурации*, где хранится информация о соотношенной конфигурации, которая записывается заранее на этапе разработки системы и вместе с текущей информацией о готовности компонентов используется модулем арбитража конфигураций;

- *таблица показателей функциональной эффективности*, где хранится информация о ПФЭ компонентов соотношенной конфигурации;

- *буфер индексов готовности*, где хранится информация о готовности каждого компонента соотношенной конфигурации;

- *модуль мониторинга*, осуществляющий процедуры сбора данных о состоянии компонентов соотношенной конфигурации (формирует команды запроса готовности

и получает информацию о готовности от ВСК компонентов), их обработки для принятия решения о готовности конфигурации в целом с получением результата в виде ИГ;

- *модуль режимов*, корректирующий ПФЭ в зависимости от режима работы КБО (этап полета, режимы аварийности, критичность состояния, режимы работы наиболее важных подсистем и пр.), а также действий и команд экипажа;

- *модуль арбитража*, осуществляющий выбор предпочтительной конфигурации в сложившихся условиях;

- *управляющий модуль*, формирующий команды валидации и реализации конфигурации, а также обеспечивающий согласованную циклическую работу всех модулей СУИ совместно со всем КБО;

- *вспомогательные процедуры и буферные файлы*, необходимые для организации целостной бесперебойной работы основных функций СК.

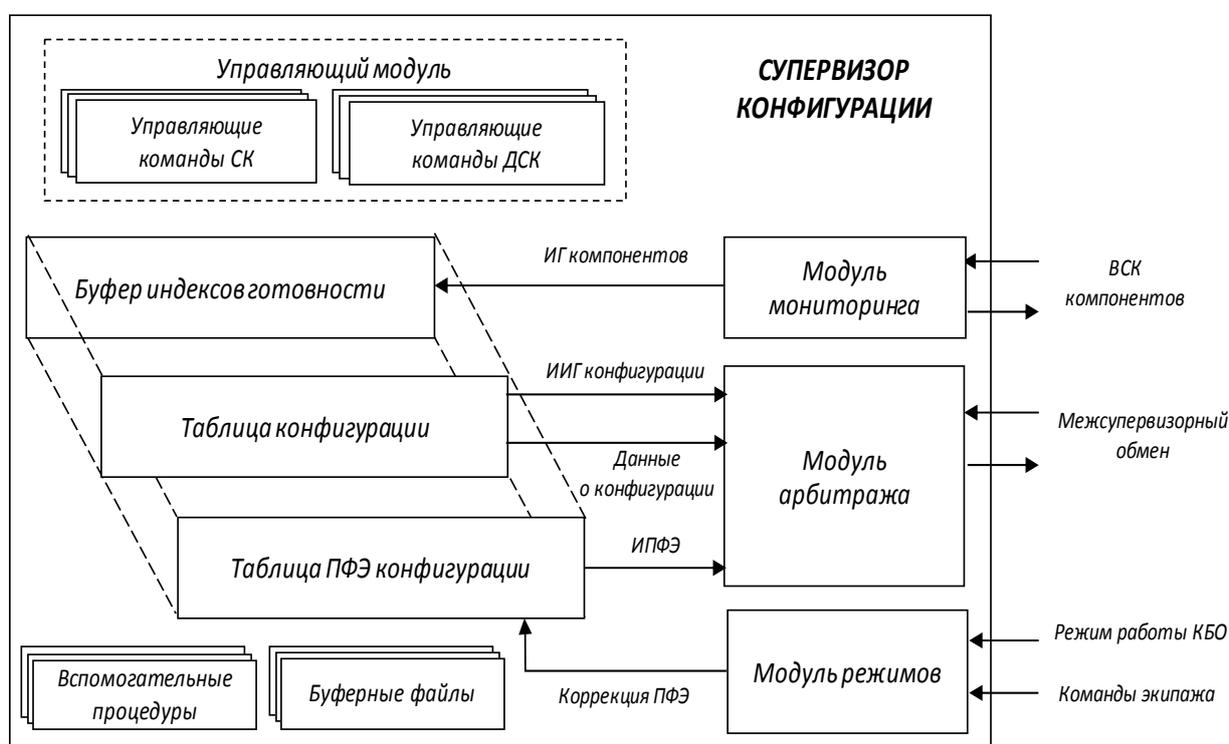


Рис. 2. Структура супервизора конфигурации: ИИГ – интегральный ИГ, ИПФЭ – интегральный ПФЭ.

К управляющим командам супервизора относятся команды, которые СК формирует для обслуживания своей конфигурации постоянно, независимо от статуса доминирования (запуск мониторинга, управление формированием ИГ, ПФЭ, подготовка и участие в арбитраже и пр.), а также команды, которые он формирует, будучи в статусе ДСК (управление другими СК через синхропакеты, валидация и реализация своей конфигурации).

### Организация управления избыточностью КБО

Копии всех супервизоров размещены в каждом из вычислителей КБО, потенциально обладающих правом (возможностью) управлять избыточностью БИВС и/или комплекса в целом. При этом в текущий момент времени функции управления избыточностью выполняет только доминирующий СК, победивший в арбитраже между СК, размещенными в  $\alpha$ -вычислителе, победившем в свою очередь в арбитраже вычислителей.

При этом циклически (в штатных условиях) или по событию обнаружения неправильного функционирования (отказа) или изменения режима работы КБО соблюдается следующая логика (иерархия):

- выполняется *межвычислительный арбитраж*, по результатам которого определяется и инициализируется  $\alpha$ -вычислитель, под управлением которого выполняются все последующие действия алгоритма; остальные вычислители в части управления избыточностью находятся в «горячем»<sup>2</sup> или «холодном»<sup>3</sup> резерве, контролируя действия  $\alpha$ -вычислителя;

<sup>2</sup> Горячий резерв (в смысле управления избыточностью) – вычислитель делает то же самое, что и  $\alpha$ -вычислитель, кроме участия в управлении избыточностью.

<sup>3</sup> Холодный резерв (в смысле управления избыточностью) – вычислитель только получает данные от  $\alpha$ -вычислителя, никаких других операций в рамках УИ не выполняет, может временно использоваться для решения других сторонних задач.

б)  $\alpha$ -вычислитель инициирует работу всех СК, размещенных в нем и в других активных вычислителях, выполняющих:

– подготовку данных для проведения арбитража конфигураций (мониторинг готовности компонентов, сбор и предварительная обработка данных каждой конфигурации),

– проведение *межсупервизорного арбитража* для определения ДСК с учетом ИГ и ПФЭ конфигураций<sup>4</sup>;

в) одновременно с действиями п. б) в  $\alpha$ -вычислителе активируется работа ДСК по инициализации соотнесенной с ним конфигурации (в первом цикле управления избыточностью такой ДСК назначается), включая:

– валидацию конфигурации,  
– выставку (согласование) режимов и начальных условий компонентов конфигурации,  
– запуск компонентов конфигурации,  
– контроль функционирования компонентов и конфигурации в целом,

– составление и фиксирование отчетных данных;

г) все остальные СК в вычислителях горячего резерва находятся в “пассивном” режиме работы, сопровождаемом:

– осуществлением каждым из них мониторинга готовности компонентов соотнесенной конфигурации,  
– предоставлением информации для ДСК,  
– приемом сервисной информации от ДСК,  
– контролем регулярности и адекватности действий ДСК;

д) по окончании цикла управления избыточностью или при обнаружении факта неправильности функционирования ДСК другими СК, заключающегося в:

– превышении допустимого времени ожидания пакетов синхронизации,  
– нарушении логики синхронизации,  
– недопустимом значении параметров процессов и пр., полномочия текущего ДСК истекают и запускается повторный арбитраж СК в соответствии с пунктом б);

е) при обнаружении любым другим вычислителем признаков неправильного функционирования  $\alpha$ -вычислителя запускается межвычислительный арбитраж в соответствии с пунктом а).

С целью обеспечения плавности (бесконфликтности) перехода от одной конфигурации КБО к другой могут использоваться дополнительные (буферные) конфигурации КБО, к которым предъявляются пониженные требования по качеству функционирования объекта в целом, но повышенные требования по минимизации задержек формирования конфигурации и предотвращению недопустимых процессов при включении и отключении основных конфигураций.

Особенности реализации алгоритмов выполнения арбитража вынесены за рамки данной статьи.

## Система управления избыточностью КБО

Реализующая предложенный подход система управления избыточностью КБО включает:

1) компоненты КБО со встроенными средствами контроля каждого<sup>5</sup>;

2) резервированные вычислители или вычислительные узлы, объединенные центральной сетью;

3) коммуникационную систему КБО в виде резервированных коммутационных компонентов БИВС и резервированных каналов передачи данных;

4) систему диспетчеризации<sup>6</sup> модулей программного обеспечения (бортовых функциональных приложений);

5) специальное программное обеспечение вычислителей (СПО УИ), основу которого составляют СК по числу конфигураций КБО.

Укрупненная функциональная схема СУИ показана на рис. 3.

На схеме первый из набора вычислителей является  $\alpha$ -вычислителем. В нем среди  $n$  супервизоров белым фоном выделен ДСК. Тонкими стрелками показаны команды и информационные посылки, связанные с запросами о готовности компонентов и реализацией конфигурации, пунктирными – с межсупервизорным арбитражем, жирными – с межвычислительным арбитражем.

Конкретные схемы и процедуры организации работы СУИ в составе КБО должны определяться разработчиком на этапе проектирования с учетом всех влияющих факторов и ограничений: особенностей построения КБО, работы системного программного обеспечения, возможностей вычислительных устройств, протоколов передачи данных и т.д.

При этом в общем случае возможны следующие варианты работы СУИ:

1) *Циклическая работа СУИ по таймингу ДСК* (рис. 4-а), подразумевающая выполнение всех функций СУИ (мониторинг, арбитраж, валидация, инициализация конфигурации) на каждом цикле. Вариант может быть реализован при достаточных для этих целей вычислительных ресурсах и пропускных возможностях обмена данными.

2) *Работа СУИ по факту отказа* (рис. 4-б, в): при штатной безотказной работе КБО в неизменном режиме на каждом цикле выполняются только функции мониторинга и оценки режимов работы (формирование ИГ и ПФЭ). После обнаружения на очередном цикле отказа компонентов и/или изменения режима КБО запускаются процедуры арбитража с определением и инициализацией  $\alpha$ -вычислителя и ДСК. Такая организация работы СУИ позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты и снизить информационные потоки.

<sup>4</sup> В случае неразрешимости арбитража применяются заранее принятые дискриминационные правила, например, по наименьшему или наибольшему порядковому номеру СК.

<sup>5</sup> При этом часть (подразумевается, что большая) оборудования КБО может быть объединена путем связей через коммуникационные компоненты БИВС, а часть – соединена с вычислителями напрямую через линии разовых команд, выделенные шины CAN и др.

<sup>6</sup> Подразумевается, что диспетчеризация программных компонентов выступает в качестве управляющей функции СУИ наравне с коммутационной системой БИВС. Особенности реализации диспетчеризации ПО в данной работе не рассматриваются.

Центральная вычислительная система

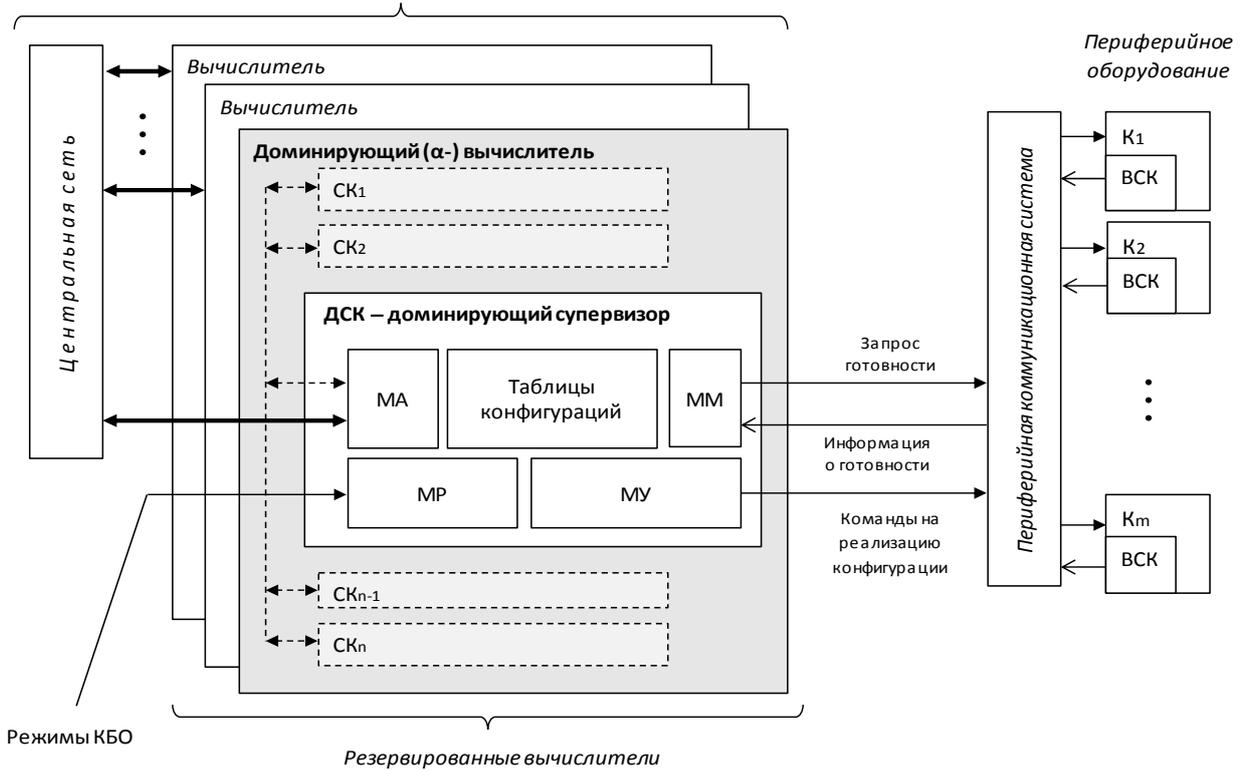


Рис. 3. Функциональная схема СУИ:  $K_1 \dots K_m$  – компоненты периферийного оборудования КБО,  $СК_1 \dots СК_n$  – супервизоры конфигураций МА – модуль арбитража, ММ – модуль мониторинга, МР – модуль режимов, МУ – управляющий модуль.

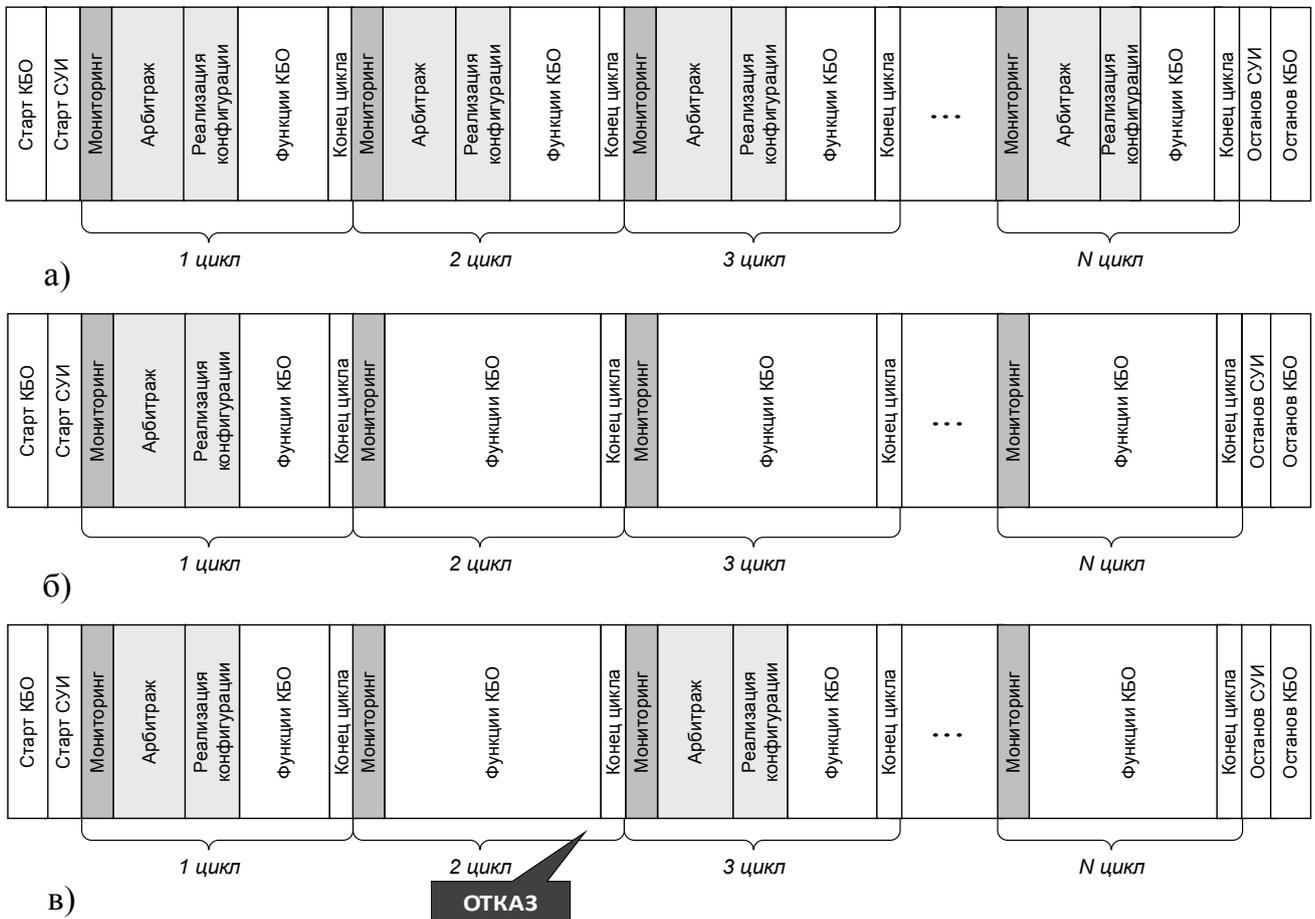


Рис. 4. Варианты организации работы СУИ: а) циклический в полном объеме, б) циклический в сокращенном объеме, в) после обнаружения отказа в случае сокращенного объема.

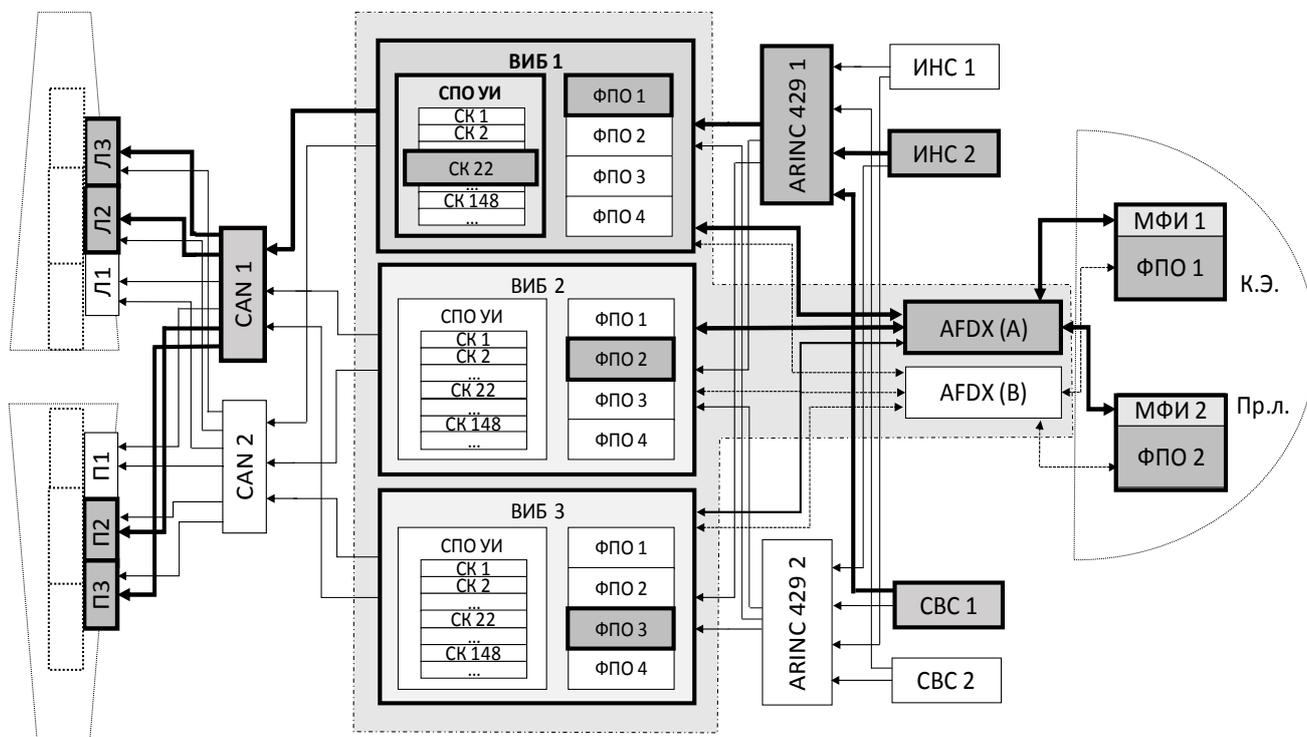
В обоих указанных вариантах на первом цикле выполняется полный объем функций СУИ с применением стартовых конфигураций, возможно заданных заранее или сохраненных по результатам предыдущей сессии работы КБО (предыдущего полета).

Для реализации СУИ по указанным схемам необходима проработка средств мониторинга, формирования, хранения и реализации «буферных» конфигураций. Также необходима разработка программных процедур обмена информационными посылками между вычисли-

телями и модулями арбитража СК, а также процедур постановки в резерв или очередь (извлечения из резерва или очереди) СК и вычислителей в процессе арбитража.

### Методический пример

В качестве примера рассмотрим гипотетический КБО воздушного судна транспортной категории с управляемой избыточностью, структурная схема которого показана на рис. 5-а.



а)

№ СК	СВС		ИНС		ARINC			ВИБ				ФПО		AFDX		CAN		МФИ		СП элеронов								
	Осн.	Рез.	К.т.1	К.т.2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	А	В	1	2	КЭ	Пр.	ЛЗ	Л2	Л1	П1	П2	П3		
4					1,3			5			5	7		9			7,9		7		15	14	16					16
22					1	4		5	6		5,6	7	8	9			7,8		7,8		15	14	16	16				16
113	X		X		X	2,4		X	6	6	8		9	9	X	9	X		8	15	15	X	17	17	17	17		

б)

Рис. 5. Комплекс бортового оборудования с СУИ: а) структурная схема, б) фрагмент таблицы конфигураций.

Центральная вычислительная сеть КБО состоит из трех однородных вычислительно-интерфейсных блоков (ВИБ), связанных дублированной сетью передачи данных по ARINC 664. Программное обеспечение каждого ВИБ содержит: системное ПО на базе операционной системы реального времени с копией СПО УИ (с одинаковым для всех ВИБ набором супервизоров);

одинаковый набор из четырех функциональных приложений (1 – самолетовождения, 2 – обеспечения посадки, 3 – контроля оборудования, 4 – аварийного пожаротушения).

В качестве периферийных оконечных устройств используются: дублированная система воздушных сигналов (СВС) и две инерциальных навигационных системы

(ИНС) различного класса точности, соединенные с ВИБ через мультиплексные коммутаторы сигналов ARINC429; шесть электрогидравлических приводов трехсекционных элеронов, управляющие контроллеры которых соединены с ВИБ посредством дублированной шины ARINC825 (CAN); два многофункциональных индикатора (МФИ) в кабине экипажа (командира экипажа и правого летчика), соединённых с ВИБ по сети ARINC664 (через дублированный сетевой коммутатор).

В примере рассмотрены три типовые ситуации состояния комплекса и соответствующие им конфигурации:

1) Штатная работа КБО – режим полета по маршруту. ВИБ 1 работает в качестве  $\alpha$ -вычислителя, в котором реализуется супервизор № 4: работают основная СВС, ИНС 1-го класса точности; ФПО самолетовождения запущено в вычислителе ВИБ 1, соответствующий ему информационный кадр индицируется на МФИ командира экипажа; ФПО контроля запущено в вычислителе ВИБ 3, соответствующий кадр индицируется на МФИ правого летчика; пилотирование осуществляется через шину CAN 1 путем работы полетной конфигурации элеронов (ЛЗ и ПЗ).

2) Смена режима КБО – режим захода на посадку. В результате очередного цикла СУИ побеждает и реализуется супервизор № 22: работают основная СВС, ИНС 2-го класса точности; дополнительно в вычислителе ВИБ 2 запускается ФПО захода на посадку, соответствующий информационный кадр индицируется на МФИ командира экипажа; кадр ФПО самолетовождения переключается на МФИ правого летчика; через шину CAN 1 начинает работу посадочная конфигурация элеронов (ЛЗ, Л2, П2, ПЗ). Данная конфигурация выделена на рисунке жирными линиями.

3) Отказная ситуация – пожар левого двигателя и связанные с ним отказы части оборудования и ВИБ 1, повреждение крайнего левого элерона. Из-за отказа ВИБ-1 в результате арбитража на очередном цикле СУИ в качестве  $\alpha$ -вычислителя активизируется ВИБ 2, в нем побеждает и реализуется супервизор № 113, который осуществляет переключение на резервную СВС и ИНС 2; запуск в ВИБ 4 ФПО аварийного пожаротушения и перенос ФПО самолетовождения из отказавшего ВИБ 1 в ВИБ 2; информационный кадр аварийного ФПО индицируется на МФИ обоих членов экипажа для принятия соответствующих мер; через шину CAN 2 начинает работу аварийная конфигурация элеронов (Л2, Л1, П1, П2) для парирования отказа элерона ЛЗ.

Соответствующий фрагмент сводной таблицы конфигураций, содержащей информацию о связях между компонентами (верхняя подстрока каждого СК – связи по входам, нижняя – по выходам соответствующего компонента), представлен на рис. 5-б.

Пример демонстрирует работу СУИ при смене режима работы КБО и деградации его компонентов.

### Заключение

Таким образом, супервизорный способ управления избыточными ресурсами (избыточностью) комплекса бортового оборудования заключается в применении в составе бортовых вычислителей информационно-управляющих программных структур – супервизоров конфигураций, осуществляющих мониторинг готовно-

сти разнородных компонентов КБО с формированием ИГ и ПФЭ компонентов, выбор предпочтительной (из соображений готовности, эффективности по определенным заранее отдельным или комплексным показателям, принадлежности к классу решаемых задач и т.д.) конфигурации путем участия в процедуре многоуровневого арбитража супервизоров, с последующей ее реализацией через коммутационные средства бортовой интегрированной вычислительной среды.

Основной особенностью предлагаемого способа управления избыточностью технических систем, отличающей его от известных способов реконfigurирования, является переход от замещения отдельных компонентов из соответствующих ресурсов, требующего интерфейсной однородности и функциональной универсальности компонентов, к замещению всей конфигурации целиком, снимающему ограничения на однородность и универсальность компонентов каждого ресурса.

Создание системы управления избыточностью КБО на базе представленного подхода позволит обеспечить предельно достижимые характеристики надёжности и безопасности воздушных судов, реализовать в рамках концепции АНБО переход к новым стратегиям технического обслуживания, снизив финансовые затраты самолетостроительных компаний и эксплуатантов.

### Литература

1. Государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности на 2013-2025 годы» // URL: [http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Vizualizatsiya\\_GP\\_RAP\\_140507.pdf](http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Vizualizatsiya_GP_RAP_140507.pdf) (дата обращения 26.10.2020).
2. Перспективная авионика гражданской авиации. Роль и место бортового оборудования воздушных судов на современном этапе развития авиации // URL: <http://www.modern-avionics.ru/analytics/2014/modern-role-of-avionics-ircraft/part-4/#> (дата обращения 26.10.2020).
3. Алешин Б.С., Бабкин В.И., Гохберг Л.М. и др. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу: Справочное пособие. М.: Изд. ФГУП ЦАГИ, 2014.
4. Парамонов П.В., Жаринов И.О. Интегрированные бортовые вычислительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 1–17.
5. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.
6. Грант РФФИ 09-08-13564. Фундаментальные основы создания авионики необслуживаемого бортового оборудования летательных аппаратов (2008-2009 гг.) // URL: [http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project\\_search/o346304](http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o346304) (дата обращения 26.10.2017).
7. Bukov V., Kutahov V., Bekkiev A. Avionics of Zero Maintenance Equipment // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Nice, France, ICAS 2010). CD-ROM Proceedings. 2010. P. 7–1–1.
8. Авакян А.А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Труды МАИ. 2013. № 65. С. 29.

9. Тарасов А.А. Функциональная реконфигурация отказоустойчивых систем. М.: Логос. 2012.

10. Клепиков В.И. Отказоустойчивость распределенных систем управления. М.: Золотое сечение. 2014.

11. Дегтярев А.Р. Киселев С.К. Отказоустойчивые реконфигурирующиеся комплексы интегрированной модульной авионики // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. № 1, т. 12. С. 89–99.

12. Каляев И.А., Мельник Э.В. Децентрализованные системы компьютерного управления. Ростов н/Д: Изд. ЮНЦ РАН. 2011.

13. Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф. Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 72–82.

14. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф. Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем // А и Т. 2017. № 9. С. 67–83.

15. Гамаюнов И.Ф. Генерирование альтернативных решений в задаче управления избыточностью технических комплексов // А и Т. 2018. № 4. С. 92–104.

16. Агеев А.М. Конфигурирование избыточных комплексов бортового оборудования // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 4. С. 175–192.

17. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф. Интеграция комплекса оборудования выбранной конфигурации // А и Т. 2019. № 4. С. 105–125.

18. Буков В.Н., Бронников А.М. Тестирование конфигураций избыточных интегрированных комплексов оборудования // А и Т. 2019. № 2. С. 76–95.

19. Агеев А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф., Шурман В.А. Управление избыточностью вычислительных ресурсов интегрированной модульной авионики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. № 6. Т. 20. С. 376–383.

20. Буков В.Н., Бронников А.М., Агеев А.М., Гамаюнов И.Ф., Озеров Е.В., Шурман В.А. Концепция управляемой избыточности комплексов бортового оборудования // Науч. чтения по авиации, посвящ. пам. Н.Е. Жуковского: Матер. XVI Всерос. науч.-практ. конф. 11–12 апр. 2019, Москва / Гл. ред. С.П. Халютин. М.: ИД Акад. Жуковского, 2019. С. 17–33.

21. Буков В.Н., Воробьев А.В., Гнусин М.Ю., Дьяченко А.М., Шурман В.А., Яковлев Ю.В. Способ автоматического управления избыточностью неоднородной вычислительной системы и устройство для его реализации. Патент RU 2612569 С2. Бюл. № 7 от 09.03.2017.

22. Боблак И.В., Буков В.Н., Воробьев А.В., Евгенов А.В., Шурман В.А. Способ автоматического управления неоднородной избыточностью комплекса оборудования и устройство для его реализации. Патент RU 2646769 С2. Бюл. № 7 от 07.03.2018.

23. Боблак И.В., Бронников А.М., Буков В.Н., Воробьев А.В., Евгенов А.В., Шейнин Ю.Е., Шурман В.А. Способ управления избыточностью бортовой интегрированной вычислительной среды и устройство для его реализации. Патент RU 2647339 С2. Бюл. № 8 от 15.03.2018.

## Перечень используемых сокращений

АНБО – авионика необслуживаемого бортового оборудования,

БИВС – бортовая интегрированная вычислительная среда,

ВИБ – вычислительно-интерфейсный блок,

ВСК – встроенные средства контроля,

ДСК – доминирующий супервизор конфигурации,

ИГ – индекс готовности,

ИИГ – интегральный индекс готовности,

ИМА – интегрированная модульная авионика,

ИНС – инерциальная навигационная система,

ИПФЭ – интегральный показатель функциональной эффективности,

КБО – комплекс бортового оборудования,

МА – модуль арбитража,

ММ – модуль мониторинга,

МР – модуль режимов,

МУ – модуль управления,

МФИ – многофункциональный индикатор,

ПО – программное обеспечение,

ПФЭ – показатель функциональной эффективности,

СВС – система воздушных сигналов,

СК – супервизор конфигурации,

СПО УИ – системное программное обеспечение управления избыточностью,

СУИ – система управления избыточностью,

УИ – управление избыточностью,

ФПО – функциональное программное обеспечение,

AFDX – Avionics Full-Duplex Switched Ethernet,

CAN – Controller Area Network.

## Сведения об авторах:

### Агеев Андрей Михайлович.

Место работы: ВУНЦ ВВС «ВВА» им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина г. Воронеж, докторант.

Телефон: 8-980-343-73-41, 8-960-120-99-44.

e-mail: ageev\_bbc@mail.ru.

Адрес организации: 394064, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, д. 54а.

### Буков Валентин Николаевич.

Место работы: АО «Научно-исследовательский институт авиационного оборудования», г. Жуковский, ведущий научный сотрудник.

Телефон 8-916-120-43-54;

e-mail: v\_bukov@mail.ru.

Адрес организации: 140185, г. Жуковский, Московская обл., ул. Туполева, д. 18

### Шурман Владимир Александрович.

Филиал АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», г. Жуковский, заместитель главного конструктора.

Телефон 8-916-132-15-12;

e-mail: shurmanva@mail.ru.

Адрес организации: 140103, г. Раменское, Московская обл., ул. Гурьева, д. 2

*Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.*