

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

контроллера (процессорное время, RAM, Flash, таймер). Поэтому использование ОСРВ для простых проектов на слабых микроконтроллерных ядрах с малым количеством памяти не оправдано.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению мобильного многофункционального аппаратно-программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились во ФГАОУ ВПО ЮФУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев, Н. Микроконтроллеры EFM32 компании Energy Micro – ультранизкое потребление при высокой производительности [Электронный ресурс] / Н. Елисеев, М. Стариченков // Электроника НТБ. Выпуск №5/2011 – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/2922>. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Семейство микроконтроллеров MSP430. [Текст] / Рекомендации по применению: Пер. с англ. – М.: Серия «Библиотека Компэла», 2005. – 544 с.
3. Кириенко, В.В. Обзор ОСРВ, пригодных для встраиваемых систем, применяемых при разработке современного диагностического оборудования [Текст] / В.В. Кириенко // Ползуновский вестник. – 2013. - № 2 - С. 280 – 282.
4. Ванцев, Д.В. Основные модели программирования микроконтроллеров [Электронный ресурс] / Д.В. Ванцев. - Режим доступа: [http://mcu.ucoz.ru/publ/programmirovanie/razrabotka\\_programmnogo\\_obespechenija/osn\\_ovyne\\_modeli\\_programmirovanija\\_mikrokontrollerov/11-1-0-4](http://mcu.ucoz.ru/publ/programmirovanie/razrabotka_programmnogo_obespechenija/osn_ovyne_modeli_programmirovanija_mikrokontrollerov/11-1-0-4) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Курниц, А. FreeRTOS. Операционная система реального времени для микроконтроллеров [Электронный ресурс] / А. Курниц // Компоненты и технологии, № 2/2011 - Режим доступа: <http://kit-e.ru/assets/listalka/Kurniz/Kurniz.pdf> – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. EmbOS [Электронный ресурс] / User & reference guide. Режим доступа: [https://www.segger.com/admin/uploads/productDocs/UM01001\\_emb\\_OS\\_Generic.pdf](https://www.segger.com/admin/uploads/productDocs/UM01001_emb_OS_Generic.pdf). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
7. Labrosse uC/OS-III The Real-Time Kernel [Электронный ресурс] / J Jean. - Режим доступа: <http://www.micrium.com/> – Загл. с экрана. – Яз. англ.

*Начальник сектора Кириенко В.В тел.: (8634) 311-143, e-mail: snowball@nxt.ru, Научно-технический центр "Техноцентр" Южного федерального университета; начальник отдела, ассистент кафедры МПС Семенистая Е.С., тел. 8 (8634) 311-143, suncat\_75@mail.ru - Научно-технический центр "Техноцентр" ФГАОУ ВПО Южный федеральный университет*

УДК 615.471

## ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С УЛЬТРАНИЗКИМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В.В. Кириенко, Е.С. Синютин

В данной статье рассмотрены основные методы тестирования энергоэффективности микроконтроллеров, которые используются для создания современной медицинской техники с автономным питанием. Произведено тестирование энергопотребления представителей трех семейств микроконтроллеров.

**Ключевые слова:** тестирование энергопотребления, микроконтроллер, медицинское оборудование, автономное питание.

### Актуальность

Современные медицинские устройства с автономным питанием требуют минимизации потребляемой энергии, т.к. это увеличивает время диагностирования и срок службы элементов питания, а также повышает удобство использования прибора и положительно сказывается на экологии. Понижения потребляемой энергии медицинским прибором такого

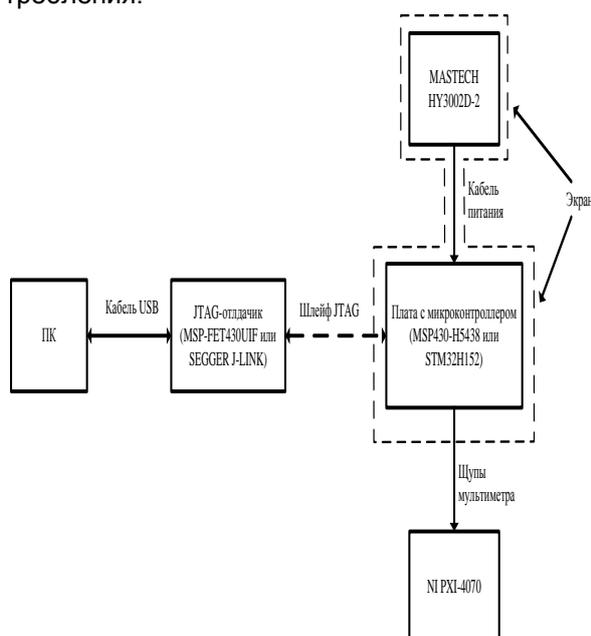
класса можно добиться применением низкопотребляющих микросхем [1]. Отсюда следует и необходимость применения низкопотребляющего микроконтроллера, который, как правило, является логическим ядром прибора и основным энергозатратным его элементом. Из существующих семейств микроконтроллеров в сегменте низкого энергопотребления были выбраны три основных ли-

**ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С УЛЬТРАНИЗКИМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

дера - это семейства MSP430F5, STM32L1, EFM32GG [2-5].

**Основная часть**

Произведем испытание микроконтроллерных семейств MSP430F5 фирмы Texas Instruments, STM32L1 фирмы STMicroelectronics, EFM32TG фирмы Energy Micro с ультранизким энергопотреблением на соответствие заявленным в технической документации характеристикам потребления тока в активном режиме и режимах пониженного энергопотребления.



*Рисунок 1 – Стенд измерения потребляемого тока*

Для проверки потребляемого тока семейством MSP430F5 была взята отладочная плата MSP430-H5438 фирмы Olimex, содержащую микроконтроллер MSP430F5438IPZ [6], минимальную необходимую для его работы обвязку (кварцевый резонатор, конденсаторы, потягивающий резистор) и разъем программирования. Использование данной отладочной платы гарантирует точность при измерении потребляемого тока, потому что на ней кроме самого микроконтроллера отсутствуют другие микросхемы и компоненты. Плата MSP430-H5438 для минимизации воздействия электромагнитных наводок была помещена в металлический корпус (экран) и подключена экранированным кабелем к источнику питания. В качестве источника питания был взят лабораторный блок питания MASTECH NY3002D-2. Для измерения потребляемого платой тока использовался высокоточный мультиметр NI PXI-4070 фирмы National Instruments. Для того чтобы запустить микроконтроллер MSP430F5438IPZ на работу

в тока в активном режиме и режимах пониженного энергопотребления был написан программный проект в среде разработки IAR Embedded Workbench for MSP430 5.1, позволяющий это сделать. Программирование микроконтроллера MSP430F5419IPZ из среды разработки IAR Embedded Workbench for MSP430 5.1 при помощи JTAG-отладчика MSP-FET430UIF. Представим схему измерительного стенда на рисунке 1.

Рассмотрим таблицу 1, в которой представлены результаты тестирования микроконтроллера MSP430F5438IPZ. Потребление данным микроконтроллером в активном режиме и режимах пониженного энергопотребления, измеренное на стенде соответствует цифрам, заявленным в документации производителем с небольшим превышением.

Таблица 1 - Таблица потребления тока микроконтроллера MSP430F5438 в зависимости от режима работы, при напряжении питания 3,3 В

Источник тактирования	Частота	Режим пониженного энергопотребления	Потребление заявленное в технической документации	Потребление полученное в результате эксперимента
Внешний кварц	16 МГц	нет	4,064 (254 мкА/ МГц)	4,1978 мА (262 мкА/ МГц)
DCO	1 МГц	LPM0	91 мкА	91,77 мкА
DCO	1 МГц	LPM2	8 мкА	10,76 мкА
VLO	32 кГц	LPM3	3.37 мкА	2,56 мкА
VLO	32 кГц	LPM4	1.69 мкА	2,45 мкА

Для оценки потребления тока семейством STM32L1 была взята отладочная плата STM32-H152 фирмы Olimex, содержащую микроконтроллер STM32L152VBT6 [6], которая также как и MSP430-H5438 имеет минимальный набор компонентов, что гарантирует точность измерений. Проект для запуска микроконтроллера в различных режимах работы был написан в IAR Embedded Workbench for ARM 6.3. Для оценки потребления использовался та же схема стенда, что для MSP430-H5438, изображенная на рисунке 1. С тем отличием, что программирование микроконтроллера STM32L152VBT6 3 при помощи JTAG-отладчика J-LINK фирмы SEGGER из среды разработки IAR Embedded Workbench

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

for ARM 6.3. Результаты тестирования микроконтроллера STM32L152VBT6 представлены в таблице 2. Полученные данные отличаются от заявленных в технической документации средних величин, но укладываются в максимально допустимые значения.

Таблица 2 - Таблица потребления тока микроконтроллера STM32L152VBT6 в зависимости от режима работы, при напряжении питания 3,3 В

Источник тактирования	Частота	Режим пониженного энергопотребления	Потребление заявленное в технической документации	Потребление полученное в результате эксперимента
Внешний кварц	32 МГц	Нет	9,6 мА (300 мкА/МГц)	9,8 мА (306 мкА/МГц)
MSI	4 МГц	Нет	900 мкА (225 мкА/МГц)	652 мкА (163 мкА/МГц)
MSI	4 МГц	Sleep	210 мкА (52 мкА/МГц)	243 мкА (61 мкА/МГц)
MSI	32 кГц	LowPower Run	24 мкА	43 мкА
MSI	32 кГц	LowPower Sleep	17,5 мкА	25,5 мкА
выключен	-	Stop Mode	7,7 мкА	8,4 мкА
выключен	-	Standby	0,3 мкА	0,2 мкА

В целях проверки семейства EFM32TG фирмы Energy Micro на соответствие заявленным в технической документации характеристикам потребления тока была использована отладочная плата EFM32TG-STK330, которая специально разработана для задачи измерения потребляемого тока микроконтроллером EFM32TG840F32 [7]. Плата EFM32TG-STK330 помимо микроконтроллера EFM32TG840F32, содержит встроенную схему измерения тока построенную на операционных усилителях вместе с дополнительным микроконтроллером, который опрашивает и передает по USB в измеренные значения тока. Данные значения, принятые по USB, отображаются на ПК в виде графика в программе Energy Micro energyAware Profiler. Для программирования микроконтроллера EFM32TG840F32 плата EFM32TG-STK330 содержит встроенный JTAG-отладчика J-LINK фирмы SEGGER. Т.о. в качестве измерительного стенда для оценки потребления тока микроконтроллером EFM32TG840F32 достаточно использования отладочной платы EFM32TG-STK330, которая и включает вы-

шеописанные модули измерения и программирования, и ПК для программирования и отображения полученных значений. Проект для запуска микроконтроллера в различных режимах работы был написан в IAR Embedded Workbench for ARM 6.3. Программирование микроконтроллера STM32L152VBT6 3 при помощи JTAG-отладчика J-LINK фирмы SEGGER из среды разработки IAR Embedded Workbench for ARM 6.3. Результаты тестирования микроконтроллера EFM32TG840F32 представлены в таблице 3. Полученные данные сходятся с данными заявленными в технической документации с небольшим превышением.

Таблица 3 - Таблица потребления тока микроконтроллера EFM32TG840F32 в зависимости от режима работы, при напряжении питания 3,3 В

Источник тактирования	Частота	Режим пониженного энергопотребления	Потребление заявленное в технической документации	Потребление полученное в результате эксперимента
Внешний кварц	32 МГц	Нет (EM0)	4,8 мА (150 мкА/МГц)	4,97 мА (155 мкА/МГц)
Внешний кварц	32 МГц	EM1	1,63 мА (51 мкА/МГц)	1,6 мА (50 мкА/МГц)
RC	32 кГц	EM2	1 мкА	0,9 мкА
выключен	-	EM3	0,6 мкА	0,7 мкА
выключен	-	EM4	20 нА	70 нА

Основываясь на проведенных измерениях можно сделать вывод о том, что все три микроконтроллера соответствуют заявленным в технической документации характеристикам потребления тока в активном режиме и режимах пониженного энергопотребления. Перейдем к оценке времени выполнения микроконтроллерами конкретной тестовой математической задачи с учетом энергоэффективности.

В качестве тестовой математической задачи для проверки вычислительной способности микроконтроллеров MSP430F5438IPZ, STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32 была выбрана задача цифровой фильтрации, которая представляет собой набор операций с плавающей точкой. Задача была алгоритми-

## ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ С УЛЬТРАНИЗКИМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

зирована и кодирована в качестве библиотеки, для обеспечения возможности запуска на всех трех микроконтроллерах. Метод измерения времени выполнения задачи основан на переключении вывода порта общего назначения микроконтроллера из логического нуля в единицу перед началом выполнения кода задачи и переключении из логической единицы в ноль после выполнения. Таким образом, используя дискретный выход микроконтроллера можно оценить время выполнения задачи математики. Проекты для оценки времени выполнения задачи математики были написаны в средах IAR Embedded Workbench for ARM 6.3 (STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32) и IAR Embedded Workbench for MSP430 5.1 (MSP430F5438IPZ). Потребление при выполнении задачи математики мерялось стендами описанными выше. Для микроконтроллеров STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32 была выбрана тактовая частота 32 МГц от внешнего кварцевого резонатора, а микроконтроллер MSP430F5438IPZ тактировался от 16 МГц также от внешнего кварца. Результаты тестирования времени вычисления тестовой математической задачи микроконтроллерами представлены в таблице 4. Помимо этого в данной таблице приведены значения потребляемого тока микроконтроллерами, при решении данной задачи, а также результирующее значение затраченной энергии как произведение трех множителей времени, тока и напряжения (3,3 В).

Таблица 4 - Таблица времени решения тестовой математической и результирующих энергозатрат микроконтроллерами MSP430F5438IPZ, STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32, при напряжении питания 3,3 В

Микроконтроллер	Время выполнения тестовой математики, мс	Потребление, при решении математической задачи, мА	Результирующее значение затраченной энергии, нВт
MSP430F5438IPZ	8	3,72	26,73
STM32L152VBT6	3	12,38	43,28
EFM32TG840F32	3,2	8	23,43

Из рассмотренной таблицы видно, что наиболее эффективно и с точки зрения времени и с точки зрения затраченной энергии с тестовой математической задачей эффективней других справляется микроконтроллер EFM32TG840F32 фирмы Energy Micro [8].

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что микроконтроллеры MSP430F5438IPZ, STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32 [7], принадлежащие к семействам с ультранизким энергопотреблением MSP430F5 фирмы Texas Instruments, STM32L1 фирмы STMicroelectronics, EFM32TG фирмы Energy Micro, по результатам испытаний соответствуют заявленным в технической документации характеристикам энергопотребления и пригодны для создания медицинских устройств с автономным питанием. По результатам тестирования микроконтроллер EFM32TG840F32 является наиболее эффективным для создания такого рода устройств, как с точки зрения режимов пониженного энергопотребления, так и с точки зрения энергоэффективности и скорости решения математических задач.

Из рассмотренной таблицы видно, что наиболее эффективно и с точки зрения времени и с точки зрения затраченной энергии с тестовой математической задачей эффективней других справляется микроконтроллер EFM32TG840F32 фирмы Energy Micro. Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что микроконтроллеры MSP430F5438IPZ, STM32L152VBT6 и EFM32TG840F32, принадлежащие к семействам с ультранизким энергопотреблением MSP430F5 фирмы Texas Instruments, STM32L1 фирмы STMicroelectronics, EFM32TG фирмы Energy Micro, по результатам испытаний соответствуют заявленным в технической документации характеристикам энергопотребления и пригодны для создания медицинских устройств с автономным питанием. По результатам тестирования микроконтроллер EFM32TG840F32 является наиболее эффективным для создания такого рода устройств, как с точки зрения режимов пониженного энергопотребления, так и с точки зрения энергоэффективности и скорости решения математических задач.

### Выводы

Микроконтроллерные семейства MSP430F5 фирмы Texas Instruments, STM32L1 фирмы STMicroelectronics, EFM32TG фирмы Energy Micro с ультранизким энергопотреблением соответствуют заявленным в технической документации характеристикам потребления тока в активном режиме и режимах пониженного энергопотребления.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой

## РАЗДЕЛ 5. ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта "Создание высокотехнологичного производства по изготовлению мобильного многофункционального аппаратно-программного комплекса длительного кардиомониторирования и эргометрии" по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились во ФГАОУ ВПО ЮФУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синютин, Е.С. Сравнительное исследование новых решений входных каскадов электрофизиологических мониторов [Текст] / Е.С. Синютин // Ползуновский вестник. - 2013 - №. 2 - С. 124 – 128.
2. Черемисов, П. Микроконтроллеры с низким энергопотреблением для телеметрических систем [Электронный ресурс] / П. Черемисов // ООО «Компэл» - Режим доступа: <http://www.compel.ru>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. 16-разрядные микроконтроллеры MSP430™ со сверхнизким энергопотреблением [Электронный ресурс] // Texas Instruments – Режим доступа: <http://www.ti.com/ww/ru/msp430.html>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. рус.
4. STM32 L1 series of ultra-low-power MCUs [Электронный ресурс] // STMicroelectronics - Режим доступа: <http://www.st.com/web/en/catalog/mmc/>

- FM141/SC1169/SS1295, свободный – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. EFM32 Tiny Gecko Microcontroller Family [Электронный ресурс] // Silicon Labs – Режим доступа: <http://www.energymicro.com/products/efm32-tiny-gecko-microcontroller-family>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.
  6. MSP430F543x, MSP430F541x Mixed Signal Microcontroller (Rev. C) [Электронный ресурс] // Texas Instruments – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438.pdf>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.
  7. STM32L15xx6/8/B [Электронный ресурс] // STMicroelectronics - Режим доступа: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00277537.pdf>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.
  8. EFM32TG840 Datasheet [Электронный ресурс] // Energymicro – Режим доступа: [http://cdn.energymicro.com/dl/devices/pdf/d0011\\_efm32tg840\\_datasheet.pdf](http://cdn.energymicro.com/dl/devices/pdf/d0011_efm32tg840_datasheet.pdf), свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.

*Начальник сектора Кириенко В.В тел.: (8634) 311-143, e-mail: [snowball@nxt.ru](mailto:snowball@nxt.ru); начальник сектора Синютин Е.С. тел.: (8634) 311-143, e-mail: [dark\\_elf4@mail.ru](mailto:dark_elf4@mail.ru) - Научно-технический центр "Техноцентр" Южного федерального университета*

УДК 534 (0.45)

## КОНТРОЛЬ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ И ПРИМЕНЕНИИ МНОГОПОЛУВОЛНОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В.Н. Хмелев, С.В. Левин, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок

В статье представлены результаты исследований, показывающих как результаты контроля амплитуды колебаний при помощи созданного способа позволяют совершенствовать ультразвуковые излучатели. На примере исследования многополуволновых излучателей показана возможность повышения эффективности пьезоэлектрических колебательных систем с многополуволновыми излучателями, выполненными в виде стержней переменного диаметра

**Ключевые слова:** ультразвук, ультразвуковой технологический аппарат, пьезоэлектрическая колебательная система

### Актуальность

Ультразвуковые (УЗ) аппараты широко применяются в различных отраслях промышленности, позволяя интенсифицировать технологические процессы [1]. Это стало возможным только благодаря созданию и промышленному применению в составе аппаратов многополуволновых излучателей ультразвуковых колебаний (рисунок 1) [2].

Увеличение поверхности излучения в таких аппаратах обеспечивается за счет соосного и последовательного установления полуволновых по длине волноводов цилиндрической формы переменного диаметра. Поверхности переходов между участками различного диаметра являются поверхностями эффективного излучения УЗ колебаний [3].