

## **To the question for formation of a block-modular structure of the control system for unmanned aerial vehicles**

**I.V. Kovalev<sup>1,2</sup>, V.V. Losev<sup>2,\*</sup>, M.V. Saramud<sup>1,2</sup>, A.O. Kalinin<sup>2</sup>, A.S. Lifar<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Reshetnev university, Krasnoyarsk, Russia

\* E-mail: basilos@mail.ru

**Abstract:** The article discusses an approach to the formation of the basic structure of the control system for unmanned aerial vehicles, based on existing system solutions, typical specifications of the developer's boards. The characteristics of an unmanned aerial vehicle of both air and space class are given. General requirements for hardware and peripheral devices of unmanned aerial vehicles have been formed in accordance with their basic operating modes. Based on the obtained and generalized information about the developer's boards, the block-modular structure of the control system for unmanned aerial vehicles is presented. It includes all the main elements of the system and can be expanded by connecting additional boards. The advantage of this structure for debugging purposes is the presence of an FPGA on the development board.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, control system, peripherals

## К вопросу формирования блочно-модульной структуры системы управления беспилотных летательных объектов

И.В. Ковалев<sup>1,2</sup>, В.В. Лосев<sup>2,\*</sup>, М.В. Сарамуд<sup>1,2</sup>, А.О. Калинин<sup>2</sup>,  
А.С. Лифарь<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> СибГУ им. М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

\*E-mail: basilos@mail.ru

**Аннотация:** В статье рассматривается подход к формированию базовой структуры системы управления беспилотными летательными объектами, основанный на существующих системных решениях, типовых спецификациях плат разработчика. Дана характеристика беспилотному летательному объекту как воздушного, так и космического класса. Сформированы общие требования к аппаратному обеспечению и периферийным устройствам беспилотных летательных объектов согласно их базовым режимам работы. На основании полученной и обобщенной информации о платах разработчика представлена блочно-модульная структура системы управления беспилотных летательных объектов. Она включает в себя все основные элементы системы и может расширяться за счет подключения дополнительных плат. Преимуществом данной структуры для целей отладки может служить наличие ПЛИС на плате разработчика.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный объект, система управления, периферийные устройства

### 1. Введение

Беспилотный летательный объект (далее - БЛО) – это объект, способный перемещаться или корректировать свое позиционирование в пространстве на основании некоторого набора входных данных (изображение с камер, сканирующих лидаров, показания датчиков, заранее заданный маршрут с привязкой к местности) и способный либо выполнять манипуляции с окружающими объектами, либо собирать/отправлять данные [1]. У подобных объектов опционально имеется возможность перехвата управления вручную, по каналу связи, однако это не всегда удобно, либо вовсе не реализуемо (например, работа в среде, в которой невозможно прохождение радиосигналов и обеспечение иных способов реализации канала связи). Определяющая характеристика - способность полностью автономной работы, без участия оператора или поступления иных команд извне.

Условно БЛО можно разделить на следующие классы:

- *Воздушные.* К этому классу относятся как классические крылатые беспилотники и ракетная техника, так и набирающие популярность мультироторные системы. Отсутствие пилота позволяет кардинально снизить вес и уменьшить габариты летательного аппарата, соответственно снижаются и затраты на производство и сами полеты, в большинстве случаев отпадает необходимость в топливных двигателях, достаточно электромоторов, работающих от аккумуляторов. Небольшие габариты и отсутствие топливных двигателей - источников большого количества тепла существенно усложняют обнаружение подобных летательных средств. Основным недостатком беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) считается уязвимость радиоканала связи для удаленного управления, автономный режим решает эту проблему, поскольку даже полная потеря канала не выводит аппарат из строя, он продолжает выполнять задачу. Отсутствие радиоканала также является существенным преимуществом в плане сложности обнаружения объекта. На данный момент воздушные БЛО находят все большее применение в коммерческом использовании, в сельском и лесном хозяйстве, в геодезии и картографии, практикуется доставка потребительских товаров с помощью автономных беспилотных мультироторных систем,
- *Космические.* К данному классу относятся как решения для постоянного нахождения в открытом космосе (спутники на околоземной орбите), так и аппараты, запускаемые на другие космические тела, предназначенные для передвижения по ним и активных действий – сбор и анализ образцов поверхности, атмосферы, фото, видеосъемка с дальнейшей отправкой результатов на землю. Реализация радиоканала связи для управления подобными объектами крайне затруднительна, поскольку на космических расстояниях начинает иметь значение скорость радиосигнала, внося существенные задержки как в сторону передачи управляющих команд, так и в сторону отправки видео или иного сигнала с управляемого объекта. Например, вы пытаетесь управлять объектом в трех световых минутах от земли, который постоянно транслирует картинку с камеры. В данный момент вы видите картинку не в реальном времени, а с задержкой не менее трех минут; отправляете управляющие команды, которые также дойдут до объекта только спустя 3 минуты, он их выполнит, а видеосигнал процесса выполнения дойдет до вас только спустя 6 минут после ваших команд на земле. Этот фактор существенно усложняет удаленное управление, даже при наличии стабильного канала связи, к тому-же расходует лишнюю энергию на аппарате для поддержания постоянной двусторонней связи на таком расстоянии.

Поэтому космические аппараты разрабатываются автономными с возможностью ручного управления во внеплановых ситуациях [2]. На сегодняшний день дальние космические полеты осуществимы только беспилотными аппаратами, поскольку отправить человека на расстояние нескольких световых лет и вернуть его назад практически неосуществимо на данном этапе развития технологий. Наличие человека для подобных миссий не требуется, а его отсутствие позволяет сделать космический аппарат существенно легче, компактнее и проще, что очень важно для космических запусков. Благодаря миниатюризации электронных компонентов стали возможны такие проекты, как кубсат (англ. CubeSat) и покетсат (англ. PocketSat), что дает шанс на реальный запуск в космос студенческих малых спутников.

Таким образом, в основу формирования необходимого функционала плат разработчика положим БЛО воздушного и космического класса, как наиболее требовательные к надежности и габаритам.

## **2. Общие требования к аппаратному обеспечению беспилотных летательных объектов**

В процессе изучения функциональных узлов БЛО наиболее эффективным подходом является использования отладочных плат и плат разработчика. Плата разработчика - средство для прототипирования и апробации автоматических систем управления и робототехники, ориентированное на широкий круг пользователей. Аппаратная часть представляет собой одноплатную структуру с минимально необходимым набором “обвязки” для нормальной работы микроконтроллера (программатор, стабилизатор питания, кварцевый резонатор, цепочки сброса и т. п.). Также имеется возможность подключения плат расширения для дополнения ее функционала. С точки зрения разработчика, программная часть состоит из программной оболочки (IDE) для написания программ, их компиляции и программирования аппаратуры. Плата разработчика может использоваться как для создания автономных объектов, так и подключаться к другим системам через стандартные проводные и беспроводные интерфейсы.

Среди существующих плат разработчика, были проанализированы платы, отвечающие таким требованиям, как: малое энергопотребление, открытая спецификация, подробная документация, поддержка распространенных языков программирования, официальная продажа на территории Российской Федерации, наличие возможности подключения внешних модулей расширения, поддержка операционной системы реального времени.

### 3. Анализ типовых узлов платы разработчика

Проведенная спецификация и структурный анализ плат разработчика (Приложение 1, Таблица 1), позволяет выделить основные узлы систем (плат), которые формируют базовую (типовую) аппаратную платформу БЛО (класс воздушные) и являются ее неотъемлемой частью с возможностью последующей отладки [3, 4]. Узлы имеют обобщенную спецификацию по назначению, представленную на рисунке 1 [5].



**Рисунок 1.** Основные узлы БЛО (класс воздушные) по назначению.

#### 3.1. Микропроцессор

Основным узлом типового решения является сам микропроцессор, включающий в себя основную схемотехническую часть. В качестве примера типового решения можно привести такие процессоры как ARM Cortex-A53, ATmega16U2, ARM Cortex™ A8, Atom T5700, Altera Nios II Gen2, MKE15Z256VLH7.

#### 3.2. Память

Вторым по важности компонентом является блок внешней памяти, позволяющий обрабатывать и хранить большое количество информации. Микроконтроллеры (МК) для своего функционирования требуют наличия нескольких видов памяти. FMC (Flexible Memory Controller), что обеспечивает параллельный доступ к памяти (NOR, PSRAM) за счет увеличения количество использованных для интерфейса пинов.

Для операций, не требующих высокой скорости доступа к памяти, можно использовать последовательные интерфейсы:

- Шина I2C, как правило, 100 или 400 кбит/с внешним 8-контактный EEPROM (энергонезависимая память);

- SPI-шина, обычно 10 Мбит с использованием 4 проводов для подключения к EEPROM или Flash (NOR или NAND);
- SDIO шина и QSPI 1, 2 или 4 (или более) линии передачи данных, чтобы увеличить пропускную способность данных с внешней Flash.

SDIO, I2C, SPI – все обрабатывается встроенным программным обеспечением в режиме чтения и записи.

### 3.3. Порты ввода/вывода

Для прототипа БЛО третьим по важности элементом является наличие портов ввода/вывода для аналоговых и цифровых сигналов, наличие аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) для них, наличие широтно-импульсной модуляция (ШИМ) и т.д.

### 3.4. Часы реального времени

Для бесперебойного функционирования также необходимо наличие часов реального времени. Данный модуль необходим для протоколирования данных со штампом времени и восстановления после сбоя в аварийном режиме. К каждой записи показаний на SD-карту или на удалённый сервер возможно добавление штампа времени. GPS-приёмники могут ускорять процесс включения, сравнивая время в собственных часах реального времени со временем последнего получения сигнала от спутника (если предыдущее включение было несколько часов назад, то ранее найденные спутники всё ещё могут быть использованы и определение координат начнется быстрее). Как правило, данные модули обеспечиваются автономным питанием.

### 3.5. Таймеры

Существует несколько видов таймеров, применяемых в микроконтроллерах. К примеру, 8-ми разрядный таймер общего назначения содержит предделитель, который ведет обратный отсчет от системных часов. Выходной сигнал предделителя поступает в счетчик, который отсчитывает от него сохраненное в нем значение. Когда счетчик опустошается, устанавливается флаг, и может выполняться прерывание. Существуют системы захвата входных данных и системы сравнения выходных данных, содержащие до 16 таймеров [6]. В моделях высокого класса существует блок процессора таймера, у которого время является основным операндом. Одним из значимых видов таймеров является сторожевой таймер (WDT), который вызывает сброс микроконтроллера. Это позволяет восстановить нормальную работу микроконтроллера вследствие

кратковременных сбоев, вызванных перегрузкой, влиянием электромагнитного импульса или некорректной работой управляющей программы.

### **3.6. Последовательный ввод / вывод**

На сегодняшний день относительно низкоскоростные асинхронные последовательные интерфейсы (SCI) используются для терминальных, модемных и сетевых интерфейсов. Высокоскоростные синхронные последовательные каналы (SPI) используются, в том числе для межкомпьютерных соединений, аппаратной периферийной связи и других типов устройств, где требуется высокоскоростная и безопасная связь.

Обычно системы SCI могут обмениваться данными на любой из популярных асинхронных последовательных скоростей передачи данных. Эти системы имеют встроенные генераторы скорости передачи данных, регистры ввода и вывода с двойной буферизацией, а также все средства обнаружения ошибок, собранные на универсальной микросхеме асинхронного приемопередатчика (UART). Эти устройства ввода-вывода могут опрашиваться или управляться прерываниями компьютерной частью микроконтроллера.

SPI предназначен для связи на высоких скоростях с другими микроконтроллерами или, возможно, с аппаратными устройствами с синхронным последовательным интерфейсом. Поскольку для синхронных систем требуются системные часы, каждый SPI микроконтроллера может действовать как ведущий или ведомый. Связь с микроконтроллером и SPI может быть опрашиваемой (синхронной) или через контроллер прерываний (асинхронной) [6].

## **3. Периферийные устройства БЛО**

### **3.1. Инерциальные датчики на основе МЭМС**

Сегодня датчики, основанные на технологии МЭМС (микроэлектромеханические системы), многочисленны по типам, что приводит к постоянному росту их применения. Эта технология используется при реализации критически важных инерциальных датчиков. Концепция вибрационного гироскопа Кориолиса является основой этой технологии при реализации гироскопов, также акселерометры всех типов подпадают под эту технологию. Текущий рывок в недорогой интегрированной инерциальной навигации в аэрокосмической отрасли, в первую очередь, связан с наличием миниатюрных приемников GPS и инерциальных систем на основе МЭМС [7, 8].

### **3.2. Электродвигатели**

В мультироторных БПЛА силовая установка основана на системе прямого привода. Каждая стойка напрямую подключается к собственному источнику подъемной силы, в основном это бесщеточные электродвигатели. Большинство современных бесщеточных электродвигателей идентифицируются по ширине и высоте корпуса двигателя. Еще одна характеристика бесщеточных электродвигателей - номинальное напряжение в киловольтах. Это позволяет определить число оборотов двигателя на каждый вольт подаваемого в него электричества. Данное измерение выполняется при нулевой нагрузке на двигатель, поэтому в действительности, частота вращения будет варьироваться в зависимости от трения и нагрузки. Аккумулятор с более высоким напряжением заставит двигатель вращаться быстрее, но номинальное напряжение в киловольтах останется прежним.

### **3.3. Канал телеметрии**

Для обеспечения двусторонней связи с БЛО необходима организация канала телеметрии с управляемым объектом путем формирования специальной двусторонней радиосвязи. Канал телеметрии берет серию измерений с управляемого объекта и отправляет их обратно на землю, где они могут быть отображены в программном обеспечении наземного управления. В качестве параметров канала телеметрии могут выступать: путевые точки, автономные полеты, конфигурации БЛО, а также широта, долгота, высота, положение БЛО, текущее напряжение батареи, курс БЛО, скорость, продолжительность полета и многое другое [9].

На сегодняшний день аэрофото-, видеосъемка является первоочередной востребованной задачей применения БПЛА. К примеру, наиболее часто используемые датчики на сельскохозяйственных БПЛА - это красный, зеленый и синий в полосе пропускания изображения в ближнем и инфракрасном диапазонах.

Конструктивно, датчики должны быть простыми в установке и отсоединении. Они должны быть достаточно миниатюрными, чтобы вместить полезную нагрузку и занять место на небольшом дроне. Современные тенденции заключаются в использовании небольших и быстрых дронов для получения аэрофотоснимков и сбора цифровых данных. Низколетящие и парящие БПЛА предпочтительнее, если требуются снимки крупным планом с более подробной детализацией объектов или местности [10].

### **3.4. Позиционирование и навигация**

Отличительной особенностью между дроном и модельным самолетом является способность первого работать с использованием GPS. Добавление этой технологии спутниковой навигации обеспечивает уровень контроля, который раньше был просто



невозможен. Этот дополнительный контроль позволил конструкторам дронов разрабатывать режимы полета для конкретных типов полетов.

Режим «Лойтер» (Loiter) – позволяет удерживать дрон в определенном месте (широта, долгота и высота). При этом находясь в удержании положения дрон сам исправит свое месторасположение, если оно будет изменено какими-то внешними возмущениями.

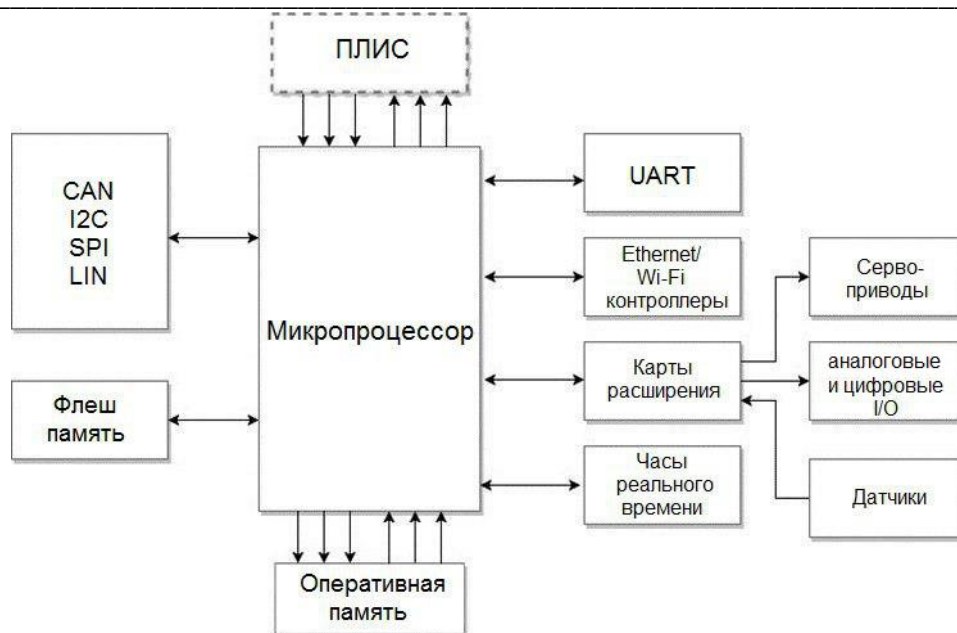
Режим «Возврат домой» (RTH). Этот режим позволяет летательному аппарату определять домашнее местоположение, обычно исходное место взлета, и возвращаться туда при определенных условиях безотказной работы. Потеря радиосвязи с БПЛА – один из распространенных факторов, вызывающих возврат домой.

Режим «Навигация по путевым точкам». Это режим автономной навигации по запрограммированным путевым точкам. Программное обеспечение наземного управления загружает список инструкций по навигации в полетный контроллер, который выполняет их шаг за шагом, как полную миссию. Этот метод особенно полезен в индустрии картографирования, где необходимо снова и снова летать по определенным схемам полета.

Режим «Следуй за мной». Этот режим позволяет пользователю отправлять на дрон поток данных о местоположении пользователя в реальном времени с помощью мобильного приложения. Затем дрон использует данные о местоположении с вашего мобильного телефона, чтобы следовать за вами с заданной высотой и расстоянием [9].

#### **4. Блочно-модульная структуры системы управления БЛО**

На основании полученной и обобщенной информации о платах разработчика была составлена блочно-модульная структура, представленная на рисунке 2. Она включает в себя все основные элементы системы и может расширяться за счет подключения дополнительных плат. Дополнительным преимуществом для целей отладки может служить наличие ПЛИС на плате разработчика, но этот узел не является критически необходимым [11].



**Рисунок 2.** Блочная-модульная структура аппаратной платформы БЛЮ (класс воздушные).

## 5. Заключение

Большое число микропроцессоров, обладая разной архитектурой и периферией, подходят по всем сформированным требованиям и могут проявлять свою эффективность в различных ситуациях использования БЛЮ, что приводит к необходимости на этапе формирования требований к интегрированной среде разработки (IDE) включить в нее поддержку кроссплатформенности [12], т.е. поддержку большого числа микроконтроллеров, драйверов электродвигателей, датчиков и других элементов аппаратной части БЛЮ.

## Список литературы

- [1] Ковалев, И.В. К вопросу реализации мультиверсионной среды исполнения бортового программного обеспечения автономных беспилотных объектов средствами операционной системы реального времени / И.В. Ковалев, В.В. Лосев, М.В. Сарамуд, Д.И. Ковалев, М.О. Петросян // Вестник СибГАУ. – 2017. – № 1(18). – С. 58-61.
- [2] Карцан, И. Построение наземных пунктов управления космическими аппаратами с использованием оптимизационно-имитационной модели. Современные инновации, системы и технологии / И. Карцан // Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2021. – № 1(2). – С. 64-71. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-64-71>.

- [3] Аленченков, Г. С. Структурный синтез механизмов стартовых устройств беспилотных летательных аппаратов малой массы // Г.С. Аленченков, А.Э. Пушкарев. Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1. – С. 5-11.
- [4] Догерти, Мартин Дж. Дроны. Первый иллюстрированный путеводитель по БПЛА / Мартин Дж. Догерти. – М.: Издательство ЭКСМО, 2017. – 224 с.
- [5] Функции электроники в составе мультикоптеров. Материал получен с сайта АО «КОМПЭЛ» – compel.ru (Дата обращения: 19.09.2021).
- [6] Sickle, Ted Van. Programming Microcontrollers in C. Second edition / Ted Van Sickle // – Newnes Publishing House, 2001. – P. 472.
- [7] Bose, A., Fundamentals of navigation and initial sensors / A. Bose, K.H. Bhat, T. Kurian // PHI Learning. – 2014. – P. 322.
- [8] Bose, A., S. Puri, Banerjee. Modern Inertial Sensors and Systems / A. Bose, S. Puri, Banerjee // PHI Learning. – 2008. – P. 416.
- [9] Kilby, T. Make: Getting Started with Drones / T. Kilby, B. Kilby // Maker Media. – 2015. – P. 187.
- [10] Krishna, K.R. Agricultural Drones. A Peaceful Pursuit / K.R. Krishna // Apple Academic Press. – 2018. – P. 381.
- [11] Моисеев, В.С. Беспилотные авиационные комплексы. I. Структура и организация функционирования // В.С. Моисеев и др. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2006. – №. 2. – С. 3-7.
- [12] Ковалев, И., Сарамуд М., Лосев, В., Колташев, А. Метод и инструментарий верификации кроссплатформенного бортового программного обеспечения / И. Ковалев, М. Сарамуд, В. Лосев, А. Колташев // Современные инновации, системы и технологии - Modern Innovations, Systems and Technologies. – 2021. – № 1(2). – 22-33. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2021-1-2-22-33>.

## Приложение

**Таблица 1.** Сравнительная таблица основных характеристик плат разработчика.

Фирма	Название	Порты ввода/вывода	ЦАП/АЦП	Интерфейсы	Встроенные модули	Встроенные датчики	Память	Архитектура ядра	IDE
Microsemi (formally)	Smart Fusion2 Starter Kit	14 - analog 18 - digital	Configurable 8- to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	JTAG, Ethernet 10/100, USB OTG, SPI, I2C, UART	Ethernet 10/100, USB UART, USB OTG, JTAG	-	64MB LPDDR, 16MB SPI flash	32	-

			Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	JTAG, Ethernet 10/100, USB OTG, SPI, I2C, CAN, RS-232, RS-485, PCIe, FMC	JTAG Ethernet 10/100 USB OTG SPI I2C CAN RS-232 RS-485 PCIe		512 Мб DDR3; 256 Мб для контроля ошибок (ECC); 6 Мб SDRAM; 4 Гб флэш-памяти NAND; 8 Мб флэш-памяти с интерфейсом SPI.	ARM Cortex-M3	
			Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	JTAG, Ethernet 10/100, USB OTG, SPI, I2C, RS-232, RS-485, PCIe, 2 x FMC	JTAG Ethernet 10/100 USB OTG SPI I2C CAN RS-232 RS-485 PCIe		1 Гб DDR3; 256 Мб для коррекции и ошибок; 2 Гб флэш-памяти SPI 256 мегабайт (Мб) двуканальной DDR2 SDRAM с кодом исправления ошибок (ECC) 8 Мб синхронной SRAM 64 Мб флэш-памяти		
		General purpose I/O (GPIO) 214 ввода-вывода	Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	HSMC JTAG USB-Blaster GUI 10/100/1000 Ethernet USB 2.0	HSMC JTAG USB-Blaster GUI 10/100/1000 Ethernet USB 2.0			ARM Cortex-M3	
Altera				QSFP Interface HSMC JTAG USB-Blaster GUI 10/100/1000 Ethernet USB 2.0 PCIe SDI SMA CAN UART			1 Гб DDR3 SDRAM (32 бит) с кодом коррекции и ошибок (ECC) 128 Мб QSPI flash Разъем Micro-SDCard с флэш-устройством micro-SDCard емкостью 4 Гб	ARM Cortex-A9	
		линии ввода/вывода	20-бит дельта-сигма-аналого-цифровой преобразователь (линейная технология LTC2422)		USB-Blaster II				
ST		линии ввода/вывода	Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	I2C SPI USB JTAG/BDM Flash	RF-модуль Bluetooth® V4.1 Wi-Fi NFC		2 цифровых всенаправленных микрофона а цифровой датчик относительной влажности и температуры 3-осевой магнитометр 3D-акселерометр 3D-гироскоп абсолютн	ARM Cortex-M4	

	STMicroelectronics P-NUCLEO-LRWAN1	14 - analog 18 - digital	Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	I2C SPI USB JTAG/BDM UART	ISM трансивер LoRa трансивер	температурный датчик	-	Cortex-M0+	-	ый цифровой выходной барометр Датчик времени обнаружения и обнаружения жестов
	STM3210 C-EVAL	14 - analog 18 - digital	аудио ЦАП I2S	USB-OTG, Ethernet, CAN2.0A/B, I2S, USART, SPI RS-232 IrDA JTAG	3.2 "240x320 TFT цветной ЖК-дисплей с сенсорным экраном Джойстик с четырехпозиционным управлением и селектором Кнопки сброса, пробуждения, вмешательства и пользователя IrDA-приемопередатчик	-	64KB SRAM and 256KB Flash 2 ГБ MicroSD Card™ или больше	Cortex-M3	-	
Amel	Atmel ATEVK1105AU	14 - analog 18 - digital	Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	I2C SPI TWI USB Ethernet JTAG/BDM	аудиоинтерфейс сенсорный интерфейс	-	-	AVR32 UC	-	
	Arty Artix-7 FPGA	4 Pmod connectors, Arduino/chip KIT шилд разъем;	АЦП на кристалле (XADC),	10/ 100 Mbps Ethernet, USB-UART SPI I2C JTAG PCIe	10/ 100 Mbps Ethernet, USB-UART SPI I2C JTAG PCIe	-	256 MB DDR3L с 16-bit шиной @ 667 MHz, 16 MB Quad-SPI Flash		Vivado Design Suite	
Cortus	Spartan-3E Starter Board	100-контактный разъем Hirose FX2 Три 6-контактных порта Pmod DB15HD VGA	видео ЦАП	JTAG, Ethernet 10/100, USB, SPI, I2C, RS-232, RS-485, PCIe, VGA, PS/2, SMA	SMSC LAN83C185 Ethernet PHY Клавиатура PS / 2 RJ-45 Ethernet 16-контактный разъем для дополнительных ЖК-модулей Разъем SMA для высокоскоростного входного тактового сигнала Два разъема DB9 RS-232	-	64 MB Micron® DDR SDRAM 16MB Numonyx StrataFlash™ 2MB ST Microelectronics	Xilinx Spartan-3E		
Cypress	CY8CKIT-001 PSoC® Development Kit	I/O (GPIO) expansion slots	12-bit Delta-Sigma ADC, 8-bit DAC	USB 2.0, LCD, JTAG, I2C, SMBus, PMBus, P15-DB9 Serial Communication Port, J9-Full-Speed USB Port, RS-232	P15-DB9 Serial Communication Port, J9-Full-Speed USB Port, RS-232	CapSense	RAM 64Kb, Flash 256KB + 32KB Flash for ECC, EEPROM 2KB	M8C / 8051 / Cortex-M3	PSoC Creator IDE	
	CY8CKIT-050 PSoC® 5LP Development Kit	I/O (GPIO) expansion slots	Configurable 8-to 20-bit delta-sigma ADC, Up to two 12-bit SAR ADCs, 4 x 8-bit DACs	RS-232 I2C SPI USB LCD JTAG/BDM	P15-DB9 Serial Communication Port, J9-Full-Speed USB Port, RS-232	CapSense	RAM 64Kb, Flash 256KB + 32KB Flash for ECC, EEPROM 2KB	ARM Cortex-M3	PSoC Creator IDE	

Freescale	FRDM-KW41Z: NXP	14 - analog 18 - digital	16-bit analog-to-digital converter (ADC) 12-bit digital-to-analog converter (DAC) 6-bit high-speed analog comparator (CMP)	I2C SPI LPUART TSI CMT GPIO w/ IRQ Capabilities BLE 4.2 and 802.15.4 radio	USB OpenSDA OpenSDA SWD F-Antenna	Accelerometer and magnetometer Thermistor	512 KB flash memory 128 KB SRAM	48 MHz ARM® Cortex®-M0+ core	MCU Xpresso Integrated Development Environment (IDE)
	FRDM-K22F: NXP	14 - analog 18 - digital	16-bit ADC with configurable resolution	one UART that supports RS232 with flow control, RS485, and ISO7816 two UARTs that support RS232 with flow control and RS485 One low-power UART (LPUART) I2C	OpenSDAv2 USB Port	Accelerometer and magnetometer Thermistor	512 KB Flash 28 KB SRAM FPU DSP 64 LQFP	120-MHz ARM Cortex-M4 core with DSP and FPU instruction set	MCU Xpresso Integrated Development Environment (IDE)
PC (all x86)	Industrial PC Port	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	-	-	-
	Intel® Galileo	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	Платы расширения	-	-	-
Infineon	XMC4000	12-channel DMA (XMC4500), 8-channel DMA (XMC4400), XMC4200, XMC4100) 4-channel high-resolution, PWM (150ps) (XMC4400), XMC4200, XMC4100)	Up to 4x 12-bit ADC achieving 4 Mega samples per second (interleaved mode) 2x 12-bit DAC	6 multi-functional serial interface modules configurable to SPI, I2C, I2S, UART Up to 6xCAN External bus interface supporting SDRAM, SRAM, NOR-/NAND-Flash and memory-mapped IO devices (e.g. LCD)	Touch interface and LED Matrix Battery-backed real-time clock with calendar function and time-based or external wake-up capabilities	-	Up to 2MB embedded Flash with 22ns access time and error correction unit Up to 352kB embedded RAM	ARM® Cortex®-M4 with floating point unit (FPU), single-cycle DSP MAC, 80-144MHz CPU frequency	DAVE™ 3 IDE

Microchip	Explorer 16/32 Development Kit	14 - analog 18 - digital	16-bit analog-to-digital converter (ADC) 12-bit digital-to-analog converter (DAC)	USB to UART/I <sup>2</sup> C™ adapter 2x mikroB USB interfaces RJ11 ICSP™ programming/debug interface 6-pin interface for the PICkit programmer MCP2221A USB to UART (up to 460,800 baud) + I2C serial adapter chip	USB to UART/I <sup>2</sup> C™ adapter 2x mikroBUS interfaces RJ11 ICSP™ programming/debug interface 6-pin interface for the PICkit programmer MCP2221A USB to UART (up to 460,800 baud) + I2C serial adapter chip	-	Serial SPI EEPROM (25LC256)	dsPIC33EP256GP506	MPLAB Integrated Development Environment (IDE)
Renesas	YRDKRL78G14	14 - analog 18 - digital	14-Bit 1-MSPS SAR ADC	On-board Wi-Fi 802.11b Module from GainSpan Corporation RS-232 Interface I2C, SPI with Debug through the Beagle connector or from Total Phase USB to UART/I <sup>2</sup> C™ adapter 2x mikroB USB interfaces	On-board Wi-Fi 802.11b Module from GainSpan Corporation RS-232 Interface I2C, SPI with Debug through the Beagle connector from Total Phase USB to UART/I <sup>2</sup> C™ adapter 2x mikroB USB interfaces	Relative Humidity & Temperature Sensor	Micro SD card slot 512KB Serial EEPROM (Renesas) 256KB On-chip Flash Memory (program) 8KB On-Chip Flash Memory (Data) 8Mbit Serial Flash for Web Server data storage (Micron)	-	-
Raspberry Pi	Raspberrry Pi	12-channel DMA , 8-channel DMA 4-channel high-resolution, PWM	16-bit analog-to-digital converter (ADC) 12-bit digital-to-analog converter (DAC)	RJ11 ICSP™ programming/debug interface 6-pin interface for the PICkit programmer I2C serial adapter chip	-	-	-	-	-

Arduino	Arduino	12-channel DMA (XMC4500), 8-channel DMA (XMC4400), XMC4200, XMC4100 4-channel high-resolution, PWM (150ps) (XMC4400), XMC4200, XMC4100)	– Four General-Purpose Timers With 16-Bit PWM Mode – 4-Channel 12-Bit ADCs	USB-OTG, Ethernet CAN2.0 A/B, I2S, USART, SPI, RS-232, IrDA, JTAG	-	-	-	-	-
NI	Evaluate NI myRIO	GPIO with four 32-bit banks, of which up to 54 bits can be used with the PS I/O (one bank of 32b and one bank of 22b) and up to 64 bits (up to two banks of 32b) connected to the Programmable Logic Up to 54 flexible multiplexed I/O (MIO) for peripheral pin assignments	– Four General-Purpose Timers With 16-Bit PWM Mode – 4-Channel 12-Bit ADCs	USB-OTG, Ethernet CAN2.0 A/B, I2S, USART, SPI, RS-232	-	Accelerometer	-	-	-
Silicon Labs	Giant Gecko GG11 Starter Kit	-	12-bit 1 Msps ADC 12-bit 500 ksps DAC	I2C SPI UART RMII EFM32 Ethernet Connector EFM32 USB Connector Debug Connector Simplicity Connector	-	Relative Humidity & Temperature Sensor Inductive LC Sensor Capacitive Touch Slider	2048 kB Flash 512 kB RAM BGA192 package	48 MHz ARM Cortex-M3 CPU	Simplicity Studio



Texas Instruments	SimpleLink MSP-EXP432P401R	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ultra-Low-Leakage I/Os (<math>\pm 20</math> nA)</li> <li>– All I/Os With Capacitive-Touch Capability</li> <li>– Up to 48 I/Os With Interrupt and Wake-up Capability</li> <li>– Up to 24 I/Os With Port Mapping Capability</li> <li>– Eight I/Os With Glitch Filtering Capability</li> </ul>	<p>14-Bit 1-MSPS SAR ADC With 13.2 ENOB Native and Capability to Reach 16 ENOB With Oversampling, Differential and Single-Ended Inputs Internal Voltage Reference With 10-ppm/<math>^{\circ}</math>C Typical Stability Two Analog Comparators</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Up to Four eUSCI_A Modules</li> <li>– UART With Automatic Baud-Rate Detection</li> <li>– IrDA Encode and Decode</li> <li>– SPI (up to 16 Mbps)</li> <li>– Up to Four eUSCI_B Modules</li> <li>– I2C (With Multiple-Slave Addressing)</li> <li>– SPI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Up to Four eUSCI_A Modules</li> <li>– UART With Automatic Baud-Rate Detection</li> <li>– IrDA Encode and Decode</li> <li>– SPI (up to 16 Mbps)</li> <li>– Up to Four eUSCI_B Modules</li> <li>– I2C (With Multiple-Slave Addressing)</li> <li>– SPI (up to 16 Mbps)</li> </ul>	<p>Up to 256KB of Flash Main Memory (Organized Into Two Banks Enabling Simultaneous Read/Execute During Erase)</p> <p>16KB of Flash Information Memory (Used for BSL, TLV, and Flash Mailbox)</p> <p>Up to 64KB of SRAM (Including 6KB of Backup Memory) 32KB of ROM With MSP432™ Peripheral Driver Libraries</p>	ARM® 32-Bit Cortex®-M4F CPU	SimpleLink SDK
Xilinx	Xilinx Zynq-7000	<p>GPIO with four 32-bit banks, of which up to 54 bits can be used with the PS I/O (one bank of 32b and one bank of 22b) and up to 64 bits (up to two banks of 32b) connected to the Programmable Logic</p> <p>Up to 54 flexible multiplexed I/O (MIO) for peripheral pin assignments</p>	12-Bit ADC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Two 10/100/1000 tri-speed Ethernet MAC peripherals with IEEE Std 802.3 and IEEE Std 1588 revision 2.0 support</li> <li>• GMII, RGMII, and SGMII interfaces</li> <li>• Two USB 2.0 OTG peripherals, each supporting up to 12 Endpoints</li> <li>• USB 2.0 compliant device IP core</li> <li>• Supports on-the-go, high-speed, full-speed, and low-speed modes</li> <li>• Intel EHCI compliant USB host</li> <li>• 8-bit ULPI external PHY interface</li> <li>• Two full CAN 2.0B compliant CAN bus interfaces</li> <li>• CAN 2.0-A and CAN 2.0-B and ISO 11898-1 standard compliant</li> <li>• External PHY interface</li> <li>• Two SD/SDIO 2.0/MMC3.31 compliant controllers</li> <li>• Two full-duplex SPI ports with three peripheral chip selects</li> <li>• Two high-speed UARTs (up to 1 Mb/s)</li> <li>• Two master and slave I2C interfaces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Two 10/100/1000 tri-speed Ethernet MAC peripherals with IEEE Std 802.3 and IEEE Std 1588 revision 2.0 support</li> <li>• GMII, RGMII, and SGMII interfaces</li> <li>• Two USB 2.0 OTG peripherals, each supporting up to 12 Endpoints</li> <li>• USB 2.0 compliant device IP core</li> <li>• Supports on-the-go, high-speed, full-speed, and low-speed modes</li> <li>• Intel EHCI compliant USB host</li> <li>• 8-bit ULPI external PHY interface</li> <li>• Two full CAN 2.0B compliant CAN bus interfaces</li> <li>• CAN 2.0-A and CAN 2.0-B and ISO 11898-1 standard compliant</li> <li>• External PHY interface</li> <li>• Two SD/SDIO 2.0/MMC3.31 compliant controllers</li> <li>• Two full-duplex SPI ports with three peripheral chip selects</li> <li>• Two high-speed UARTs (up to 1 Mb/s)</li> <li>• Two master and slave I2C interfaces</li> </ul>	<p>32 KB Level 1 4-way set-associative instruction and data caches (independent for each CPU)</p> <p>512 KB 8-way set-associative Level 2 cache (shared between the CPUs)</p> <p>On-chip boot ROM</p> <p>256 KB on-chip RAM (OCM)</p>	ARM® Cortex™-A9	Xilinx Software Development Kit