

*С.А. СЕРИКОВ*, д-р. техн. наук, доц. ХНАДУ;

*А.Н. БОРИСЕНКО*, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;

*А.Б. БОГАЕВСКИЙ*, д-р. техн. наук, проф. ХНАДУ;

*Е.Г. ВОВК*, магистр ХНАДУ.

## **МЕТОДИКА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЧЕРЕЗ ПОРТ USB В МИКРО- КОНТРОЛЛЕРАХ НА БАЗЕ ЯДРА CORTEX M4 В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ**

В статье анализируются аппаратные возможности передачи данных через порт USB современных микропроцессорных систем на базе ядра Cortex M4 и предлагается методика разработки измерительных систем с возможностью передачи данных к персональным или специализированным измерительным комплексам.

**Ключевые слова:** микропроцессор, транспортное машиностроение, микроконтроллер, CORTEX, передача данных.

**Постановка проблемы:** За последние десятилетия микропроцессорная техника набрала огромные темпы в своем развитии и распространении в системах управления. Для решения сложных задач, объемных вычислений применяются 32-х и 16-разрядные платформы в бортовых системах управления и измерения. Данные устройства характеризуются высоким быстродействием и наличием измерительной, исполнительной и коммуникационной периферии. За последние несколько лет микроконтроллеры на базе ядра Cortex M4 занимают лидирующие позиции в своем классе на рынке радиоэлектронной аппаратуры. Прежде всего, это связано с набором мощной измерительной и вычислительной аппаратуры в одном корпусе, а так же ценовой политики производителей микроконтроллеров на этом базе ядра Cortex M.

Для транспортного машиностроения данные микроконтроллеры позволяют при проектировании и разработке электронных систем управления использовать аппаратные возможности специализированных интегрированных интерфейсов передачи данных CAN2.0 и USB2.0. Выходные порты микроконтроллера толерантны напряжению питания 5В, что дает возможность подключать их без согласования уровней напряжения с логическими уровнями интерфейсов передачи данных транспортных систем и персональных компьютеров. Поэтому, при отладке и разработке универсального блока управления измерительной или управляющей системы огромную роль играют данные интерфейсы, поскольку они позволяют удешевить и повысить надежность, коммуникационность разрабатываемой системы. В связи с указанными преимуществами, актуальными являются вопросы разработки и применения методик управления передачи данных с использованием имеющихся программно-аппаратных интерфейсов.

**Цель статьи** – ознакомить с методикой передачи данных через интерфейс USB в микроконтроллерах на базе ядра Cortex M4.

Одними из самых распространенных микроконтроллеров на базе ядра Cortex M4 являются микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics.

Семейство микроконтроллеров STM32F4 производства компании STMicroelectronics относится к цифровым сигнальным контроллерам и объединяет в себе достоинства классических микроконтроллеров с развитым набором периферии и вычислительную мощь специализированных процессоров. К основным характеристикам можно отнести: поддержку вычислений с плавающей точкой, увеличенный объем ОЗУ (до 192-256 Кб), объем встроенной FLASH памяти до 2 Мбайт, поддержку полнодуплексного интерфейса I<sup>2</sup>S, потребление менее 1 мкА в спящем режиме с включенным RTC (*Real Time Clock*), увеличенная частота работы АЦП, с ART (адаптивный ускоритель работы с FLASH памятью) частоту работы ядра до 180 МГц.

Микроконтроллеры могут содержать до 17 таймеров: два 16-битных таймера с расширенными функциями, два 32-битных таймера общего назначения, восемь 16-битных таймеров общего назначения, два 16-битных базовых таймера, два сторожевых таймера (независимый и оконного типа) и 24-битный системный таймер. Часть таймеров могут конфигурироваться на работу в мультирежимном формате, позволяющем строить системы из таймеров. Например, можно повысить разрядность счетчика до 48, сконфигурировав последовательно три таймера, или синхронно запускать сразу несколько таймеров.

Таймеры с приведенными функциями имеют широкие функциональные возможности, а именно: комплементарные выводы для управления трехфазных двигателей, поддержка режимов счета в прямом и обратном направлениях, генерация ШИМ, каналы захвата/сравнения сигнала, режим одиночного импульса, поддержка режима прямого доступа к памяти, дополнительные функции безопасности в случае сбоя, поддержка интерфейса энкодера и датчика Холла [1].

Микроконтроллер содержит три аналогово-цифровых преобразователя (АЦП) и два одноканальных цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП). АЦП обладает разрешающей способностью 12 бит и очень высокой скоростью преобразования в 2,4 мегасемпла в одиночном режиме и 7,2 мегасемплов - в тройном режиме. Максимальное количество входных аналоговых каналов - 24. Гибкая система настроек встроенного аналогового мультиплексора позволяет задавать любые последовательности преобразования аналоговых каналов (за исключением одновременного преобразования одного канала на нескольких АЦП). Настройки АЦП позволяют производить однократные и циклические измерения. Для проведения преобразования на максимальных скоростях необходимо соблюдать диапазон напряжения питания 2,4...3,6 В. При снижении напряжения до 1,8 (1,7) В скорость преобразования снижается примерно в 2 раза.

Для контроля внутренней температуры микроконтроллера встроен температурный датчик. На его выходе формируется напряжение в зависимости от окружающей температуры. Выход датчика через мультиплексор подключается к АЦП. Используя температурный датчик, можно измерять температуру от  $-40$  до  $125^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ .

ЦАП обладает разрешающей способностью 12 бит, преобразование возможно в 8/12-битовом формате с выравниванием этого результата по левому или правому краям. Так как ЦАП содержит два канала, то есть возможность формирования стереосигнала. Доступна функция автоматической генерации шумового сигнала с меняющейся амплитудой или треугольного сигнала.

Контроллер прямого доступа к памяти DMA (*Direct Memory Access*) служит для высокоскоростного перемещения данных между периферией и памятью или памятью и памятью без участия CPU (*Central Processor Unit*). Это разгружает CPU для других операций.

Два DMA-контроллера, которые также могут работать параллельно, сочетают в себе возможности мощного коммутатора шин с независимым FIFO-буфером для оптимизации пропускной способности системы, Первый контроллер предназначен для доступа к памяти, а второй - для доступа к периферии.

В сумме контроллеры DMA имеют 16 потоков (по 8 на каждый контроллер), каждый используется для управления запросами доступа к памяти от одной или более периферии. Каждый поток может иметь суммарно до 8 каналов (запросов) и имеет арбитраж приоритетности. Приоритеты между DMA-потоками задаются программно (четыре уровня приоритета: очень высокий, высокий, средний и низкий) или аппаратно в случае равенства программных приоритетов. Потоки поддерживают работу с кольцевым буфером.

DMA работает со всей наиболее важной периферией: SPI, I<sup>2</sup>S, I<sup>2</sup>C, USART, таймеры, DAC, ADC, SDIO, DCMI, Ethernet, USB, и с модулем шифрования[2].

USB (англ. Universal Serial Bus — «универсальная последовательная шина») — последовательный интерфейс передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств в вычислительной технике. Разработка спецификаций для шины USB производится в рамках международной некоммерческой организации USB Implementers Forum (USB-IF), объединяющей разработчиков и производителей оборудования с шиной USB.

Для подключения периферийных устройств к шине USB используется четырёхпроводный кабель. Благодаря встроенным линиям питания USB позволяет подключать периферийные устройства без собственного источника питания (максимальная сила тока, потребляемого устройством по линиям питания шины USB, не должна превышать 500 мА, у USB 3.0 — 900 мА).

Соединительные кабели портов USB физически ориентированы, т.е. имеют различные по виду и конструкции разъемные соединители. Которые исключают возможность ошибочного соединения ведущего и ведомого устройств в системе обмена информацией (соединение «хостов» и

«устройств»). Существует реализация USB устройства без кабеля, со встроенным в корпус законечником «к хосту». Однако имеет место и неразъемное встраивание кабеля в устройство, как в компьютерную мышь.

В качестве ведущего («хоста») выступает программно-управляемый USB-контроллер, который обеспечивает функциональность всего интерфейса. Соединение контроллера с внешними устройствами происходит через USB-концентратор (другие названия — хаб, разветвитель). В силу того, что USB-шина имеет древовидную топологию, концентратор самого верхнего уровня называется корневым (*root hub*). Он встроен в USB-контроллер и является его неотъемлемой частью.

Стандартизированные обозначения физических контактов USB соединителей следующие:

- 1) VBus – напряжение питания 5В;
- 2) + Data – линия данных;
- 3) - Data – линия данных;
- 4) ID – используется в спецификации USB OTG;
- 5) Ground – «земля».

У микроконтроллеров STM32F4 данный интерфейс может быть сконфигурирован на следующие режимы[3]:

1. OTG(Dual-Role-Device);
2. OTG(Dual-Role-Device with Start of Frame Packet);
3. Host only;
4. Host only with Start of Frame Packet;
5. Device only;
6. Device only with Start of Frame Packet;
7. Device –DP-DM(специализированный режим).

Структурная схема организации аппаратного и программного USB интерфейса микроконтроллеров представлена на рис. 1.

Микроконтроллеры на базе ядра Cortex M4 аппаратно поддерживают несколько спецификаций интерфейса USB 2.0:

1. USB 2.0 full-speed device(скорость передачи данных 0,5—12 Мбит/с);
2. USB 2.0 high-speed(скорость передачи данных 25—480 Мбит/с).

Для работы с каждой спецификацией интерфейса производители микроконтроллеров разработали готовые библиотеки, позволяющие использовать все возможности аппаратной организации.

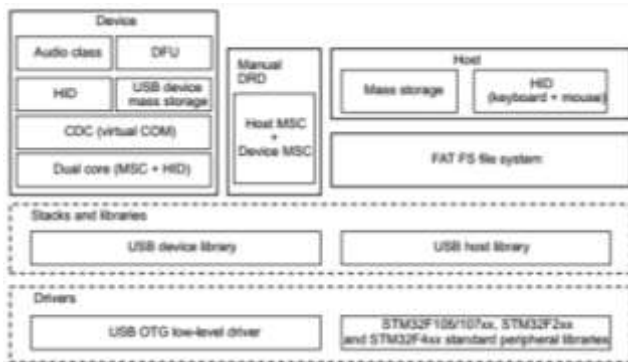


Рис. 1. – Структурная схема организации USB интерфейса микроконтроллеров STM32F4

USB OTG (*On-The-Go*) — расширение спецификации USB2.0, предназначенное для лёгкого соединения периферийных USB-устройств друг с другом без необходимости подключения к ПК. При подключении через USB OTG ранг устройства (ведущий или ведомый) определяется наличием или, соответственно, отсутствием перемычки между контактами ID и Ground в штекере соединительного кабеля. В USB OTG кабеле такая перемычка устанавливается лишь в одном из двух разъёмов.

Данные библиотеки могут настроить микроконтроллер на работу в режиме «хоста», «устройства» или настроить режим OTG. Для быстрой настройки производители включили в стандартные библиотеки с работой интерфейсом USB дополнительные файлы в папках Project и Utilities. В данных каталогах расположены примеры и драйверы готовых устройств.

Назначение USB-устройств определяется кодами классов, которые общаются USB-хосту для загрузки необходимых драйверов. Коды классов позволяют унифицировать работу с однотипными устройствами разных производителей. Устройство может поддерживать один или несколько классов, количество которых определяется количеством конечных точек (USB endpoints). Конечные точки представляют собой логические коды, которые используются «хостом» для организации связи с устройством. Входные и выходные точки конфигурируются под определенные режимы передачи данных.

Для работы в режиме «устройства», в библиотеку включены основные классы, в которых может находиться микроконтроллер. Это, например, классы COM-порта, аудиоустройств, класс устройств взаимодействия с человеком (HID), и т.д.

В режиме работы «хоста», микроконтроллер может поддерживать файловую систему FAT, а так же поддерживать класс HID.

Все указанные режимы устанавливаются и организуются в стандартной библиотеке для работы с USB интерфейсом. Она разделяется на несколько каталогов. Методика выбора режима подключения состоит в правильном подборе и включении в основное тело программы специализированных файлов из библиотеки (см. рис.2.)

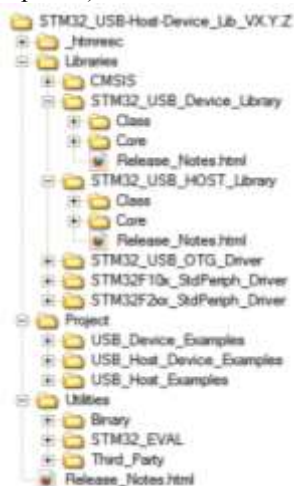


Рис. 2. – Организация библиотеки для работы с интерфейсом USB

Рассматриваемый в настоящей работе подход был практически реализован для организацией связи между различными подсистемами в информационно-управляющей системе транспортного средства.

**Выводы:** Таким образом, использование современных микроконтроллеров на базе ядра Cortex M4 позволяет создавать мощные вычислительные, управляющие и измерительные системы с широкими коммуникативными возможностями. Рассмотренная методика в сочетании с аппаратной реализацией интерфейса передачи данных USB и современным вычислительным ядром способствуют упрощению разработки объектного программного обеспечения обмена информацией между различными устройствами системы.

**Список литературы:** 1. Ю, Джозеф. Ю. Ядро CortexM3 компании ARM. Полное руководство / Джозеф Ю; пер. с англ. А. В. Евстифеева. М. : Додэка XXI, 2012. 552 с. : ил. (Мировая электроника). Доп. тит. л. англ. ISBN 9785941202430. 2. STM32F4XXX datasheet (см. <http://www.st.com/>). 3. Reference manual for USB (см. <http://www.st.com/>).

**Bibliography (transliterated):**1. Ju, Dzhozef. Ju. Jadro CortexM3 kompanii ARM. Polnoe rukovodstvo / Dzhozef Ju; per. s anrl. A. V. Evstifeeva. M. : Dodjeka HHI, 2012. 552 p. : il. (Mirovaja jelektronika). Dop. tit. l. anrl. ISBN 9785941202430. 2. STM32F4XXX datasheet (см. <http://www.st.com/>). 3. Reference manual for USB (см. <http://www.st.com/>).

Поступила (received) 11.04.2014

*А.В. САДОВОЙ*, д-р техн. наук., проф., ДГТУ, Днепродзержинск  
*М.В. ЦАБЕНКО*, асс., ДГТУ, Днепродзержинск,  
*Д.А. НАГОРНЫЙ*, студент, ДГТУ, Днепродзержинск,

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ "ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР – ПРИВОДНОЙ ДВИГАТЕЛЬ"**

Рассмотрены системы компримирования центробежных компрессоров на основе уточненной модели Мура-Грейтцера с элементами антипомпажной защиты: байпасированием, антипомпажным клапаном. Исследовано влияние нестабильных явлений на работу приводного двигателя.

**Ключевые слова:** уточненная модель, антипомпажная защита, байпасирование, антимонтажный клапан, приводной двигатель.

**Постановка проблемы.** Стратегия управления системами компримирования, реализуемая при помощи автоматизированных систем управления электромеханическими позиционерами с целью повышения технико-экономических показателей технологических процессов, имеет большие перспективы. В соответствии с технологией, может возникнуть ситуация, когда потребление сжатого воздуха уменьшается, что создает предпосылки для возникновения помпажа. Такой режим работы компрессора является аварийным и приводит к механическому разрушению компрессора, приводного механизма и технологического оборудования. Для предотвращения помпажа чаще всего используют возврат части сжатого воздуха с выхода компрессора на его вход (байпасирование) или сброс части сжатого воздуха через антипомпажный клапан (АПК). Еще одним эффективным способом защиты от помпажа является управление скоростью приводного механизма. Поэтому работа, посвященная комплексному изучению процессов в системе "центробежный компрессор - приводной двигатель" (ЦК-ПД) является актуальной.

**Анализ литературы.** Несмотря на широкое распространение математических методов анализа процессов, происходящих в обобщенной динамической системе в целом, в системах управления компрессорами они не нашли широкого применения [1, 2]. Основными допущениями, сделанными Муром и Грейтцером при выводе модели являются: большой коэффициент, усиления прямого канала, использование несжимаемой массового потока в компрессоре, сжимаемый поток в камере и небольшое открытие дроссельной заслонки воздуховода. Другие варианты этой модели рассматривались с допущением, что в компрессоре одномерный несжимаемый проток, изоэнтропической процесс сжатия в камере. Влияние на приводной двигатель не рассматривалось.

Системы, которые рассматриваются в наше время [3, 4, 5], в основном линеаризованы, и приближенно описывают технологический процесс, суще-