

Ключев А.О., Кустарев П.В., Платунов А.Е.
тел.: (812)-233-30-96
email: info@lmt.ifmo.ru
URL: <http://lmt.ifmo.ru>

КОНТРОЛЛЕРЫ С МИКРОЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Параметры энергопитания, такие как потребляемая мощность, напряжение и другие, безусловно, важны для любого электронного устройства, в особенности для встраиваемых средств вычислительной техники. Рост объема электроники, в первую очередь микропроцессорных контроллеров, в самых различных прикладных системах: в промышленности, на транспорте, в медицине и быту, - остро поставил задачу экономии электроэнергии. Миниатюризация привела к расширению номенклатуры автономных устройств с батарейным питанием, к более плотной их компоновке, уменьшению размеров корпусов и ухудшению тепловых режимов. Эти и некоторые другие факторы придали дополнительный импульс развитию технологии энергосбережения во встраиваемых микропроцессорных системах.

Определенная специфика в вопросах энергопитания характерна для большинства современных распределенных информационно-управляющих систем (РИУС). Ограничение энергопотребления узлов РИУС открывает ряд дополнительных возможностей, таких как удаленное электропитание контроллеров, питание нескольких пространственно рассредоточенных контроллеров от единого источника, подачу электропитания по каналам передачи данных вычислительной сети.

При этом основным требованием является снижение потребляемого тока до уровня единиц-десятков миллиампер при напряжении 12..36В, что удовлетворяет параметрам сигнальных кабелей и позволит снизить потери напряжения на протяженных линиях связи. Есть еще один важный аспект группового электропитания: рост потребления одного или нескольких узлов не должен влиять на стабильность электропитания и качество связи в остальной сети. Подобная ситуация может возникнуть в некоторых рабочих режимах (например, в момент одновременного включения нескольких реле) или в аварийных ситуациях. В этой связи необходимо предусмотреть схемы ограничения максимального потребляемого тока и средства аварийного отключения от сети питания и передачи данных.

Данный обзор ориентирует разработчика в вопросах проектирования экономичных контроллеров РИУС и дает ряд практических рекомендаций.

Энергопотребление типового контроллера

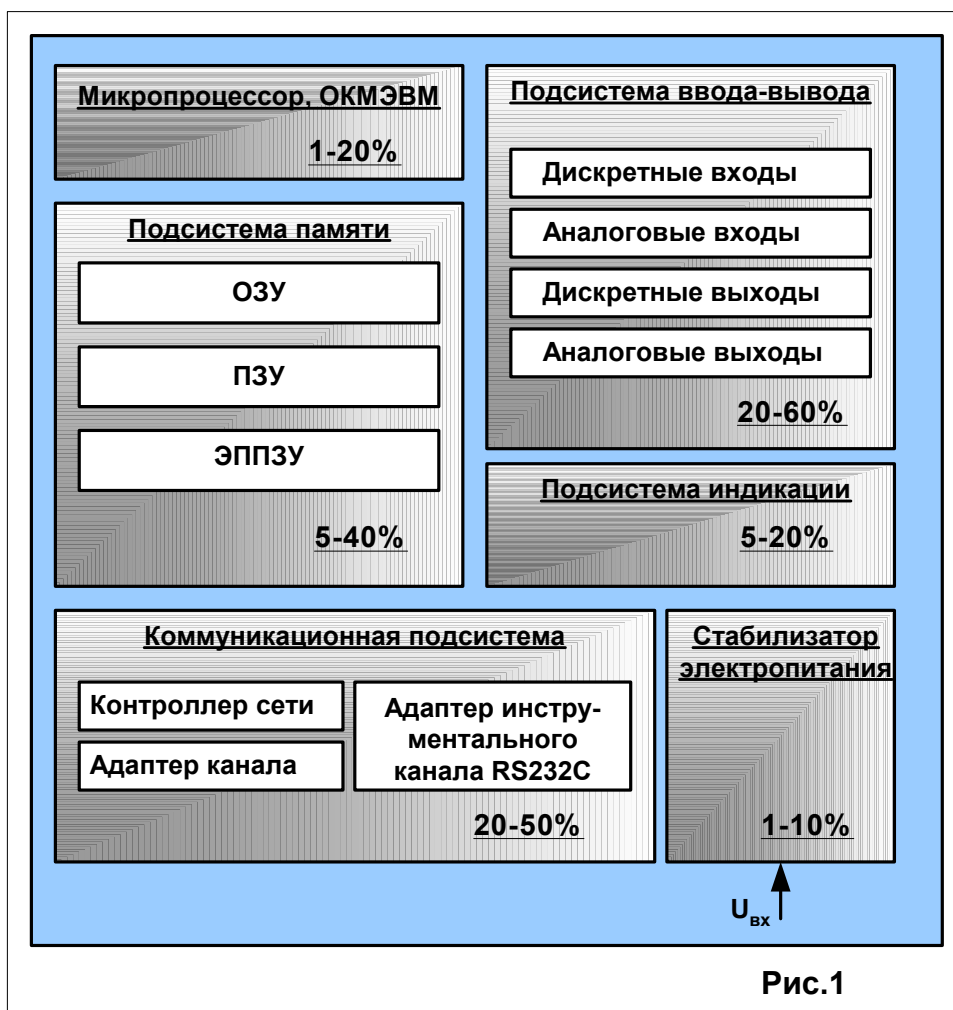
Значительная экономия потенциально может быть достигнута там, где больше потребление энергии. Рассмотрим различные подсистемы типового контроллера с этой точки зрения.

Современные контроллеры используют разнообразную элементную базу, построены по различным архитектурным принципам и характеризуются широким диапазоном вычислительной мощности. В связи с этим сложно предложить унифицированную структуру контроллера с типовым набором подсистем. Кроме того, соотношение потребляемой мощности блоков может сильно отличаться в зависимости от типа контроллера. Например, доля энергопотребления подсистемы процессор-память в модуле универсального вычислителя может достигать 90%, в то время как в типовом контроллере дискретного вывода на однокристалльную микроЭВМ (ОКМЭВМ) приходится всего 10-30%.

Таким образом, унифицированную структуру можно предложить, только сузив класс систем. Сразу отбросим мощные программируемые логические контроллеры (ПЛК) и персональные компьютеры (ПК). Для предлагаемых на рынке моделей потребляемая мощность находится в рамках десятков ватт и режимы удаленного электропитания заведомо малопригодны, хотя рассматриваемые далее методы бесспорно применимы и эффективны и в данном случае.

С другой стороны, разнообразные модули ввода/вывода, простые циклические регуляторы (loop control unit (LCU)), управляемые по вычислительной сети и другие узлы на базе 8/16-разрядных микроконтроллеров создают значительно меньшую энергонагрузку. Одновременно с этим групповое электропитание по коммуникационным кабелям для них более предпочтительно в силу большого количества и пространственной рассредоточенности в составе РИУС.

Структура подобного типового контроллера представлена на рис. 1.



Сердцем системы является микропроцессор или микроконтроллер (ОКМЭВМ). Рынок 8/16-разрядных встраиваемых процессоров чрезвычайно широк и продолжает развиваться. В табл. 1 представлены характеристики энергопитания для наиболее популярных семейств различных фирм-производителей. Следует отметить, что разброс удельного потребления соответствует различным модификациям и значениям напряжения питания.

Таблица 1.

| Семейство | Фирма | Напряжение питания, В. | Удельная потребляемая мощность, мВт/MIPS. |
|-----------|------------|------------------------|---|
| PICmicro | Microchip | 2.0-5.5 | 6.0-20.0 |
| AVR | Atmel | 2.7-6.0 | 1.5-5.0 |
| HC08 | Motorola | 3.0-5.5 | 1.7-10.0 |
| AT89C5x | Atmel | 5.0 | 100.0 |
| MSP430F | Texas Ins. | 1.8-3.6 | 0.6 |
| F2MC-16 | Fujitsu | 3.0-5.5 | 10.0-13.0 |
| M16C/6x | Mitsubishi | 2.7-5.5 | 10.0-13.0 |

Подсистема памяти включает несколько типов запоминающих устройств (ЗУ): оперативная память (ОЗУ или RAM), постоянная память (ПЗУ или ROM), электрически

перепрограммируемое в системе ПЗУ (ЭППЗУ или E²PROM). Любой из этих блоков может быть интегрирован в составе ОКМЭВМ.

В малых контроллерах в качестве внешних ИМС ОЗУ обычно используется асинхронная статическая память (SRAM). Энергопотребление микросхем SRAM ведущих производителей (ALLIANCE, FUJITSU, LG, NEC и другие) находится в рамках от 30 до 150 мВт.

В качестве ПЗУ и ЭППЗУ могут применяться различные типы микросхем. В табл.2 указаны варианты использования в составе вычислительных систем, основные производители и параметры наиболее популярных типов ИМС постоянной памяти. В современных разработках все большую популярность приобретают комбинированные микросхемы «ОЗУ + ПЗУ», также представленные в табл.2.

Таблица 2.

| Класс ИМС | Функция в системе | Производители | Потребляемая мощность, мВт. | |
|---|-------------------|--------------------------|-----------------------------|------------|
| | | | Чтение/ запись | Хранение |
| Масочные и однократно программируемые ПЗУ | ПЗУ | ST, Microchip | 100-150/ - | 0.15-15 |
| ПЗУ с ультрафиолетовым стиранием | ПЗУ | ST, Microchip | 100-125/ - | 0.15-10 |
| FLASH с параллельным интерфейсом | ПЗУ, ЭППЗУ | Intel, AMD, SST, Atmel | 50-120/ 100-150 | 0.025-5 |
| Комбинированные FLASH + SRAM с параллельным интерфейсом | ОЗУ, ПЗУ, ЭППЗУ | Mitsubishi, SST, Toshiba | 50-120/ 100-160 | 0.015 |
| FLASH с последовательным интерфейсом | ЭППЗУ | Atmel, Toshiba | 15-35/ 55-120 | 0.03-0.05 |
| E ² PROM с последовательным интерфейсом | ЭППЗУ | Microchip, Atmel, ST | 1.25-5/ 8-17 | 0.003-0.03 |

Важным блоком в структуре контроллера РИУС является коммуникационный интерфейс. В модулях удаленного ввода-вывода обычно поддерживается одна из стандартных контроллерных сетей: CAN, LIN, ProfibusDP/PA, Interbus-S, Modbus или другие, функционально аналогичные. Кроме того, одновременно с основным сетевым интерфейсом, в большинстве случаев имеется дополнительный инструментальный канал RS232C.

Параметры энергоснабжения однокристальных контроллеров сети и адаптеров коммуникационных каналов представлены в табл.3.

Таблица 3.

| Интерфейс | ИМС контроллера/ адаптера канала | Потребляемая мощность, мВт | |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| | | активный режим | режим энергосбережения |
| CAN 2.0 | MCP2510 (Microchip) | 50 | 0.025 |
| | PCA82C251 (Philips) | 50-450 | 1.4 |
| | ВСЕГО: | 100-500 | 1.425 |
| RS232 | встроен в ОКМЭВМ | - | - |
| | MAX3221 (MAXIM) | 1.5-5 | 0.01 |
| | ВСЕГО: | 1.5-5 | 0.01 |
| ProfibusDP/ RS485 | SPC-3 (SIEMENS) | 250-500 | - |
| | MAX3488 | 3-7 | 0.003 |
| | ВСЕГО: | 8-20 | - |
| Interbus-S | SUPI-3 (PHOENIX) | 100 | - |
| | - | - | - |
| | ВСЕГО: | 100 | - |

Любой модуль удаленного ввода/вывода или LCU характеризуется, прежде всего, номенклатурой и количеством каналов сопряжения с датчиками и исполнительными устройствами. Типовой набор каналов ввода-вывода программируемых контроллеров, определенный стандартом IEC-61131-2, представлен в табл.4. Там же указаны варианты технической реализации и соответствующие им уровни энергопотребления.

Таблица 4.

| Тип канала | Реализация | Потребляемая мощность, мВт |
|------------------|--|----------------------------|
| Аналоговый вход | Встроенный в ОКМЭВМ АЦП | - |
| | Внешняя ИМС АЦП | 2-20 |
| Аналоговый выход | Встроенный ШИМ + внешний интегратор на базе ОУ | 10-25 |
| | Внешняя ИМС ЦАП | 1-5 |
| Дискретный вход | Оптически изолированный вход | 0.5-2 |
| Дискретный выход | TTL/CMOS – выход | 2-5 |
| | Полупроводниковый ключ | 5-20 |
| | Реле | 5-25 |

Следующим элементом контроллерных модулей является подсистема индикации. Здесь могут применяться несколько разновидностей устройств: дискретные светодиоды или светодиодные индикаторы, жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ), электролюминесцентные индикаторы (ЭЛИ). Максимальным энергопотреблением обладают светодиодные модули: до 25 мВт/сегмент, минимальным – ЖКИ, не использующие подсветки: 15-30 мВт для модуля графического индикатора разрешением 128*64 точек. Различные схемы подсветки могут дополнительно потреблять от 0.5Вт до 2 Вт.

В завершении рассмотрим подсистему электропитания. Она может объединять микропроцессорный супервизор, систему резервного и аварийного питания, другие схемы, но ключевым элементом с точки зрения собственного потребления является преобразователь-стабилизатор напряжения. В зависимости от применяемой ИМС токи утечки составляют 0.05-10мА, что, например, для входного напряжения 24В, соответствует мощности 1,2-240 мВт. Кроме того, следует учитывать, что в зависимости от способа преобразования (линейный, импульсный), значительно различается КПД стабилизатора, который непосредственно отражается на значении энергопотребления всей системы. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Некоторая усредненная оценка уровней энергопотребления перечисленных подсистем, основанная на практическом опыте, приведена на рис. 1. В контроллерах могут быть реализованы и другие блоки, например, часы реального времени, системы термомониторинга и т.д., но в силу несоизмеримо малой потребляемой мощности они исключены из данного обзора.

Методы снижения энергопотребления контроллеров в составе РИУС

Задачу снижения энергопотребления контроллеров предлагается решать по ряду направлений:

- ✓ повышение эффективности стабилизатора электропитания;
- ✓ применение компонентов с микропотреблением;
- ✓ использование режимов пониженного энергопотребления аппаратуры;
- ✓ разработка энергосберегающих режимов управления периферийными устройствами.

Под увеличением эффективности стабилизатора понимается не только рост значения его КПД, но и оптимизация режимов электропитания. Высокий КПД на уровне 70-95% на сегодняшний день обеспечивают недорогие импульсные стабилизаторы, выпускаемые фирмами Analog Devices (ADP1xxx), MAXIM (MAX7xx, MAX16xx) и др. Важным свойством именно импульсных стабилизаторов является функционирование в режиме преобразования мощности. При этом, чем больше разница входного напряжения $U_{вх}$ и стабилизируемого напряжения $U_{ст}$, тем меньший входной ток $I_{вх}$ требуется для поддержания постоянной мощности P_n , отдаваемой в нагрузку – во внутренние схемы контроллера. Основным требованием удаленного электропитания, как отмечалось выше, является незначительный потребляемый контроллером ток, на уровне единиц-десятков мА. По этой причине более предпочтительны стабилизаторы с большим напряжением $U_{вх\ max}$. Например, у ИМС ADP1111 $U_{вх\ max}=30В$, в то время, как стабилизаторы производства MAXIM, например, MAX1626, имеют $U_{вх\ max}=11..16В$. Другой путь увеличения разности $U_{вх}-U_{ст}$ - снижение напряжения электропитания схемы контроллера $U_{ст}$ с 5В до 3.3В/2.5В.

Это требует соответствующего отбора электронной базы всех остальных подсистем устройства, что не всегда выполнимо.

Действенным методом снижения общего энергопотребления является демпфирование (сглаживание) импульсной нагрузки. Действительно, такие подсистемы, как АЦП, приемопередатчики, импульсные входы и др., обычно имеют разовые броски потребления при передаче, преобразовании и т.п., в то время как основную часть времени, иногда до 99% находятся в режиме ожидания. В аналогичном режиме может функционировать даже процессорное ядро, о чем будет сказано ниже. В подобной ситуации естественным будет постепенное накопление энергии в конденсаторе и демпфирование импульсных нагрузок его емкостью. Для накопления большей энергии, конденсатор лучше ставить на входе импульсного преобразователя. Ток подзарядки, потребляемый из внешней цепи, необходимо ограничивать простейшей схемой стабилизации.

В случае аварийных ситуаций стабилизатор тока будет выступать элементом защиты внешней цепи от перегрузки, а емкость может использоваться как резервный источник питания на время, необходимое для сохранения данных в энергонезависимой памяти и корректную «остановку» алгоритма.

Применение электронной базы с микроэнергопотреблением является стандартным подходом, ограниченным, однако, как доступностью таковой, так и принципиальными ограничениями физического и технологического характера. В рамках рассмотренных подсистем (рис. 1) с этой точки зрения наибольший интерес представляют процессорный блок, модули дискретного и аналогового вывода, стабилизатор электропитания.

Среди семейств ОКМЭВМ следует выделить 8-разрядные микроконтроллеры AVR (Atmel) с уровнем энергопотребления от 1.5мВт/MIPS, HC08 (Motorola) - от 1.7 мВт/MIPS, и PICmicro (Microchip) – от 6мВт/MIPS. Особо привлекательно 16-разрядное семейство MSP430 (Texas Instruments) – 0.6 мВт/MIPS. Немного отстают 16-разрядные микроконтроллеры ST, Infineon (Siemens), Fujitsu с потреблением более 10мВт/MIPS. Однако они имеют более развитые функциональные возможности, а новые разработки фирм в направлении сокращения потребления ведут к сокращению этого разрыва.

В модулях вывода основными нагрузками являются элементы гальванической развязки — оптроны или твердотельные реле, а также ИМС усилителей и компараторов. Что касается последних, то доступность экономичных микросхем с микроамперными токами утечки ограничивается только ценой: их в большом количестве выпускают MAXIM, Analog Device, National Semiconductors и другие фирмы. В области оптоэлектроники разработчикам таких фирм, как Hewlett-Packard, Toshiba, Infineon и других удалось снизить уровень входных токов широкого круга современных компонентов до 1–2мА.

В секторе стабилизаторов напряжения также существует много экономичных приборов с токами утечки на уровне 50–100мкА. Активные и импульсные стабилизаторы с такими

параметрами выпускают Analog Device (ADP1xxx), MAXIM (MAX16xx), National Semiconductors (LP295x) и другие. Фирмы Traco, MinMax, FranMar предлагают стандартные модули DC-DC преобразователей, однако их недостатком являются значительные токи покоя, которые составляют 5–20мА.

Возможности программного управления энергопотреблением аппаратуры, реализованы практически во всех серийно выпускаемых семействах микропроцессоров и ОМЭВМ, а также во многих микросхемах расширения: коммуникационных контроллерах и адаптерах физических каналов, периферийных контроллерах, ЦАП и АЦП. Их использованию посвящено значительное количество работ. Базовые рекомендации представлены в [2], более глубоко эти вопросы рассматриваются в [3].

Некоторые микросхемы не поддерживают интеллектуального интерфейса, а для управления уровнем потребления предусмотрен специальный вывод. Примером могут служить большинство адаптеров физических интерфейсов: драйвер CAN PCA82C25x (Philips), LIN – TLE625x (Infineon), RS232 – MAX32xx (MAXIM)/SP32xx (SIPEX), RS485 – MAX34xx(MAXIM)/SP34xx(SIPEX) и другие. Чтобы реализовать программное управление такими кристаллами, достаточно подключить данный вывод к одному из портов микроконтроллера.

В завершении рассмотрим энергосберегающие режимы управления периферийными устройствами контроллеров. Вариантов их реализации может быть множество в зависимости от типа периферии и конкретного приложения. Следует выделять методы, требующие специальной схемотехнической поддержки и без таковой. Большинство практических реализаций соответствует одному из двух направлений:

1. переход от статического к импульсному режиму управления;
2. устранение «холостого» управления.

В первом случае учитывается несимметричность энергопотребления при различных значениях управляющих сигналов. Чаще это касается схем оптической развязки или дискретных выходов, построенных на базе твердотельных ключей или реле. Например, для включенного реле ток порта, управляющего обмоткой, может достигать десятков миллиампер, а в выключенном состоянии он фактически отсутствует. Если же построить каскад по схеме релейного триггера с питанием от внешних (коммутируемых) силовых цепей или использовать специальные поляризованные реле, например, фирмы Relpol, то для переключения достаточно короткого импульса, компенсируемого специальными схемами, рассмотренными выше.

Другой пример: если для взаимодействия с периферийным контроллером используется канал с оптической развязкой, то, повышая скорость передачи данных, мы уменьшаем длительность включенного состояния оптрона, а значит и энергопотребление. Такой

подход эффективен в случае, если командно-информационный обмен не носит непрерывного характера.

Под термином «холостое» управление будем понимать дублирование команд или излишне интенсивный опрос датчиков, если этого не требует техническое задание. Пример первой ситуации – циклическое обновление состояния выходных каналов удаленного УСО в промышленных системах, как этого требует модель ПЛК (стандарт IEC-61131). В простейшем варианте контроллер-УСО ретранслирует полученную по сети команду исполнительному устройству, например, реле. Однако в случае импульсного управления это будет приводить к периодическому броску тока, даже если реле уже находится в требуемом состоянии. С точки зрения экономии электроэнергии эффективнее предварительно проверять текущее состояние реле и только после этого подавать управляющий импульс.

Типичный пример избыточной работы датчиков – запуск режима периодических измерений АЦП. При этом «свежий» результат постоянно доступен в памяти, но возрастает энергопотребление, так как каждый рабочий цикл АЦП – это значительная импульсная нагрузка. В большинстве приложений такой режим не является необходимым, и было бы достаточно редких измерений, выполняемых асинхронно по запросу вычислительного процесса, использующих эти данные.

В представленном выше материале были рассмотрены только основные методы снижения энергопотребления контроллеров РИУС. В практических применениях их разнообразие гораздо шире. Кроме того, всегда следует рассматривать комплекс методов, ведь использование одного может привести к значительным потерям в другом. Комплексный подход в вопросах микроэнергопотребления контроллеров активно используется коллективом научно-производственной фирмы ООО «ЛМТ» (Санкт-Петербург). Наиболее ярко это можно продемонстрировать на примере модулей удаленного ввода-вывода семейства TTF.

Семейство контроллеров TTF

Унифицированные контроллеры семейства TTF (рис.2), выпускаемые ООО «ЛМТ» могут быть использованы в качестве модулей ввода-вывода в пространственно распределенных системах сбора данных и управления, например, в составе системы «БРИЗ»[1], а также как встроенные блоки автоматики в составе небольших машин и приборов.

Контроллеры семейства TTF осуществляют командно-информационный обмен по сети CAN или по некоммутируемым телефонным каналам, используя специально разработанный протокол КСС. Кроме того, поддержан стандартный периферийный интерфейс управляющих систем LIN.

При разработке особое внимание было уделено вопросам снижения потребляемой мощности. Это позволило реализовать систему удаленного группового электропитания нескольких десятков контроллеров по линиям связи протяженностью до 10 км.

В большей или меньшей степени были использованы все рассмотренные выше методы снижения энергопотребления:

- ✓ использована схема ограничения потребляемого тока;
- ✓ реализована система демпфирования импульсных нагрузок, позволившая ограничить входной ток на уровне 15 мА, при бросках мощности, потребляемой адаптером CAN в момент передачи, до 500 мВт. В варианте питания от телефонной линии втекающий ток не превышает 500 мкА, но при этом допускается управление двумя релейными выходами;
- ✓ в качестве стабилизаторов напряжения питания выбраны импульсные преобразователи мощности ADP1111 и MAX1626;
- ✓ использованы ОКМЭВМ семейства PICmicro (Microchip) с невысокой потребляемой мощностью;
- ✓ релейные выходы построены по триггерной схеме с импульсным управлением;
- ✓ поддержан переход в режим пониженного потребления микроконтроллера PIC16F877, CAN-контроллера MCP2510 (Microchip) и драйвера канала PCA82C251.



Рис 2.

Исключены ситуации «холостого» управления.

В итоге удалось снизить потребляемую мощность контроллеров TTF5, поддерживающих интерфейс CAN, до 0.6 Вт, а контроллеров TTF4, ориентированных на электропитание и передачу данных по стандартным некоммутируемым телефонным каналам - до 30мВт. Более подробно с техническими характеристиками и вариантами применения модулей семейства TTF можно ознакомиться в [1] или на интернет-странице ООО «ЛМТ» по адресу <http://lmt.cs.ifmo.ru>.

1. А.О.Ключев, П.В. Кустарев, А.Е. Платунов Восьмиразрядные контроллеры в системах автоматического управления. – Компоненты и технологии, №1 2001, стр. 22-24.
2. Т.В. Ремизевич Микроконтроллеры встраиваемых приложений: от общих подходов к семействам HC05 и HC08 фирмы Motorola.-М.:Додэка, 2000.-272 с.
3. Yung-Hsiang Lu, Eui-Young Chung, Tajana Simunic, Luca Benini, Giovanni De Micheli Quantitative Comparison of Power Management Algorithms. - Design Automation and Test in Europe, Stanford University, March 2000, pp. 20-26.