

ИЗОМОРФНЫЕ СИСТЕМНЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАСШТАБИРУЕМЫХ ВСТРАИВАЕМЫХ ЭВМ

В. П. ДАШЕВСКИЙ, В. Ю. БУДКОВ

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
199178, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com*

Рассматриваются особенности организации системных модулей в виде печатных плат мезонинного типа со свойством самоподобия. Системные модули составляют основу специализированных ЭВМ. Существующие отраслевые стандарты ориентированы на применение только одного системного модуля в конечной специализированной ЭВМ, что не позволяет наращивать производительность уже разработанного решения экстенсивным путем, без существенной переработки конструкции платы-носителя. В качестве альтернативы существующим решениям предлагается использование изоморфных системных модулей, конструкция которых позволяет стыковать их непосредственно друг с другом без кабелей, кросс-плат и прочих вспомогательных элементов. Объединяясь в стек, изоморфные системные модули образуют компактный вычислительный кластер. В таких модулях применяется новая технология динамического назначения выводов системного разъема при помощи ПЛИС. В отличие от традиционно применяемого статического назначения выводов, этот способ размещения внешних интерфейсов позволяет обойтись меньшим числом выводов системного разъема и при этом обеспечить совместимость модулей с различными прикладными системами за счет гибкого конфигурирования ПЛИС ввода-вывода. Совместимость системных модулей и плат-носителей в собранной конфигурации проверяется программно системными микроконтроллерами на основе данных, полученных из электронных паспортов, благодаря чему вычислительная система может быть автоматически проинспектирована на отсутствие конфликтов и правильно сконфигурирована до подачи питания на основные процессоры.

Ключевые слова: *системный модуль, мезонин, плата-носитель, ЭВМ, системная шина, системный микроконтроллер, коммутатор на ПЛИС, динамическое конфигурирование системного разъема*

Введение. Использование системных модулей (СМ) при разработке вычислительных систем позволяет разделить задачу проектирования на две более простые:

- 1) создание платы-носителя с необходимой компоновкой всех компонентов внутри корпуса;
- 2) создание СМ, содержащего процессор, память и основные интерфейсы.

Выделение главных вычислительных компонентов в отдельный СМ позволяет модернизировать изделие, а стандартизация и унификация СМ позволяет увеличить тираж и снизить

стоимость производства. Плата-носитель, как правило, технологически более проста, и ее можно быстро спроектировать под каждый конкретный проект.

Большое количество специализированных вычислительных компонентов проектируется на основе СМ: измерительные комплексы [1, 2], сенсорные сети [3, 4], модули ввода-вывода систем управления [5, 6], компьютерного зрения [7], бортовых вычислителей малых спутниковых систем [8, 9], беспилотных автомобилей [10], робототехнических систем [11, 12].

Существует целый ряд отраслевых стандартов [13—18], используя которые, разработчики могут сосредоточиться только на создании платы-носителя. За счет большого количества производителей модельный ряд стандартных СМ все время пополняется, что позволяет создать оптимальную по характеристикам систему [19].

Каждый из наиболее распространенных стандартов СМ имеет ограничения [20], для преодоления которых нужно снова повторять трудоемкий процесс проектирования аппаратного обеспечения.

Цель настоящей статьи — определить, можно ли организовать СМ так, чтобы их можно было устанавливать как на плату-носитель, так и непосредственно на модули такого же типа, и как это реализовать. Преимущества такого решения очевидны:

1) добавление типового СМ позволяет кратно наращивать пиковую производительность системы, не прибегая к дорогостоящему повторному проектированию;

2) для стыковки модулей не нужны кабели, следовательно, возрастает надежность соединений, пропускная способность коротких линий может быть повышена, а их число увеличено;

3) сборка модулей высокотехнологична, так как все точные работы по монтажу разъемов выполняются на сборочной линии;

4) при необходимости модернизации серийных изделий службам снабжения гораздо проще закупать больше СМ, уже состоящих на снабжении, чем прибегать к длительным дорогостоящим процедурам согласования закупки более производительных.

Общие особенности системных модулей. Исторически все стандарты СМ наследуют архитектуру персонального компьютера, и этим определяется основное назначение сигналов системного разъема. Проблема заключается в том, что значительное число сигналов используется для обеспечения функций, которые не нужно кратно повторять при наращивании производительности.

Доля полезных для масштабирования интерфейсов. Системный разъем каждого СМ содержит сигналы, которые можно разделить на несколько типов:

- 1) цепи электропитания;
- 2) сигналы пользовательского терминала;
- 3) сигналы сопряжения с внешними накопителями информации;
- 4) сигналы системных шин PCI, PCI Express, USB;
- 5) сигналы скоростных сетевых интерфейсов Ethernet;
- 6) сигналы медленных интерфейсов UART, I2C, SPI, LPC, ISA и др.

Для применения нескольких СМ в одном изделии с целью наращивания производительности необходимо определить, какая доля выводов системного разъема востребована при их объединении. Например, сигналы пользовательского терминала в большинстве случаев нужны только однократно. При объединении СМ целесообразно использовать только сигналы системных шин и сетевые интерфейсы. В таблице приведено число сигналов по группам применения для разных стандартов системных модулей [20]:

Распределение выводов системных разъемов разных стандартов

Группа выводов	ETX	COMe тип 6	PCIe/104 тип 1	PCIe/104 тип 2	SMARC 2.0	Qseven
Питание	63	101	50	51	60	42
Скоростные шины	81	148	94	66	82	52
Накопители	57	17	0	12	14	15
Медленные шины	133	25	3	11	47	35
GPIO	0	8	0	0	12	0
Дисплеи, камеры	28	75	0	0	73	49
Резервных	4	30	0	4	9	18
Всего контактов	400	440	156	156	314	230
Скоростных шин, %	20,3	33,6	60,2	42,3	26,1	22,6

Проанализировав таблицу, можно заметить, что большинство СМ имеют слишком большой удельный вес сигналов пользовательского терминала и плохо подходят для масштабирования производительности без дополнительных объединяющих компонентов.

Статическое или динамическое назначение выводов системного разъема. При разработке спецификации СМ необходимо искать компромисс между противоречивыми требованиями:

- 1) обеспечение совместимости модулей разных производителей;
- 2) охват как можно более широкого спектра решаемых задач;
- 3) снижение себестоимости модульной конструкции;
- 4) уменьшение технологической сложности платы-носителя.

Для рассмотренных выше стандартов характерно, что выводы системного разъема полностью закреплены за определенными интерфейсными сигналами. Этот подход будем называть статическим. При этом часть интерфейсных сигналов СМ остаются невостребованными, в то время как недостающие интерфейсы приходится реализовывать с помощью внешних компонентов на плате-носителе. Разработчики стандартов в качестве решения предлагают несколько вариантов схем размещения, как, например, различные типы в COM Express. Замена одного варианта другим возможна, если различающиеся подмножества выводов не используются в конечном приложении. Наличие вариантов усложняет выбор совместимых модулей и это неудобно на практике.

Достоинством статического назначения выводов является совместимость модулей разных производителей, что обеспечивает конкуренцию среди них и способствует снижению себестоимости продукции.

Альтернативный подход, когда выводы системного разъема подключаются к ПЛИС СМ, можно назвать динамическим. Кроме того, использование ПЛИС позволяет реализовать дополнительные периферийные устройства для конечного изделия прямо в СМ. Однако до сих пор динамическая конфигурация системного разъема массово не применяется из-за сложности обеспечения совместимости модулей и плат-носителей по сопрягаемым сигналам.

Авторами проводились эксперименты по созданию СМ, у которого примерно половина выводов системного разъема подключалась к ПЛИС, что позволило устанавливать его на несколько существенно разных плат-носителей. В одних устройствах это было множество портов RS-485, в других — совокупность дополнительных скоростных АЦП и ЦАП, в третьих — сигналы для управления мощными транзисторами в драйверах электродвигателей. Обобщение опыта этих экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

1) динамическое назначение выводов системного разъема позволяет гораздо более эффективно решать задачи построения конечной аппаратной системы, используя один и тот же СМ для разных задач;

2) для обеспечения динамического назначения выводов требуется организация системы электронных паспортов СМ и платы-носителя, чтобы загрузчик системы мог правильно сконфигурировать ПЛИС. Паспорта должны храниться в ПЗУ каждой из сопрягаемых плат,

чтобы загрузчик мог „на лету“ определить конфигурацию и выбрать правильный загрузочный образ ПЛИС и перечень периферийных устройств для операционной системы.

Для хранения паспортов хорошо подходят EEPROM с интерфейсом I2C, который может быть проведен через всю иерархию стыкуемых плат. Шина I2C допускает параллельное использование нескольких микросхем памяти, адреса которых соответствуют уровню платы в иерархии. Например, адрес EEPROM паспорта системного модуля — 50_h , платы-носителя — 51_h , платы-объединителя следующего уровня — 52_h и т.д. Загрузчик системы при старте последовательно обращается к ним и читает электронные паспорта плат. На основе прочитанных данных он вычисляет имя файла загрузочного образа ПЛИС. Если его нет в файловой системе, загрузчик может остановить загрузку, сформировав сообщение об отсутствии совместимости между СМ и платами его окружения.

Концепция изоморфного системного модуля. Назовем изоморфным системным (ИСМ) такой модуль, который может стыковаться с аналогичным без применения промежуточных плат и кабелей. При этом сигналы системного разъема соседних ИСМ соединяются между собой, образуя вычислительный кластер из нескольких процессоров.

Концепция кластера ИСМ не отменяет традиционной схемы, состоящей из одного СМ и платы-носителя. Но благодаря свойству самоподобия на плату-носитель можно установить несколько ИСМ без существенного изменения конструкции изделия. Для создания ИСМ необходимо обеспечить несколько новых конструктивных решений.

Системные разъемы с двух сторон печатной платы. Важной особенностью ИСМ является применение специальных разъемов поверхностного монтажа, которые могут монтироваться с разных сторон платы в точности друг под другом. Примером таких разъемов могут служить „гермафродиты“ серии LSHM фирмы Samtec [21], имеющие высокую плотность и дающие широкий выбор стыковочных высот.

Активное применение ПЛИС для формирования коммутационного поля ИСМ позволяет решить несколько важных задач:

1) динамическое назначение выводов системного разъема. Таким образом, можно избавиться системный разъем от интерфейсов, не востребованных конечным приложением, сократив количество выводов;

2) организация дополнительных сопроцессоров для обработки данных в ПЛИС. Например, в работе [7] за счет переноса алгоритма обработки видео из основного процессора в ПЛИС достигнуто ускорение в 721 раз и повышение энергоэффективности в 800 раз;

3) организация дополнительных возможностей для построения быстрой коммуникационной среды между модулями в ПЛИС. В этом случае часть сигналов системного разъема организуется как среда передачи информации между ИСМ, а в ПЛИС организуется коммутатор, подключающий основной процессор модуля к этой среде передачи.

Осложняет применение ПЛИС для формирования сигналов системного разъема (рис. 1) совместимость ее конфигурации с платами окружения. В общем случае конфигурация зависит от схемы подключения модуля и его соседей сверху и снизу. Для правильного конфигурирования ПЛИС каждый модуль должен иметь энергонезависимую память, в которой будет находиться его паспорт. Паспорт модуля — это структура данных, описывающая его тип, состав и основные характеристики, которые могут повлиять на процесс инициализации, например, объем памяти, тактовая частота и пр. Соседние ИСМ должны иметь возможность обмениваться паспортными данными, чтобы правильно выбрать загрузочный образ ПЛИС.

Загрузочные образы ПЛИС должны быть подготовлены заранее для всех допустимых сочетаний ИСМ и плат-носителей. Разработчик системы должен позаботиться об их размещении в хранилище, доступном начальному загрузчику.

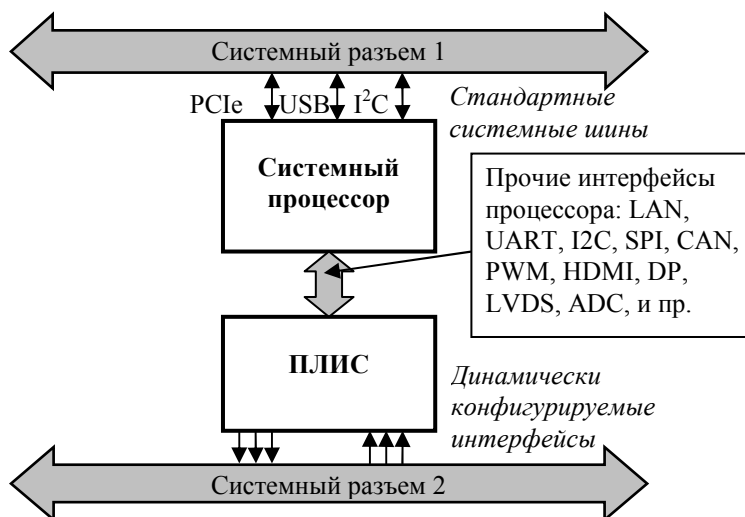


Рис. 1

Автоматическая нумерация модулей. Для работы сетевых подсистем обмена информацией каждый ИСМ должен получить свой уникальный сетевой адрес. Целесообразно автоматизировать процесс задания сетевых адресов, чтобы в дальнейшем правильно инициализировать таблицы маршрутизации.

Автоматическую нумерацию модулей и обмен паспортными данными можно реализовать при помощи системного микроконтроллера (СМК) с тремя интерфейсами I²C (рис. 2). Интерфейсы I²C-1 и I²C-2 используются для связи с соседними модулями, а I²C-3 ориентирован на работу с процессорами и ПЛИС, размещаемыми на модуле. Также в памяти этого микроконтроллера можно разместить паспорт всего модуля.

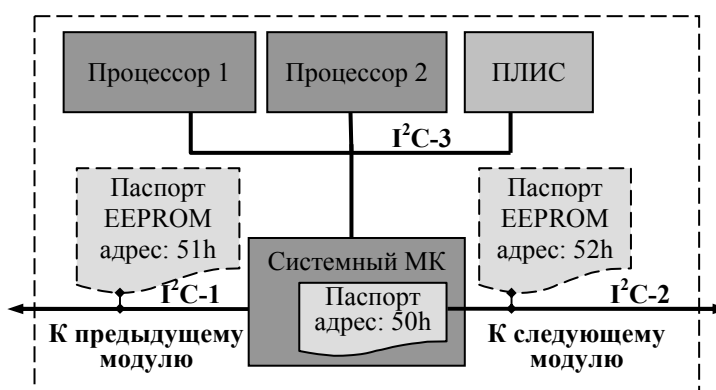


Рис. 2

Протокол взаимодействия по шине I²C между системными микроконтроллерами позволяет гибко наращивать сложность подготовительных действий перед запуском основных процессоров и ПЛИС.

Организация сетевой подсистемы. Многие приложения требуют наличия двух сетевых интерфейсов для резервирования каналов связи. Поскольку ИСМ имеет разъемы как сверху, так и снизу, необходимо определить, каким образом организовать решение для двух разных случаев. В случае традиционной схемы использования схемы из одного модуля и платы-носителя необходимо вывести оба сетевых интерфейса на плату-носитель (на рис. 3 показано простое включение двух портов Gigabit Ethernet), поскольку при их соединении задействуются только нижние разъемы. Такой случай можно считать простейшим. В качестве решения можно пропустить сигналы RGMII от процессора к РНУ через ПЛИС транзитом. Однако при такой реализации на верхних разъемах модуля не будет сетевых сигналов, и создание сети из стопки плат будет невозможным.

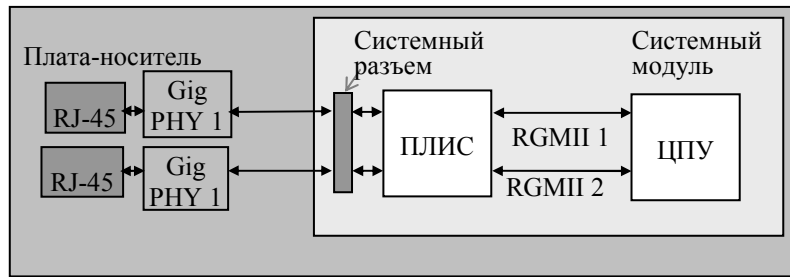


Рис. 3

В более сложном случае нескольких ИСМ необходимо реализовать в ПЛИС коммутатор на 4 порта (рис. 4, пунктир — соединение коммутаторов соседних ПЛИС через разъемы между двумя системными модулями). Один из портов (Link con) можно задействовать для ускорения передачи данных в удаленные модули одной стопки или модули разных стопок.

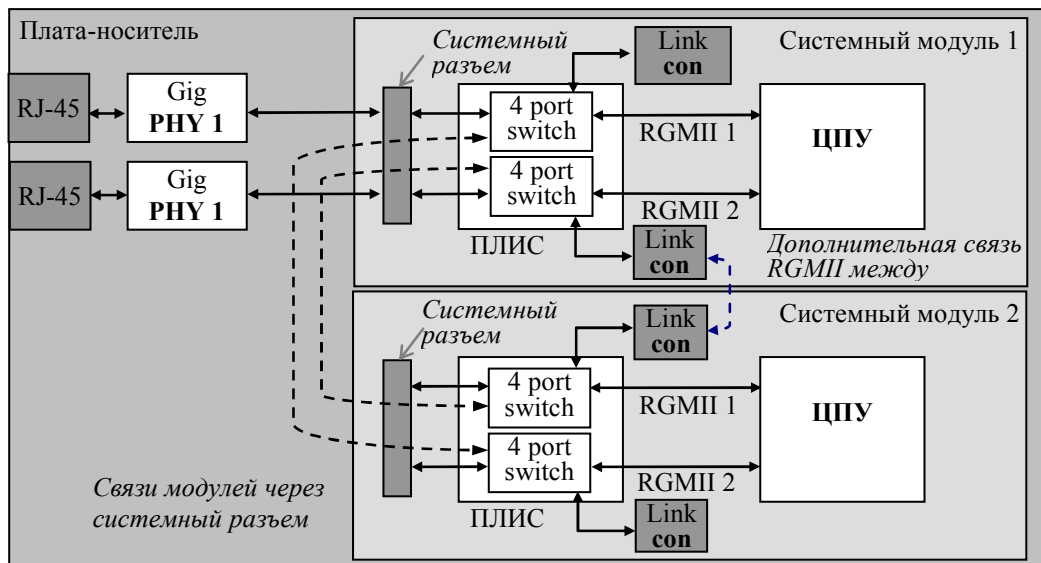


Рис. 4

Сборка модулей в кластер и отвод тепла. Рассмотрим конструктивное исполнение ИСМ и их организацию в виде стопки плат (рис. 5, стрелками показаны пути кондуктивного теплоотвода). Аналогично классическому подходу в основе — плата-носитель (11), которая выполняет несущие функции и содержит разъемы (12) для внешних подключений.

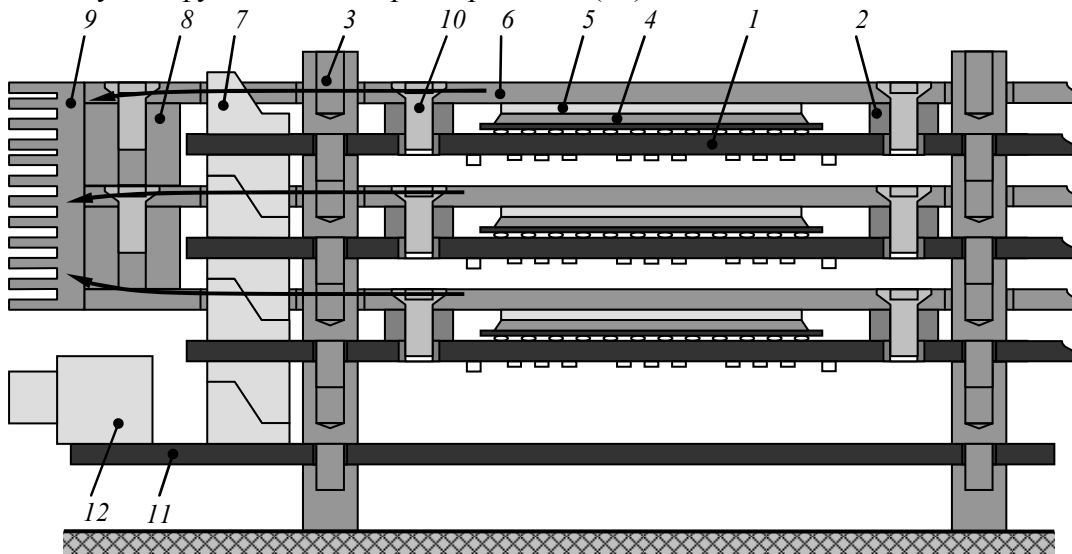


Рис. 5

Порядок сборки кластера следующий: компоненты СБИС (4) монтируются на верхней стороне платы ИСМ (1) и при помощи прослойки из терморезины (5) выравниваются по высоте. Помимо компонентов на плате модуля (1) припаиваются буксы (2) с резьбовыми сквозными отверстиями. Далее на буксы привинчивается (10) теплоотводящая пластина (6). При повышенном тепловыделении пластина может выходить за габариты модуля и при помощи дополнительных прокладок (8) расширяться вплоть до касания с соседними пластинами. К этим прокладкам могут крепиться детали корпуса прибора или радиаторы (9). ИСМ в сборе с радиаторами устанавливаются на стойки (3), которые завинчиваются в стойки предыдущего уровня или в основание корпуса. Далее собранные ИСМ устанавливаются на очередной ярус стоек, при этом происходит стыковка разъемов (7).

Заключение. Концепция изоморфных системных модулей имеет несколько новых ключевых особенностей:

1) изоморфный системный модуль может быть установлен на модуль аналогичного типа многократно;

2) для обеспечения динамического коммутационного поля на системном разъеме применяется ПЛИС;

3) обеспечение совместимости модулей и плат-носителей осуществляется программным путем за счет системного микроконтроллера;

4) из системного разъема убраны все плохо масштабируемые интерфейсы. При необходимости они могут быть реализованы в ПЛИС или на плате-носителе как периферийные устройства стандартных системных шин.

Таким образом, концепция изоморфных системных модулей открывает дорогу для повторного использования проверенного аппаратного обеспечения, что позволяет сократить затраты на модернизацию изделий и увеличить срок их жизни.

Исследование выполнено в рамках бюджетной темы № 0073-2019-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao H., Dong Z. Y. Application of Embedded Computer Module in Intelligent Measurement Instruments // Intern. Conf. on Information System and Artificial Intelligence (ISAI). IEEE, 2016. P. 488—491.
2. Min G., Xiucai Z. Study on modular design for Microwave High Power Automatic Test System // 10th Intern. Conf. on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2011. Vol. 2. P. 99—103.
3. Kabović A. V., Kabović M. M., Čelebić V. V. Software realization for the communication according to the IEC61850 standard on the nanoRISC MSC hardware platform // 22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). IEEE, 2014. P. 423—426.
4. Davis T. et al. On the design and implementation of wireless multimedia sensor networks // Intern. J. of Next-Generation Networks (IJNGN). 2010. Vol. 2.
5. Vásquez J. et al. EPICS IOC Based on Computer-On-Module for the LNL Laboratory. 2015.
6. Pedretti D. et al. Custom Hardware Platform Based on Intel Edison Module. 2015.
7. Klimeck D. et al. Resource-efficient Reconfigurable Computer-on-Module for Embedded Vision Applications // 29th Intern. Conf. on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP). IEEE, 2018. P. 1—4.
8. Wegerson M., Straub J., Marsh R. Design of an Onboard Distributed Multiprocessing System for a CubeSat Spacecraft Using GumStix Computer-on-Module Units // University of North Dakota Graduate School Scholarly Forum. 2015.
9. Samson J. R. Implementation of a dependable multiprocessor cubesat // Aerospace Conference. IEEE, 2011.
10. Giraudi L. Development of a SMARC module for an ADAS system based on the i. MX8 processor. Politecnico di Torino, 2018.

11. *Herbrechtsmeier S., Rückert U., Sitte J.* Amiro-autonomous mini robot for research and education // *Advances in Autonomous Mini Robots*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 101—112.
12. Дашевский В. П., Бизин М. М. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов // *Доклады ТУСУР*. 2015. №3(37).
13. Спецификация ETX, версия 3.02, январь 2007 [Электронный ресурс]: <http://www.congatec.com/fileadmin/user_upload/Documents/Technical_Documents/etxspecv3.02.pdf>.
14. COM Express Carrier Design Guide, версия 2.0, декабрь 2013 [Электронный ресурс]: <https://www.picmg.org/wp-content/uploads/PICMG_COMDG_2.0-RELEASED-2013-12-06.pdf>.
15. Спецификация SMARC, версия 2.0, июнь 2016 [Электронный ресурс]: <https://www.sget.org/fileadmin/user_upload/SMARC_Hardware_Specification_V200.pdf>.
16. Спецификация Qseven, версия 2.1, февраль 2016 [Электронный ресурс]: <https://www.sget.org/fileadmin/file_management/SDT02/Qseven-Spec_2.1.pdf>.
17. Спецификация PCI/104-Express и PCIe/104, версия 3.0, февраль 2015 [Электронный ресурс]: <https://pc104.org/wp-content/uploads/2015/03/PCI104_Express_v3_0.pdf>.
18. Спецификация StackPC, версия 1.2, июль 2014 [Электронный ресурс]: <http://www.stackpc.org/content/files/specs/Specification_StackPC_rev_1_2.pdf>.
19. *Nusev G. et al.* A DSS Model for Selection of Computer on Module Based on PROMETHEE and DEX Methods // *Intern. Conf. on Decision Support System Technology*. Springer, Cham, 2018. P. 157—168.
20. Дашевский В. П. Сравнительный анализ современных стандартов одноплатных ЭВМ // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2019. № 1. С. 3—14.
21. Разъемы LSHM [Электронный ресурс]: <http://suddendocs.samtec.com/catalog_english/lshn.pdf>.

Сведения об авторах

Владимир Павлович Дашевский

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, отдел прототипирования робототехнических и встраиваемых систем; старший научный сотрудник; E-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com

Виктор Юрьевич Будков

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, лаборатория технологий больших данных социокиберфизических систем; старший научный сотрудник; E-mail: visharmail@gmail.com

Поступила в редакцию
10.06.2020 г.

Ссылка для цитирования: Дашевский В. П., Будков В. Ю. Изоморфные системные модули для построения масштабируемых встраиваемых ЭВМ // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 10. С. 871—879.

ISOMORPHIC SYSTEM MODULES FOR CONSTRUCTION OF SCALABLE EMBEDDED COMPUTERS

V. P. Dashevsky, V. Yu. Budkov

*St. Petersburg Scientific Center of the RAS,
199178, St. Petersburg, Russia
E-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com*

System modules are considered as the main parts of specialized computing systems. An approach to development of scalable embedded computers based on self-similar system modules stacked on top of each other without extra cables, is presented. The existing system module specifications are optimized for using a single module per one embedded computer that makes it difficult to increase system performance by using multiple modules without significant reconstruction of the carrier board. The proposed alternative approach uses isomorphic (self-similar) modules that can be mated using planar board-to-board hermaphrodite connectors. If assembled in a stack, these modules form a compact computing cluster. New approach also introduces a dynamic system connector pin allocation based on routing system signals through a FPGA. The dynamic allocation improves the efficiency of system connector pins utilization, and allows to get a wider range of hardware interfaces implemented using fewer pins of system connector

while maintaining the modules compatibility with various application systems. This is achieved by flexible software controllable FPGA configuration depending on the module neighbors. Special system microcontrollers inspect overall system compatibility by using data stored in electronic passport of each module, so that the computing system can be automatically inspected for conflicts and correctly configured before powering up the main processors.

Keywords: system module, mezzanine, carrier board, embedded computer, system bus, system microcontroller, FPGA-based switch, dynamic configuration of system connector

REFERENCES

1. Zhao H., Dong Z.Y. *International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI)*, IEEE, 2016, pp. 488–491.
2. Min G., Xiucai Z. *10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, IEEE, 2011, vol. 2, pp. 99–103.
3. Kabović A.V., Kabović M.M., Čelebić V.V. *22nd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*, IEEE, 2014, pp. 423–426.
4. Davis T. et al. *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*, 2010, Vol. 2.
5. Vásquez J. et al. *EPICS IOC Based on Computer-On-Module for the LNL Laboratory*, 2015.
6. Pedretti D. et al. *Custom Hardware Platform Based on Intel Edison Module*, 2015.
7. Klimeck D. et al. *29th International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*, IEEE, 2018, pp. 1–4.
8. Wegerson M., Straub J., Marsh R. *University of North Dakota Graduate School Scholarly Forum*, 2015.
9. Samson J.R. *Aerospace Conference*, IEEE, 2011.
10. Giraudi L. *Development of a SMARC module for an ADAS system based on the i. MX8 processor*, Politecnico di Torino, 2018.
11. Herbrechtsmeier S., Rückert U., Sitte J. *Advances in Autonomous Mini Robots*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 101–112.
12. Dashevsky V.P., Bizin M.M. *Proceedings of the TUSUR University*, 2015, no. 3(37).
13. http://www.congatec.com/fileadmin/user_upload/Documents/Technical_Documents/etxspecv3.02.pdf. (in Russ.)
14. COM Express Carrier Design Guide, https://www.picmg.org/wp-content/uploads/PICMG_COMDG_2.0-RELEASED-2013-12-06.pdf.
15. https://www.sget.org/fileadmin/user_upload/SMARC_Hardware_Specification_V200.pdf. (in Russ.)
16. https://www.sget.org/fileadmin/file_management/SDT02/Qseven-Spec_2.1.pdf. (in Russ.)
17. https://pc104.org/wp-content/uploads/2015/03/PCI104_Express_v3_0.pdf. (in Russ.)
18. http://www.stackpc.org/content/files/specs/Specification_StackPC_rev_1_2.pdf. (in Russ.)
19. Nusev G. et al. *International Conference on Decision Support System Technology*, Springer, Cham, 2018, pp. 157–168.
20. Dashevsky V.P. *Industrial Automatic Control Systems and Controllers*, 2019, no. 1, pp. 3–14. (in Russ.)
21. http://suddendocs.samtec.com/catalog_english/lshn.pdf. (in Russ.)

Data on authors

- Vladimir P. Dashevsky** — PhD; St. Petersburg Scientific Center of the RAS, Department of Robotic and Embedded Systems Prototyping; Senior Scientist; E-mail: vladimir.dashevsky@gmail.com
- Viktor Yu. Budkov** — PhD; St. Petersburg Scientific Center of the RAS, Laboratory of Big Data Technologies in Socio-Cyberphysical Systems; Senior Scientist; E-mail: visharmail@gmail.com

For citation: Dashevsky V. P., Budkov V. Yu. Isomorphic system modules for construction of scalable embedded computers. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 10. P. 871–879 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-10-871-879