

5. Poki C., Mon-Chau S., Zhi-Yuan Z, Zi-Fan Z., Chun-Yan C. A Fully Digital Time-Domain Smart Temperature Sensor Realized With 140 FPGA Logic Elements // Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on. – 2007. – V. 54. – № 12. – PP. 2661–2668.

6. Maggioni S., Veggetti A., Bogliolo A., Croce L. Random Sampling for On-Chip Characterization of Standard-Cell Propagation Delay // Proceedings of the 4th International Symposium on Quality Electronic Design. – 2003. – PP.41–45.

7. Churayev S.O., Matkarimov B.T., Paltashev T.T. On-chip measurements of standard-cell propagation delay // Design & Test Symposium. – 2010. – PP. 179–181.

8. Чураев С.О. Встраиваемые системы контроля параметров интегральных схем пикосекундного разрешения: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2012. – 154 с.

Кустарев Павел Валерьевич – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kustarev@yandex.ru

Быковский Сергей Вячеславович – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bsv.serg@gmail.com

УДК 681.324

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИИ СЕТИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Е.В. Книга, И.О. Жаринов

Рассматриваются принципы сетевой организации бортовых цифровых вычислительных систем. Наиболее распространенные сегодня на практике сетевые топологии, которыми являются «двойная звезда» и «общая шина», не отвечают основным требованиям сетевой организации, предъявленным к вычислительным системам перспективных летательных аппаратов согласно концепции интегрированной модульной авионики. Предлагается новое техническое решение для построения отказоустойчивой вычислительной системы, основанное на использовании смешанной топологии, которая совмещает в себе элементы двух известных топологий – «полносвязная сеть» и «двойная звезда». Данное техническое решение позволяет улучшить показатели качества работы вычислительной системы. В работе особое внимание уделено показателям надежности вычислительной системы, построенной по принципу смешанной топологии при различных способах назначения выполняемых задач на доступные вычислительные ресурсы. Результатом практической реализации предложенной топологии бортовой цифровой вычислительной системы является ее структура, внедренная в реальную практическую разработку в авиационной промышленности.

Ключевые слова: сетевые технологии, интегрированная модульная авионика, вычислительные системы.

Введение

В соответствии с современными тенденциями развития авионики бортовые цифровые вычислительные системы (БЦВС) представляют собой многомашинные вычислительные комплексы, интегрированные в единый конструктив. За счет использования свойств интеграции реализуется возможность практически неограниченного увеличения производительности систем путем включения в них дополнительных вычислительных модулей. Свойства интеграции проявляются в полной мере при соблюдении следующих требований к сетевой организации БЦВС [1–4]:

- должны использоваться открытые стандарты на аппаратное и программное обеспечение;
- топология вычислительной сети БЦВС должна быть масштабируемой;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать высокий уровень взаимосвязанности;
- сетевые требования не должны вводить расширение номенклатуры используемых типов конструктивно-функциональных модулей (КФМ);
- должна обеспечиваться полная взаимозаменяемость КФМ по форме, установке и функциям;
- топология вычислительной сети БЦВС должна поддерживать различные уровни защиты данных;
- топология вычислительной сети БЦВС должна иметь возможность изменения конфигурации с целью реализации свойства отказоустойчивости системы.

В известных сегодня реализациях отечественных бортовых комплексов: «БВС-1» [5], многопроцессорный вычислительный комплекс (МПВК) [6] (ЗАО НИП «Авиационная и морская электроника»), «Базис 5.0» [7] (ОАО «Научно-конструкторское бюро вычислительных систем») используются различные сетевые топологии: «линия», «двойная звезда», «общая шина».

Топология типа «линия» не отвечает требованиям по надежности вычислительной системы. При топологии типа «двойная звезда» выход из строя одного из модулей коммутаторов повлечет за собой неисправность сегмента сети или, возможно, сети в целом. При использовании топологии типа «общая шина» узким местом

системы является сам элемент общей шины, при неисправности которого отказывает БЦВС, также при такой топологии невелика пропускная способность внутреннего канала обмена, особенно при большом количестве абонентов.

В связи с этим одной из актуальных задач современного авиационного приборостроения является разработка перспективной сетевой организации БЦВС, ориентированной на достигнутый уровень знаний в области системотехники и на имеющуюся в наличии у разработчиков номенклатуру элементной базы.

Целью настоящей работы является анализ существующих решений организации сетевой топологии БЦВС перспективных летательных аппаратов и описание авторами предлагаемой новой сетевой топологии, отвечающей современным требованиям концепции интегрированной модульной авионики и улучшающей количественные показатели бортового оборудования.

Анализ существующих технических решений при построении многомашинных вычислительных комплексов

Среди множества возможных конфигураций различают [8] полносвязные (когда каждый из абонентов сети непосредственно связан со всеми остальными абонентами) и неполносвязные сети. Из неполносвязных конфигураций различают: ячеистая топология, кольцевая топология, звездообразная топология и конфигурация общая шина.

Согласно технической документации МПВК [6] предназначен для многоканальной цифровой обработки больших потоков информации в реальном масштабе времени и может быть использован как в качестве автономной бортовой вычислительной системы, так и для построения кластерных суперЭВМ. В состав МПВК входит:

- до 7–8 модулей цифровых процессорных сигналов (МЦПС), представляющих собой двухпроцессорную систему (один процессор установлен на основной плате, второй – на дополнительном мезонинном модуле);
- модуль центрального процессора (МЦП);
- объединительная кросс-плата межмодульных соединений;
- модуль блока питания.

Для организации внутрисистемного взаимодействия используются стандартный интерфейс – системная шина CompactPCI (PICMG 2.0 D3.0) и специализированные интерфейсы. Уровень внутрисистемного взаимодействия представлен:

- системным уровнем, который обеспечивает организацию информационного взаимодействия сигналов МЦПС с МЦП по стандартному магистрально-шинному интерфейсу CompactPCI;
- уровнем информационного взаимодействия МЦПС, который обеспечивает высокоскоростной обмен данными между модулями МЦПС по специализированному интерфейсу;
- уровнем межпроцессорного взаимодействия, который обеспечивает обмен данными между основным и мезонинным процессорами в модуле МЦПС.

На рис. 1 изображена внутренняя структура МПВК с внутренними связями. Топология внутренней сети состоит из топологии типа «линия» при соединении контроллеров специализированного интерфейса модулей МЦПС и топологии типа «общая шина», по которой соединяются все контроллеры CompactPCI модулей МЦПС и модуля МЦП.

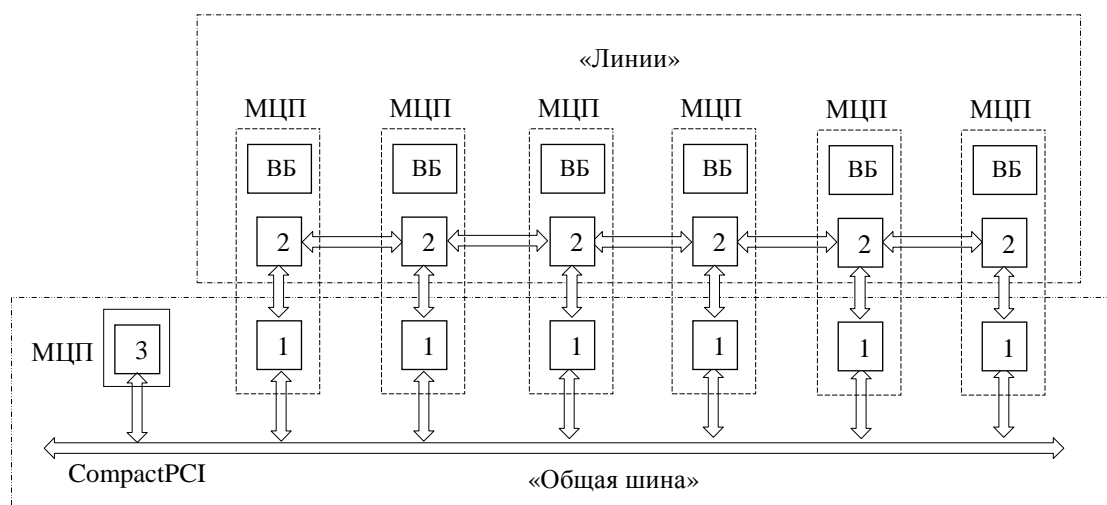


Рис. 1. Сетевая топология МПВК: 1 – контроллер CompactPCI МЦПС; 2 – контроллер специализированного интерфейса МЦПС; 3 – контроллер CompactPCI МЦП; ВБ – вычислительный блок

Проект «Базис 5.0» [7] предназначен для применения в качестве унифицированных базовых аппаратно-программных средств в комплексах бортового оборудования перспективных самолетов разных типов. «Базис 5.0» состоит из модуля универсального процессора данных (МУПД), модуля унифицированного носителя мезонинов (МНМ), модуля сетевого коммутатора AFDX (МСК), модуля вторичных источников электропитания (МВЭ), модуля сопряжения МУПД (МС МУПД), модуля оптических интерфейсов ARINC818 (МОИ А818), модуля сопряжения универсальный (МСУ) и модуля сопряжения МВЭ (МС МВЭ). Все модули соединены быстродействующей распределенной коммутационной средой PCI-Express.

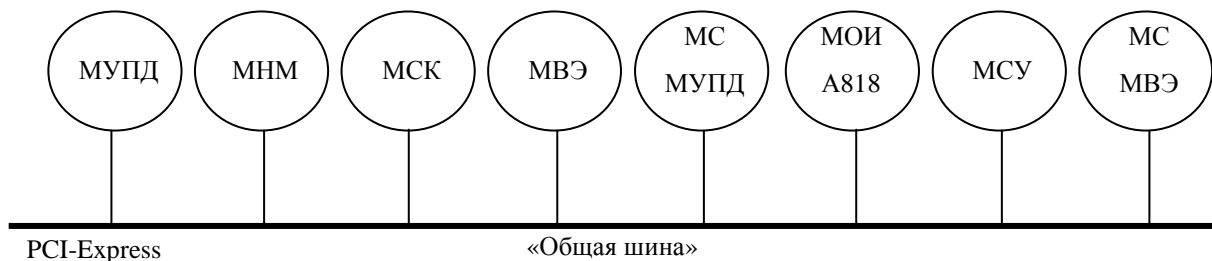


Рис. 2. Сетевая топология комплекса «Базис 5.0»

Сетевая топология комплекса «Базис 5.0» представлена на рис. 2. Топология соответствует стандартной сетевой топологии типа «общая шина».

Бортовая вычислительная система (БВС-1) [5] предназначена для выполнения вычислительных и управляющих функций в составе информационно-управляющих систем перспективных комплексов бортового оборудования военной и гражданской авиации. БВС-1 обеспечивает резервированную полнодуплексную связь на основе последовательного высокоскоростного интерфейса коммутируемой архитектуры между установленными в нее интеллектуальными электронными модулями и, также, связь с другими системами бортового оборудования. БВС-1 состоит из модулей процессора общего назначения (МПОН) и модуля коммутатора (МК). Архитектура системы является симметричной многопроцессорной с дублированной средой коммутации каналов стандарта ARINC664. Топология внутренней сети системы БВС-1 изображена на рис. 3 и является топологией типа «двойная звезда».

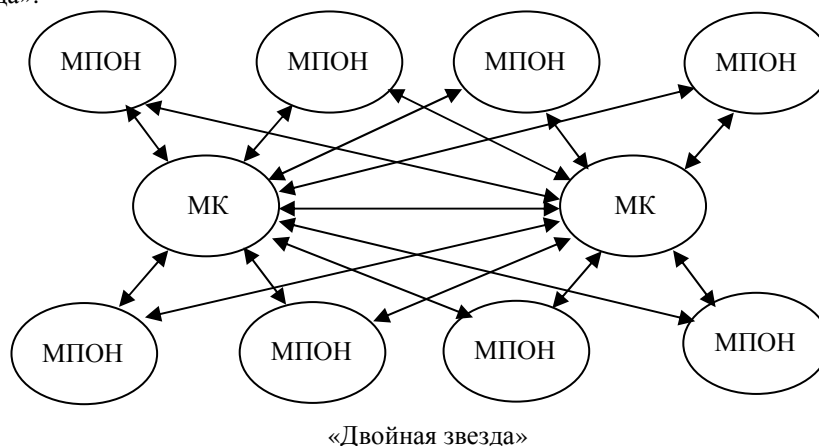


Рис. 3. Сетевая топология системы БВС-1

Архитектура БЦВС на основе интерфейса SpaceWire

Одним из путей практической реализации перспективных БЦВС является путь построения вычислительных систем с применением технологии коммутируемых высокоскоростных интерфейсов SpaceWire в качестве внутрисистемного интерфейса, а также в качестве внешнего интерфейса для подключения сетевых абонентов в составе летательного аппарата.

Результатом практической реализации применения интерфейсов SpaceWire для построения бортовой цифровой вычислительной системы является структура БЦВС «Крейт» разработки ФГУП «СПб «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», приведенная на рис. 4 [6, 9–12]. БЦВС построена на основе унифицированных КФМ. В качестве КФМ выступают разные по назначению модули:

- вычислительные модули, производящие сложные расчеты для управления полетом летательного аппарата;
- модули ввода-вывода, обеспечивающие функции обмена информацией по последовательным каналам, мультиплексным каналам обмена, разовым командам;
- графические модули, обрабатывающие изображение для его вывода на средства бортовой индикации;

- модули постоянной памяти, предназначенные для хранения функционального программного обеспечения;
- модули электропитания, обеспечивающие преобразования напряжения бортовой резервированной сети во вторичные напряжения, необходимые для электропитания модулей.

Структурная схема БЦВС подробно рассмотрена в работе [1].

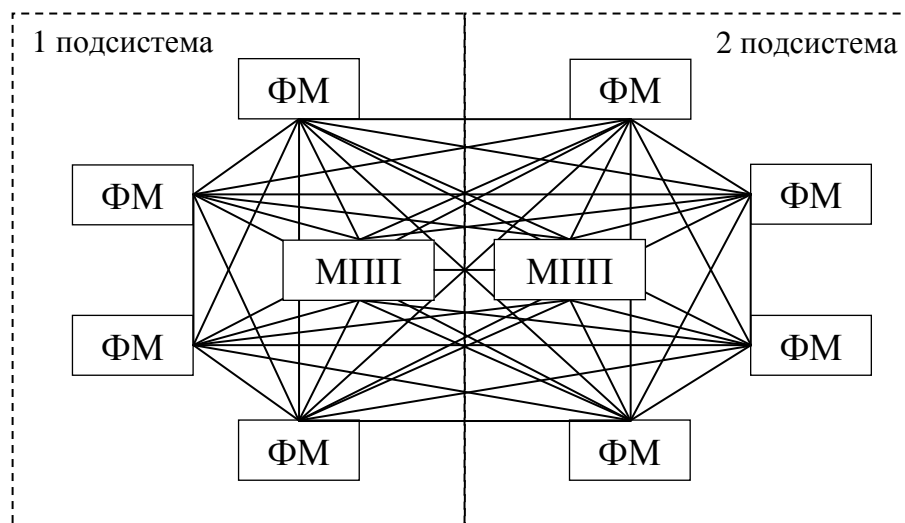


Рис. 4. Комбинированная схема сетевой топологии БЦВС «Крейт»: МПП – модуль постоянной памяти; ФМ – функциональный модуль

В основу архитектуры БЦВС положены составляющие сетевой топологии коммутации модулей по схеме типа «двойная звезда» и «полносвязная сеть».

Сетевая топология системы «Крейт», представленная на рис. 4, является смешанной топологией. С одной стороны — это полносвязная сеть, так как все модули соединены между собой, но также тут присутствуют схемные решения топологии типа «двойная звезда», так как все ФМ соединены с двумя модулями МПП, которые обеспечивают работу комплекса в целом (распределяют задачи, контролируют состояние исправности компонентов и т.п.). Соединяя в себе достоинства обоих сетевых решений, система «Крейт»:

- повышает надежность работы комплекса, позволяя не только реализовать скользящее резервирование компонентов, но и перераспределять пути трафика данных при выходе из строя соединительных связей;
- достигает максимальную пропускную способность благодаря подключению всех абонентов сети по типу «точка-точка» через неблокирующий коммутатор;
- обеспечивает программно управляемое исполнение функциональных задач авионики, позволяя реализовывать различные вычислительные структуры в одной конструкции. Это может быть организация распределенных вычислений или, например, организация мажорирования данных, причем изменение функций каждого из модулей возможно непосредственно во время полета.

Сравнение показателей надежности для различных вариантов назначения функциональных задач на вычислительные ресурсы

Архитектура системы «Крейт» обеспечивает несколько вариантов назначения функциональных задач на имеющиеся в системе вычислительные ресурсы:

- каждая из задач выполняется на собственном вычислительном устройстве;
- все задачи выполняются на одном вычислительном устройстве;
- часть задач выполняется на индивидуальных вычислительных устройствах, остальные задачи выполняются на одном вычислительном устройстве, имеющемся в системе.

Используя разные правила назначения, появляется возможность за счет организации логических протоколов взаимодействия между модулями повысить надежность или увеличить количество решаемых задач. Сравним несколько вариантов решения задачи о назначении.

Первый вариант, когда для решения необходимого объема функций в полете достаточно 4 вычислительных модулей, еще 4 вычислительных модуля (из имеющихся 8) можно использовать в качестве резервной цепи для горячего резервирования (общее резервирование). Эквивалентная схема надежности для этого случая представлена на рис. 5.

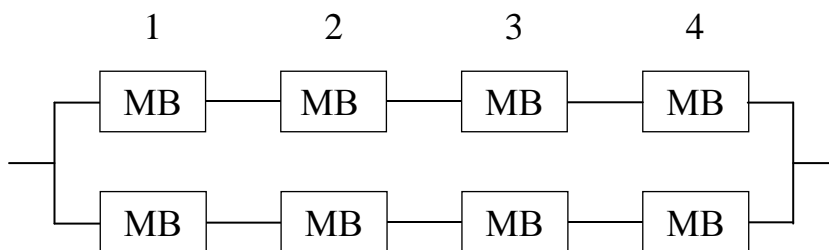


Рис. 5. Схема надежности вычислительной системы для варианта с резервированием в виде дублирования последовательных групп из 4 вычислительных модулей

Вероятность безотказной работы одного модуля $P(t)$ определяется по формуле:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов; t – время полета; $\lambda = 50 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$; $t = 25$ ч. Подставив исходные данные в (1), получим вероятность безотказной работы одного модуля: $P(t) = 0,99875$. Тогда вероятность отказа одного модуля $Q(t)$ определяется по формуле: $Q(t) = 1 - P(t) = 0,00124$.

Вероятность отказа системы по схеме рис. 5, будет определяться по формуле:

$$Q_{\text{сист}}(t) = \frac{1}{(m+1)!} [1 - (1 - Q_i)^{n_0}]^{m+1}, \quad (2)$$

где m – количество резервных цепочек ($m = 1$), n_0 – количество модулей в цепочке ($n_0 = 4$). Подставив исходные данные в (2), получим: $Q_{\text{сист}}(t) = 0,00001225$. Таким образом, средняя наработка на отказ системы для времени полета $t = 25$ ч:

$$T = \frac{t}{Q_{\text{сист}}(t)} = \frac{25}{0,00001225} = 2 \cdot 10^6 \text{ ч.}$$

Второй вариант – для решения необходимого объема функций в полете также достаточно 4 вычислительных модуля, но в системе реализована сетевая топология типа «полносвязная сеть». В таком случае каждый из 4 резервных модулей может заменить любой из основных (скользящее резервирование), не накладывая никаких ограничений на производительность БЦВС в целом. Эквивалентная схема надежности для такого случая представлена на рис. 6.

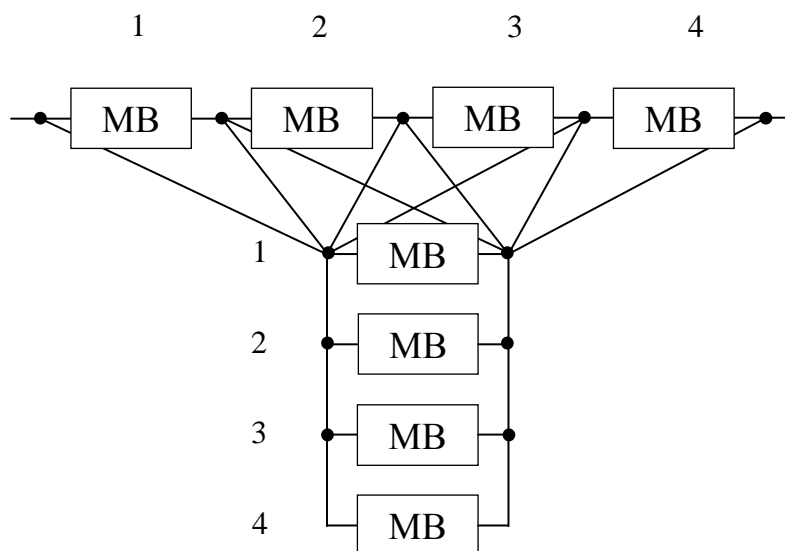


Рис. 6. Схема надежности вычислительной системы для случая с реализацией скользящего резервирования

Приближенное выражение для вероятности отказа за время t имеет вид: $Q_{\text{сист}}(t) = C_{n_0+m}^{m+1} Q_i^{m+1}$, где n_0 – количество модулей в основной цепочке, m – количество модулей в резервной цепочке, Q_i – вероятность отказа одного модуля, $C_{n_0+m}^{m+1}$ – сочетание (комбинаторика) т.е.:

$$Q_{\text{сист}}(t) = C_{n_0+m}^{m+1} Q_i^{m+1} = \frac{(n_0+m)!}{(m+1)!(n_0-1)!} Q_i^{m+1} = C_8^5 Q_i^5 = 56Q_i^5$$

Для тех же исходных значений ($Q_i = 0,00124$) имеем: $Q_{\text{сист}}(t) = 1,704 \cdot 10^{-13}$, что соответствует средней наработке на отказ группы для времени полета $t = 25$ ч:

$$T = \frac{t}{Q_{\text{сист}}(t)} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ ч.}$$

При этом полнота контроля модулей принята равной 1, что соответствует идеализированному случаю, когда любой отказ обнаруживается на 100%.

Заключение

В работе были рассмотрены различные сетевые топологии, используемые при организации архитектуры бортовых авиационных комплексов. Наибольшее распространение среди разработчиков получили топологии типа «двойная звезда» и «общая шина». Однако эти топологии не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к перспективным типам летательных аппаратов. Предложенная авторами топология, основанная на сочетании топологий «полносвязная сеть» и «двойная звезда», использует открытые стандарты на аппаратное и программное обеспечение. В основе построения задействованы конструктивно-функциональные модули с конструктивом 6U по VITA46, VITA48.2, которые являются взаимозаменяемыми по конструкции, месту установки и выполняемым функциям.

Топология сети «Крейт» допускает возможность масштабирования, ограниченную только возможностью коммутатора сети, установленного на каждом модуле, т.е. до 14 модулей в системе. «Полносвязная сеть» обеспечивает высокий уровень взаимной связанности компонентов при соединении по схеме «точка-точка». Предложенная топология не «порождает» новых типов узкоспециализированных конструктивно-функциональных модулей, исключая необходимость введения модуля-коммутатора. Как было показано в расчетах показателей надежности, предложенная топология предусматривает возможность изменения конфигурации сети в случаях отказа вычислительных узлов с приемлемыми для практики показателями надежности. Таким образом, предложенная топология удовлетворяет принципам организации сети по концепции, интегрированной модульной авионики.

Литература

1. Гатчин Ю.А., Жаринов И.О. Основы проектирования вычислительных систем интегрированной модульной авионики. – М.: Машиностроение, 2010. – 224 с. [[Содержание](#)]
2. Турчак А.А., Чернышев Е.Э. Михайлуца К.Т., Шейнин Ю.Е. Архитектура вычислительных систем для интегрированной модульной авионики перспективных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2002. – № 9. – С. 87–95.
3. Горбачев С.В., Рождественский Д.А., Суворова Е.А., Шейнин Ю.Е. Масштабируемые архитектуры распределенных систем на технологии SpaceWire на базе платформы «Мультикор» // Вопросы радиоэлектроники. – 2006. – № 2. – С. 69–80.
4. Парамонов П.П., 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. [[Текст статьи](#)]
5. Раменское приборостроительное конструкторское бюро. Бортовая вычислительная станция «БВС-1». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rpkb.ru, свободный. Яз. рус. (дата обращения 16.04.2013).
6. Севбо В., Орлов А., Лошаков А. Многопроцессорный вычислительный комплекс для задач «жесткого» реального времени // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 3. – С. 32–38.
7. Итенберг И. Интегрированная модульная электроника – новая стратегия на рынке приборостроения // Новый оборонный заказ. Стратегии. – 2010. – № 5. – С. 64–65.
8. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. – 3-е изд. – СПб: Питер, 2007. – 958 с.
9. Книга Е.В., Жаринов И.О., Богданов А.В., Виноградов П.С. Принципы организации архитектуры перспективных бортовых цифровых вычислительных систем в авионике // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2 (82). – С. 163–165. [[Текст статьи](#)]

10. Книга Е.В., Жаринов И.О. Топология внутренней электрической сети Spacewire для перспективных типов бортовых цифровых вычислительных систем авионики // Сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов научно-педагогической школы кафедры ПБКС «Информационная безопасность, проектирование и технология элементов и узлов компьютерных систем» / Под ред. Ю.А. Гатчина. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – Ч. 1. – С. 122–126. [[Текст сборника](#)]
11. Жаринов О.О., Видин Б.В., Шек-Иовсеянц Р.А. Принципы построения крейта бортовой многопроцессорной вычислительной системы для авионики пятого поколения // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2010. – № 4 (68). – С. 21–27.
12. Бондаренко И.Б., Коробейников А.Г., Прохожев Н.Н., Михайличенко О.В. Принятие технических решений с помощью многоагентных систем // ВВ: Кибернетика и программирование. – 2013. – № 1. – С. 16–20.

Книга Екатерина Викторовна – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ekovinskaya@gmail.com

Жаринов Игорь Олегович – Россия, Санкт-Петербург, ФГУП «Санкт-Петербургское опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», доктор технических наук, доцент, руководитель учебно-научного центра, igor_rabota@pisem.net