

Раздел V. Техническое зрение

УДК 004.383

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-275-287

Н.А. Бочаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ К УНИФИКАЦИИ БОРТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Исследования в области создания специализированных вычислительных комплексов для роботов ведутся во многих мировых научных центрах и в том числе в нашей стране. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями. Важной, но нерешенной проблемой остается оснащение таких вычислительных комплексов микропроцессорами отечественного производства. Одной из сложностей, препятствующей широкому внедрению отечественных средств вычислительной техники является проблема унификации и стандартизации составных бортовых частей вычислителей. Унификация модулей бортовых вычислителей позволила бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов за счет снижения цены и упрощения разработки и модернизации. В данной статье рассмотрены подходы к унификации и стандартизации элементов бортовых вычислителей, описан опыт развития стандартов ANSI/VITA в области бортовых вычислителей, а также приведены примеры вычислительных модулей в унифицированном формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус для бортовых вычислителей РТК. Проведены эксперименты с использованием унифицированных вычислительных модулей на базе микропроцессоров Эльбрус-2С3, Эльбрус-1С+ и Эльбрус-4С. Показана их применимость для создания бортовых вычислительных комплексов. Показана необходимость разработки отечественного стандарта для корпусов и форм-факторов бортовых вычислителей.

Бортовые вычислители; робототехника; COM-Express; VITA90; Эльбрус.

N.A. Bocharov

STUDY OF APPROACHES TO THE UNIFICATION OF ON-BOARD COMPUTERS

Research in the field of creating specialized computing systems for robots is conducted in many world scientific centers, including our country. The development of capabilities of sensor systems, global navigation systems, growth of computing power and improvement of algorithms allow creating onboard computing systems with broad intellectual capabilities. An important, but unsolved problem remains the equipping of such computing systems with domestically produced microprocessors. One of the difficulties hindering the widespread integration of domestic hardware is the problem of unification and standardization of the components of the onboard computers. Unification of onboard computer modules would open up new opportunities for developers of robotic systems by reducing the price and simplifying development and modernization. This article discusses approaches to the unification and standardization of elements of onboard computers, describes the experience of the development of ANSI/VITA standards in the field of onboard computers, and also provides examples of computing modules in a unified COM-Express form-factor based on Elbrus microprocessors for onboard computers. Experiments were conducted using unified computing modules

based on Elbrus-2C3, Elbrus-1C+ and Elbrus-4C microprocessors. Their applicability for creation of onboard computing complexes is shown. The necessity of developing a domestic standard for on-board computer housings and form-factors is shown.

Onboard computers; robotics; VITA90; COM-Express; Elbrus.

Введение. Управление современными автономными робототехническими комплексами (РТК) осуществляются с помощью специализированных бортовых вычислительных комплексов [1]. Развитие возможностей сенсорных систем, систем глобальной навигации, рост вычислительной мощности и совершенствование алгоритмов позволяют создавать бортовые вычислительные комплексы, обладающие широкими интеллектуальными возможностями.

Использование отечественных вычислительных средств, таких как средства вычислительной техники (СВТ) на базе микропроцессоров Эльбрус позволяют решить вышеозначенные вопросы [2, 3]. Одной из сложностей, препятствующей широкому внедрению отечественных СВТ является проблема унификации и стандартизации [4]. Унификация модулей бортовых вычислителей позволила бы открыть новые возможности разработчикам робототехнических комплексов за счет снижения цены и упрощения разработки и модернизации.

Почему унификация бортовых вычислителей так важна? Множество проекты по созданию и модернизации РТК находятся в стагнации из-за бюджетных ограничений. Для заказчика наиболее экономичным вариантом является модернизация, так как разработка нового РТК с нуля дороже и дольше. Модернизация бортового вычислителя - это гораздо больше, чем просто повышение скорости обработки информации. Подобная модернизация зачастую добавляет принципиально новые возможности РТК. Появляется возможность извлекать больше информации из потоков данных, генерируемых датчиками всех типов. Появляется возможность добавлять новые более точные датчики.

Замена бортового вычислителя – наиболее эффективный способ выполнить такого рода модернизацию. Если габариты и внешние интерфейсы постоянны, то можно использовать одно и то же пространство РТК без необходимости проведения сложных конструкторских работ.

Еще одним преимуществом, которое можно получить на этих этапах обновления, является замена проприетарной или устаревшей подсистемы. Это открывает возможность для конкуренции, что приводит к появлению инноваций по более конкурентоспособным ценам. Особенно актуально это в условиях технологических ограничений, когда поставки определенных компонентов бортовых вычислителей сопряжены с большими трудностями.

Кроме того, модульный подход обеспечивает превосходное снижение рисков с точки зрения устаревания технологий и возможность внедрения экономически эффективных технологий. По мере развития технологий модули могут быть заменены и / или обновлены по мере необходимости, что позволяет поддерживать программы с длительным жизненным циклом. Хотя замена модуля не будет производиться в полевых условиях, фактическое обновление может быть выполнено с минимальным эффектом и вполне может не оказать влияния на охлаждение или энергопотребление платформы.

Целью данной работы является исследование подходов к унификации и стандартизации элементов бортовых вычислителей. Приведены примеры отечественных вычислительных модулей в унифицированном формате COM-Express на базе микропроцессоров Эльбрус для бортовых вычислителей РТК.

Особенности СВТ бортовых вычислительных комплексов. Средства вычислительной техники (СВТ) для РТК обычно входят в состав бортовых систем этих комплексов, поэтому требования к этим СВТ во многом определяются требо-

ваниями к самим РТК. Кроме того, в зависимости от области применения и целей робототехнических комплексов, задачи, исполняемые СВТ, могут существенно различаться, а как следствие, могут существенно различаться требования к производительности и набору внешних интерфейсов самих вычислителей. Обобщая, можно сказать, что производительность СВТ должна быть достаточной для обработки данных с датчиков РТК (при автономном функционировании), а внешние интерфейсы должны обеспечивать возможность подключения датчиков и системы связи. Суммируя сказанное, в зависимости от типа РТК, могут предъявляться различные требования по следующим параметрам:

- ◆ предельные массогабаритные требования;
- ◆ требования к системе охлаждения СВТ;
- ◆ требования к бортовой электросети и потребляемой мощности СВТ
- ◆ требования к производительности
- ◆ требования к внешним интерфейсам.

Кроме того, надо учесть, что по конструктивным требованиям блок вычислителя должен быть выполнен в виде отдельного конструктивного элемента, который должен иметь возможность надежного крепления на шасси РТК и обладать одним или несколькими удобными разъемами, обеспечивающими высокоскоростной обмен и возможность быстрого монтажа/демонтажа блока на шасси РТК.

На данный момент требования к этим параметрам не описаны государственными стандартами Российской Федерации. Существующие и разрабатываемые бортовые вычислители производятся малыми сериями и, как правило, не взаимозаменяемые. Однако, за рубежом существует большое количество стандартов (например стандарты ANSI VITA), которые формализуют требования к различным параметрам бортовых вычислителей.

Стандарт VNX VITA 74. Спецификация VNX VITA 74 основана на стандартах VPX и OpenVPX, адаптированная к меньшему форм-фактору. Цель спецификации VNX – взять концепции, которые сделали VPX успешным, и применить их к платформе малого форм-фактора с аналогичной архитектурой, а также использовать другие успешные стандарты для разъемов, подключаемости и форм-факторов, чтобы конкретно снизить риск разработки и время вывода на рынок. В следующем обсуждении будет проведено сравнение и противопоставление VNX и VPX в отношении размера, веса, мощности и стоимости, также известных как SWaP-C.

VNX – это коммерческий стандарт готовых модулей (COTS) для одноплатных компьютеров малого форм-фактора (SFF) с кондуктивным охлаждением, чрезвычайно прочных, сигнальных процессоров и модулей ввода-вывода, которые будут использоваться как часть интегрированной системы.

При разработке нового стандарта компании, разработавшие стандарт VNX SFF, стремились минимизировать экономические, технические и календарные риски. Интерфейсы электрических сигналов и топология заимствованы непосредственно из VPX (VITA 46) и OpenVPX (VITA 65). Структура электрических сигналов VITA 74.0 и шины данных PCIe идентична структуре, указанной в VITA 46. Профили слотов модулей разрабатываются с самого начала аналогично профилям VITA 65. Разъем VNX является производным от разъема FMC (VITA 57); та же серия разъемов, но с другим расположением контактов. Этот разъем показал свою работоспособность на скоростях PCIe Gen3 и выше, что делает его применимым для высокоскоростных подключений к шине передачи данных, видео, хранилищу данных.

Множество модулей одноплатных компьютеров VNX используют процессорные мезонинные платы PCI COM Express Mini типа 2 и 10, что еще сокращает время вывода устройства на рынок, риски и стоимость. Модули ввода-вывода VNX используют другой стандарт Mini PCI Express (miniPCIe). Модули miniPCIe

были интегрированы в носитель VNX, что позволяет использовать множество существующих модулей ввода-вывода от многих различных производителей в системе, вдохновленной VNX.

Стандарт COM Express. COM Express – это отраслевой стандарт, который существует уже более десяти лет и получил широкое распространение в индустрии. Модуль COM Express предоставляет все компоненты, необходимые для управляющего компьютера, со стандартным набором интерфейсов ввода-вывода, включая Ethernet, PCIe, SATA, USB и видео. Для передачи сигналов требуется несущая плата. Для модулей COM Express было определено несколько типоразмеров, обеспечивающих хорошую масштабируемость для широкого спектра применений. Базовый формат COM Express имеет размеры 95 мм x 125 мм.

Несмотря на то, что COM Express хорошо подходит для встраиваемых приложений, он изначально не подходит для очень экстремальных применений, таких как удары и вибрация, часто встречающиеся в воздушных и наземных транспортных средствах. Исторически сложилось так, что эта технология в основном применялась в безопасных промышленных условиях.

Однако этот недостаток базового модуля можно устранить, добавив дополнительные монтажные отверстия. Базовая спецификация определяет пять монтажных отверстий по краям модуля для монтажа. Такая конфигурация оставляет середину платы (особенно в области разъема на модуле Type 6) подверженной сильной вибрации. Добавление трех дополнительных отверстий (рис. 1) для снижения влияния вибраций обеспечивает очень крепкий модуль, который можно легко использовать в жестких условиях.



Рис. 1: Дополнительные монтажные отверстия в модуле COM Express

Для бортового применения, где размер, вес, мощность и цена ограничены, охлаждение требует применения современных методов монтажа для обеспечения теплового контакта с процессором. Эти методы особенно важны при работе с современными процессорами повышенной мощности, такими как Эльбрус-8С, Эльбрус-2С3 и Эльбрус-16С.

Стандарт мезонина XMC. XMC – это мезонинный стандарт, который поддерживает высокоскоростные протоколы (такие как PCIe Gen 1/2/3). Использование XMC в качестве мезонина внутри подсистемы обеспечивает возможность использования возможностей, специфичных для конкретного применения, таких как связь, обработка графической информации, хранение данных и многие другие. Кроме того, он определяет надежную систему соединителей, обеспечивающую поддержку широкого спектра применений.

Обновлением стандарта XMC (XMC 2.0) является добавление альтернативного разъема (VITA 61), который обеспечивает поддержку 7,5 Гбит/с, что дает поддержку PCIe Gen 2 (с большим запасом) и возможность поддержки Gen 3. Поскольку XMC предназначен для работы как с воздушным, так и с кондуктивным охлаждением, его удобно применять в жестких условиях.

VITA 75. VITA 75 – это стандарт, определяющий жесткий малогабаритный форм-фактор компонентов бортовых вычислителей. Хотя подсистемы по стандарту VITA 75 предназначены для эксплуатации в жестких условиях, стандарт не включает устойчивость к климатическим воздействиям в спецификации. Отчасти это связано с тем, что климатические требования будут сильно различаться в зависимости от целевой платформы и области применения. Разработчики подсистем VITA 75 сами определяют климатические требования к поставляемым ими подсистемам.

VITA 75 отличается от VITA 73 и VITA 74 тем фактом, что в ней основное внимание уделяется корпусу, как в части габаритов, так и в части устойчивости к механическим воздействиям. Также в VITA 75 включены спецификации типов разъемов для подключения внешних устройств.

К разработке стандарта VITA 75 приложили руку такие ведущие производители вычислительной техники, как Curtiss-Wright Controls Defense Solutions, CSP, Inc., Elma Bustronic, GE Intelligent Platforms, General Dynamics Canada, Lockheed Martin, Mercury Computer Systems, TE Connectivity и Xellerix.

VITA 75 появился в ответ на растущий спрос на все более компактные и легкие встраиваемые вычислительные подсистемы. Он определяет оболочку, в которую должна вписываться подсистема, внешние интерфейсы питания и данных, интерфейсы монтажа и интерфейсы охлаждения. VITA 75 – это стандарт жесткого малогабаритного форм-фактора (rugged small form factor), который доступен уже более пяти лет.

Несколько особенностей VITA 75 делают его особенно привлекательным для бортовых применений, где необходимо минимизировать размер, вес, потребляемую мощность и цену. Во-первых, это позволяет использовать различные передние панели, таким образом требования к разъемам питания и ввода-вывода могут быть решены на более поздних этапах разработки РТК. Также стандарт определяет широкий диапазон типоразмеров корпусов. Одним из наиболее привлекательных элементов VITA 75 является то, что он определяет различные типы модулей, поддерживающих объединение как блэйдс через объединительную плату, так и без необходимости использования объединительной платы.

В настоящее время определены три типа охлаждения, обеспечивающие широкий спектр применений: кондуктивное, принудительное воздушное и подача на холодную стенку.

Объединение COM Express и XMC в VITA 75. Проектирование бортовых вычислителей неизбежно включает в себя ряд компромиссов, при которых разработчик выбирает компромисс между производительностью с одной стороны, и размер, вес, потребляемая мощность и цена – с другой. Обычно целью является максимизация производительности при минимизации размера, веса и потребляемой мощности.

Примером бортового вычислителя по стандарту VITA 75 является MAGIC1 от GE (рис. 2). Основанная на стандарте VITA OpenVPX в формате 3U, система объемом менее 3 кубических дециметров, весе менее 5.5 кг и энергопотреблении менее 120 Вт. Комбинируя одноплатный компьютер и графический процессор (GPU), он позволяет относительно небольшой и легкой подсистеме обеспечивать пиковую производительность > 900 ГФЛОПС.



Рис. 2. GE MAGIC1

Не смотря на множество потенциальных применений такого вычислителя, он может не подходить для случаев, где не требуется значительная вычислительная мощность, но требуется минимальные размер, вес, и потребляемая мощность.

Используя другие модули стандарта VITA 75, можно создать вычислитель (см. рис. 3) с существенно меньшими размером, весом, и потребляемой мощностью по сравнению с системой 3U VPX, описанной выше. При использовании другого модуля COM Express (например E2C3-COM на основе Эльбру-2С3), наряду с другой подсистемой ввода-вывода, может быть создан вычислитель, обеспечивающая пиковую вычислительную производительность около 300 ГФЛОПС, при этом размер и вес уменьшаются более чем вдвое, а потребляемая мощность составляет менее 50 Вт. За счет еще большего уменьшения производительности может быть получена очень низкая мощность (например, для увеличения продолжительности автономной работы), до менее чем 25 Вт.

Одним из существенных преимуществ использования такого блочного подхода является то, что можно избежать дорогостоящих соединителей и бэкплейнов, путем простого объединения вычислительных модулей (например, модуль COM Express, подключенный к общему носителю с дополнительной возможностью размещения мезонина ХМС). Такой подход также может избежать проблем с целостностью сигнала, которые могут возникать при традиционном подходе с бэкплейном. При проектировании по-прежнему требуется особое внимание, поскольку для поддержки высокоскоростных протоколов, таких как PCIe Gen 3, необходимо тщательно учитывать потери в разъеме, диэлектрик печатной платы и сигнал.

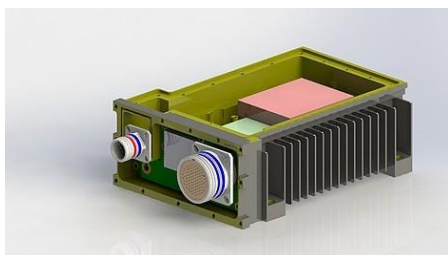


Рис. 3. VITA 75/COM Express

VITA 90. VITA 90 – это новый проект стандарта жесткого малогабаритного форм-фактора (SFF), который является прямым потомком VITA 74, который идеально подходит для бортовых вычислителей для военных и аэрокосмических применений.

Типичные модули VITA 74 и VITA 90 имеют размер примерно колоды игральных карт (рис. 4). Оба имеют электронную архитектуру, аналогичную OpenVPX. За последние несколько лет рабочими группами была проделана большая работа по преобразованию VITA 74 в VITA 90.



Рис. 4. Типовой модуль VITA74/90 19 мм

Оригинальный стандарт VNX был разработан и оптимизирован для военных / аэрокосмических применений, требующих больших вычислительных ресурсов. Первые вычислители по этому стандарту основывались на базе одного или нескольких одноплатных компьютеров на основе процессоров Intel, таких как Intel Atom и AMD G-Series, со встроенной графикой и относительно маломощными ядрами общего назначения. В этих системах первого поколения использовался готовый компьютер-на модуле (COM), модули ввода-вывода и флэш-память, установленные на носителях VNX, в которых размещены модули COM Express Type 2 и Type 10, Mini PCI Express (mPCIe) I/O модули и диск mSATA.

Базовый стандарт ANSI/VITA 74.0-2017 был выпущен со списком будущих подстандартов, которые должны были быть разработаны и внедрены для оптимизации сложных систем ввода-вывода VNX. Два из этих подстандартов добавили бы концепцию бэкаплайна “Соединительные модули”, необходимого для обеспечения высокоскоростной/широкополосной оптической и коаксиальной передачи данных как для между модулями, так и внутри одного модуля. Другие подстандарты определили бы электромеханику для одномодульных вычислителей и определили бы особенности для высокоэффективного / высокоомощного модуля VNX в части охлаждения.

VITA 74.4, также известный как SpaceVNX, документирует конкретные электронные и механические особенности, необходимые для внедрения радиационно-стойких модулей VNX для применения в малых космических аппаратах. В процессе разработки этих подстандартов технический комитет VITA 74 рассмотрел требования правительства и промышленности к производительности модулей и варианты их использования. Комитет решил пойти ва-банк и полностью оптимизировать назначение выводов оригинального вычислительного модуля VITA 74.0 VNX и модуля ввода-вывода для обеспечения максимальной целостности сигнала, а также внедрить в стандарт панели в стиле OpenVPX для управления, данных, расширений и ввода-вывода.

Эволюция VNX от простого стандарта модулей к семейству стандартов, которые будут описывать технологию, необходимую для сборки сложных бортовых вычислителей, была обусловлена военными и аэрокосмическими разработчиками семейства стандартов VITA 65 OpenVPX в сообществах VSO, SOSA и Hardware Open Systems Technologies (HOST). В результате эволюционных изменений в разьеме SEARAY целостность сигнала всех высокоскоростных каналов обмена заметно повысилась, и обновленные платы теперь могут обеспечивать поддержку PCI Express 4.0 и других современных протоколов.

В дополнение к разьему SEARAY новые соединительные модули VNX были специально разработаны для поддержки высокоскоростной передачи данных с использованием различных интерфейсов: волоконно-оптического, коаксиального и изолированных медных контактов. Пример такого соединительного модуля показан на рис. 5.



Рис. 5. Базовая плата модуля VITA 90 VNX+ с 240-контактным разьемом

Эти эволюционные изменения были сочтены настолько революционным улучшением по сравнению с возможностями базового стандарта ANSI/VITA-74.0 VNX, что руководство VITA и SOSA решило, что новые возможности должны быть закреплены в новом семействе стандартов – ANSI/VITA 90, а конкретно в стандарте VNX-Plus (VNX+).

VNX + включает в себя не только 400-контактный разъем SEARAY от Samtec, как определено в базовом стандарте VITA 90.0, но и новые дополнения, необходимые для поддержки сигнальных процессоров, радиопередатчиков, графических процессоров, сетевых коммутаторов и других модулей ввода-вывода, требующих коаксиальной или оптической передачи сигналов. Эти модули будут использовать 240 или 320-контактный высокоскоростной разъем SEARAY для передачи данных, как определено в подстандарте VITA 90.2. VITA 90.3 описывает модуль источника питания VNX+, использующий 320-контактный разъем SEARAY, и модуль накопления энергии (накопительный конденсатор и/или аккумулятор), использующий 240-контактный разъем SEARAY. Пример реализации VNX+ показан на рис. 6.

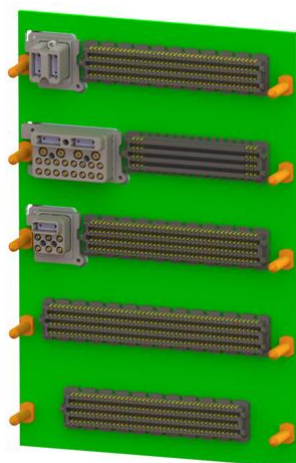


Рис. 6. Пример бэкплейна VITA 90 VNX+

В настоящее время уже доступны или официально объявлено о разработке множества модулей с функциональностью, необходимой для вычислений, обработки сигналов, связи и ввода-вывода. Примеры модулей VNX +, которые существуют сегодня, модифицируются из VNX или находятся в процессе разработки, включают:

- ◆ Модули преобразования мощности и хранения энергии для систем малой, средней и высокой мощности.
- ◆ Вычислительные модули с двухъядерными процессорами Intel Core i7 11-го поколения (ранее Tiger Lake) и четырехъядерными процессорами Intel Atom текущего поколения.
- ◆ Модули NVIDIA GPGPU, использующие графический процессор Jetson AGX Xavier.
- ◆ Модули FPGA, использующие различные SOC и MPSoC с ядрами Arm.
- ◆ Модули RFSOCs и MPSoCs и сопутствующий приемопередатчик.
- ◆ Радиационно стойкие модули управления для космических применений.
- ◆ Модули ввода-вывода для шин данных MIL-STD-1553, ARINC 429 и MIL-1394B/AS5643.

- ◆ Модули ввода-вывода с интерфейсами RS-232/422/485, CAN и Gigabit Ethernet.
- ◆ Коммутаторы Gigabit Ethernet и 10 GbE.
- ◆ Модули хранения данных, использующие твердотельные накопители mSATA.
- ◆ Инерциальные измерительные устройства MEMS с GPS.

По мере того как военные и аэрокосмические разработчики переходят на более компактные и интеллектуальные платформы, потребность в создании вычислителей меньшего размера становится все более важной. Чтобы получить больше “отдачи”, происходит все больший сдвиг парадигмы от электроники на заказ к решениям COTS и mCOTS. Чтобы свести к минимуму усилия, необходимые для модернизации систем за счет использования общего оборудования, интерфейсов связи и управления, необходимо создавать аппаратное обеспечение, которое может соответствовать стандартам MOSA от ANSI/VITA, SOSA, HOST и других консорциумов. VNX+ разрабатывается и внедряется с учетом всех этих требований.

Модули COM-Express на основе микропроцессоров Эльбрус. В настоящий момент на базе микропроцессоров Эльбрус реализовано три варианта вычислительных модулей в формате COM Express.

Вычислительный модуль «E4C/COM [5] реализован на базе микропроцессора «Эльбрус-4С». На базе отечественного микропроцессора Эльбрус-1С+ ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука» разработан процессорный модуль МП18 [6], выполненный в форм-факторе Com Express Type 6. Модуль E2C3-COM [7], разработанный также в ИНЭУМ, основан на процессоре Эльбрус-2С3, выполнен в форм-факторе COM Express Type 6 Basic.

Сравнение характеристик рассмотренных вычислительных модулей приведено в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики модулей

	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Микропроцессор	Эльбрус-4С, 4 ядра, 800 МГц	Эльбрус-1С+, 1 ядро, 1 ГГц	Эльбрус-2С3, 2 ядра, 2 ГГц
Архитектура процессора	Эльбрус v4	Эльбрус v4	Эльбрус v6
Видеоядро	Нет	Встроенное	Встроенное
Контроллер ввода-вывода	КПИ	КПИ-2	Встроенный
Производительность, ГФлопс (FP32/FP64)	50/25	24/12	192/96
Оперативная память	4 Гбайта DDR3	4 Гбайта DDR3	8 Гбайт, ECC DDR4
Форм-фактор	COM Express Type 6	COM Express Type 6	COM Express Type 6
Габаритные размеры, мм	125×95×9,8	125×95×12	125×95×12
Масса, кг	0,14	0,12	0,11
Потребляемая мощность, Вт, не более	65	30	30
Год выпуска	2016	2018	2022

Рассмотренные вычислительные модули по условиям эксплуатации и характеру применения соответствуют условиям:

- ◆ пониженная рабочая температура окружающего воздуха минус 50 °С;

- ◆ пониженная предельная температура окружающего воздуха минус 60 °С;
- ◆ повышенная рабочая температура окружающего воздуха плюс 55 °С;
- ◆ повышенная предельная температура окружающего воздуха плюс 60 °С;
- ◆ пониженное атмосферное давление 84 кПа (630 мм рт.ст.);
- ◆ повышенное атмосферное давление 106,7 кПа (800 мм рт.ст.);
- ◆ повышенная относительная влажность воздуха 80 % при температуре плюс 25 °С без выпадения конденсата.

Перечень внешних интерфейсов рассмотренных вычислительных модулей приведен в табл. 2.

Таблица 2

Перечень внешних интерфейсов

Интерфейс	E4C/COM	МП18	E2C3-COM
Ethernet	1xEthernet 1000Base-T	1x10/100/1000 Mbit/s	1x10/100/1000 Mbit/s
USB 2.0	2	8	7
USB 3.0	0	0	4
Видео	нет	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS	2xHDMI, 2-х ка- нальный LVDS
SATA	3xSATA 2.0	4xSATA 3.0	3xSATA 3.0
RS232	2	2	2
Другое	SPI, I2C	SPI, I2C, SMBus	SPI, I2C, SMBus

Использование вычислительных модулей на основе микропроцессоров Эльбрус для решения задач РТК. Исследования по применимости вычислительной техники на базе микропроцессоров Эльбрус для задач робототехники проводились в ряде работ [8, 9], однако публикации на тему применимости процессоров Эльбрус 6-го поколения (Эльбрус-2С3, Эльбрус-12С, Эльбрус-16С) для задач робототехники на данный момент в открытых источниках отсутствуют.

Одной из самых сложных и важных задач мобильной робототехники является автономное движение в заранее неизвестной среде с препятствиями. Решение этой задачи состоит из нескольких подзадач:

- ◆ составления цифрового описания рабочей среды с определением зон, в которых робот может двигаться безопасно с заданной скоростью [10, 11]
- ◆ определение положения мобильного робота в заданной системе координат [12, 13];
- ◆ планирование траектории с учетом препятствий, кинематических и динамических возможностей мобильного шасси [14, 15];
- ◆ осуществления автономного движения вдоль спланированной траектории [16, 17].

Как показано в работе [18] задача поиска пути произвольно масштабируется до достижения оптимальных по времени характеристик и производительности самого слабого из рассмотренных процессоров (Эльбрус-4С) уже достаточно для ее решения. Задача диагностики рассмотрена в работе [19]. Использование средств ОС Эльбрус и модуля привязки времени позволяет добиться времени реакции на отказ менее 0.1 с.

Самой ресурсоемкой задачей для решения на борту РТК является задача технического зрения [20]. С использованием рассмотренных вычислительных модулей рабочая производительность на задаче стереозрения составила от 8 до 30 кадров в секунду, причем максимальная производительность достигнута на E2C3-COM. Из полученных результатов можно сделать вывод, что вычислительная тех-

ника на основе микропроцессоров серии Эльбрус в унифицированном форм-факторе SOM Express применима для создания бортовых вычислительных комплексов.

Заключение. В данной статье рассмотрены подходы к стандартизации и унификации компонентов бортовых вычислительных комплексов. Проанализирован опыт разработки стандартов в США консорциумом VITA. Подробно рассмотрены стандарты VITA74, VITA75, VITA90.

Рассмотренные унифицированные вычислители основываются на стандартных форм-факторах типа SOM Express и ХМС. В Российской Федерации есть опыт создания вычислителей в таких форм-факторах. В качестве примера рассмотрены вычислительные модули на базе отечественных микропроцессоров Эльбрус, выполненные в форм-факторе SOM Express. Проведены экспериментальные исследования и сделан вывод о применимости рассмотренных вычислителей для бортовых вычислительных комплексов РТК.

Проведение исследование показывает, что стандартизация в области бортовых вычислителей положительно повлияла на зарубежных производителей вычислительной техники. Отсутствие аналогичных стандартов в РФ может быть одним из ограничений, сдерживающих как развитие направления бортовых вычислителей, так и области робототехники в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов А.М. Обзор аппаратно-программного обеспечения систем управления роботом различного масштаба и назначения. Ч. 3. Экстремальная робототехника // Российский технологический журнал. – 2020. – Т. 8. – № 3 (35). – С. 14-32. – DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. Бычков И.Н., Лобанов И.Н., Молчанов И.А. Решения по включению средств защиты информации в вычислительные комплексы на основе платформы "Эльбрус" // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S4 (99). – С. 103-104. – DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
3. Бочаров Н.А. Программно-аппаратная платформа "Эльбрус" для решения задач искусственного интеллекта // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7 (107). – С. 638-640. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. Чучко П.А., Бычков И.Н., Панченко Е.Г. Проблема унификации модулей на основе процессора "Эльбрус-2С3" // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S7 (107). – С. 96-97. – DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. Режим доступа: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
6. Режим доступа: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
7. Режим доступа: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
8. Бочаров Н.А., Зуев А.Г., Славин О.А. Производительность микропроцессора Эльбрус-8СВ для решения задач технического зрения в условиях ограничений энергопотребления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 1 (218). – С. 259-271. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271.
9. Бочаров Н.А. Моделирование алгоритмов катастрофоустойчивости групп роботов на программно - аппаратной платформе "Эльбрус" // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 8-14. – DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
10. Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh. Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 38. – P. 1524-1531. – ISSN 2351-9789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
11. Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang. UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 106, 102918. – ISSN 0926-5805. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
12. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 157. – P. 261-269. – ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.

13. *Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos*. Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2020. – Vol. 131, 103567. – ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
14. *Lin S. et al.* A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots // *Machines*. – 2022. – Vol. 10, No. 9. – P. 773.
15. *Lamini, Said Benhlma, Ali Elbekri*. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 127. – P. 180-189. – ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
16. *Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei*. Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks // *Computer Networks*. – 2018. – Vol. 135. – P. 190-200. – ISSN 1389-1286. – <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
17. *Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto*. Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control // *Neural Networks*. – 2020. – Vol. 129. – P. 109-122. – ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.
18. *Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A.* Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "elbrus" // *CEUR Workshop Proceedings: Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017, Moscow, 24–26 ноября 2017 года*. – М., 2017. – P. 234-244.
19. *Бочаров Н.А., Гладких А.С., Парамонов Н.Б., Сенченков С.В.* Возможности микропроцессоров Эльбрус-8С и Эльбрус-8СВ для решения задач робототехники // *Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации: Сб. статей V военно-научной конференции, Анапа, 29–30 июля 2020 г.* – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение "Военный инновационный технополис "ЭРА", 2020. – С. 71-83.
20. *Бочаров Н.А., Парамонов Н.Б., Славин О.А., Суминов К.А.* Математические и программные модели задач технического зрения робототехнических комплексов на основе микропроцессоров "Эльбрус" // *Тр. Института системного программирования РАН*. – 2022. – 34 (6). – P. 85-100. – [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(6\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6).

REFERENCES

1. *Romanov A.M.* Obzor apparatno-programmnogo obespecheniya sistem upravleniya robotov razlichnogo masshtaba i naznacheniya. Ch. 3. Ekstremal'naya robototekhnika [Review of hardware and software for robot control systems of various scales and purposes. Part 3. Extreme robotics], *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2020, Vol. 8, No. 3 (35), pp. 14-32. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-3-14-32.
2. *Bychkov I.N., Lobanov I.N., Molchanov I.A.* Resheniya po vklyucheniuyu sredstv zashchity informatsii v vychislitel'nye komplekсы na osnove platformy "El'brus" [Solutions for the inclusion of information security tools in computing complexes based on the Elbrus platform], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2020, Vol. 13, No. S4 (99), S. 103-104. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.103.104.
3. *Bocharov N.A.* Programmno-apparatnaya platforma "El'brus" dlya resheniya zadach iskusstvennogo intellekta [Software and hardware platform "Elbrus" for solving artificial intelligence problems], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7 (107), pp. 638-640. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.638.640.
4. *Chuchko P.A., Bychkov I.N., Panchenko E.G.* Problema unifikatsii moduley na osnove protsessora "El'brus-2S3" [The problem of unification of modules based on the processor "Elbrus-2C3"], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2021, Vol. 14, No. S7 (107), pp. 96-97. DOI: 10.22184/1993-8578.2021.14.7s.96.97.
5. Available at: <http://www.mcst.ru/e4c-com>.
6. Available at: <http://www.sm1820.ru/2018/09/04/mp18/>.
7. Available at: <http://www.sm1820.ru/2021/12/10/e2c3-com/>.
8. *Bocharov N.A., Zuev A.G., Slavin O.A.* Proizvoditel'nost' mikroprotsessora El'brus-8SV dlya resheniya zadach tekhnicheskogo zreniya v usloviyakh ogranicheniy energopotrebleniya [The performance of the Elbrus-8SV microprocessor for solving problems of technical vision in conditions of limited energy consumption], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2021, No. 1 (218), pp. 259-271. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-1-259-271.

9. Bocharov N.A. Modelirovanie algoritmov katastrofoustoychivosti grupp robotov na programmno - apparatnoy platforme "El'brus" [Modeling of algorithms for disaster tolerance of robot groups on the Elbrus hardware and software platform], *Radiopromyshlennost'* [Radio Industry], 2019, No. 3, pp. 8-14. DOI: 10.21778/2413-9599-2019-29-3-8-14.
10. Suman Harapanahalli, Niall O Mahony, Gustavo Velasco Hernandez, Sean Campbell, Daniel Riordan, Joseph Walsh. Autonomous Navigation of mobile robots in factory environment, *Procedia Manufacturing*, 2019, Vol. 38, pp. 1524-1531. ISSN 2351-9789. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.134>.
11. Pileun Kim, Jisoo Park, Yong K. Cho, Junsuk Kang. UAV-assisted autonomous mobile robot navigation for as-is 3D data collection and registration in cluttered environments, *Automation in Construction*, 2019, Vol. 106, 102918. ISSN 0926-5805. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102918>.
12. Pieter M. Blok, Koen van Boheemen, Frits K. van Evert, Joris IJsselmuiden, Gook-Hwan Kim. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, Vol. 157, pp. 261-269. ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.046>.
13. Vasiliki Balaska, Loukas Bampis, Moses Boudourides, Antonios Gasteratos. Unsupervised semantic clustering and localization for mobile robotics tasks, *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, Vol. 131, 103567. ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103567>.
14. Lin S. et al. A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots, *Machines*, 2022, Vol. 10, No. 9, pp. 773.
15. Lamini, Said Benhlima, Ali Elbekri. Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 127, pp. 180-189. ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
16. Haitao Zhao, Lingchu Mao, Jibo Wei. Coverage on demand: A simple motion control algorithm for autonomous robotic sensor networks, *Computer Networks*, 2018, Vol. 135, pp. 190-200. ISSN 1389-1286. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.02.004>.
17. Guilherme Maeda, Okan Koç, Jun Morimoto. Phase portraits as movement primitives for fast humanoid robot control, *Neural Networks*, 2020, Vol. 129, pp. 109-122. ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2020.04.007>.
18. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Alexandrov A.V., Slavin O.A. Solving of tasks of cognitive control a robots group in multi-core microprocessors "elbrus", *CEUR Workshop Proceedings: Selected Papers of the 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017, Moscow, 24–26 ноября 2017 года*. Moscow, 2017, pp. 234-244.
19. Bocharov N.A., Gladkikh A.S., Paramonov N.B., Senchenkov S.V. Vozможности mikroprotssessorov El'brus-8S i El'brus-8SV dlya resheniya zadach robototekhniki [Capabilities of Elbrus-8C and Elbrus-8SV microprocessors for solving robotics problems], *Robotizatsiya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii: Sb. statey V voenno-nauchnoy konferentsii, Anapa, 29–30 iyulya 2020 g.* [Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of articles of the V Military Scientific Conference, Anapa, July 29-30, 2020]. Anapa: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie "Voenny innovatsionnyy tekhnopolis "ERA", 2020, pp. 71-83.
20. Bocharov N.A., Paramonov N.B., Slavin O.A., Suminov K.A. Matematicheskie i programmnye modeli zadach tekhnicheskogo zreniya robototekhnicheskikh kompleksov na osnove mikroprotssessorov "El'brus" [Mathematical and software models of technical vision problems of robotic complexes based on "Elbrus" microprocessors], *Tr. Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN* [Proceedings of the Institute of System Programming of the Russian Academy of Sciences], 2022, 34 (6), pp. 85-100. Available at: [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34\(6\)-6](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2022-34(6)-6).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Б. Парамонов.

Бочаров Никита Алексеевич – ПАО «ИНЭУМ им. И.С. Брука»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; г. Москва, Россия; тел.: +79167346437; к.т.н.; начальник отдела.

Bocharov Nikita Alexeevich – JSC «INEUM»; e-mail: bocharov.na@phystech.edu; Moscow, Russia; phone: +79167346437; cand. of eng. sc.; chief of department.