- METHODS FOR MEASURING THE POWER CONSUMPTION OF DIGITAL COMPUTING DEVICES (DGD)
- INVESTIGATION OF THE STATIC POWER CONSUMPTION OF DGDS
- INVESTIGATION OF THE DYNAMIC POWER CONSUMPTION OF DGDS
- INVESTIGATION OF ENERGY CONSUMPTION OF MOBILE DEVICES AND ANDROID APPLICATIONS

University of Ioannina

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

PhD

GREENCO
GREEN COMPUTING & COMMUNICATIONS

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МОБИЛЬНЫХ И ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ

Практикум

RESEARCH AND DEVELOPMENT FOR POWER EFFICIENT MOBILE AND EMBEDDED SYSTEMS

2016

European Commission
TEMPUS

Министерство образования и науки Украины
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

О.М. Тарасюк, А.В. Мазуренко, А.В. Горбенко

Исследование и разработка энергоэффективных мобильных и встроенных систем

Research and Development for Power Efficient Mobile and Embedded Systems

Практикум

Под редакцией В.С. Харченко

Проект
GREENCO 530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR
Green Computing & Communications

2016

УДК 004.052
Т19

Викладені матеріали практичної частини навчального курсу «Дослідження та розробка енергоефективних мобільних та вбудованих систем» (Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems), підготовленого для аспірантів в рамках проекту TEMPUS-GREENCO «Green Computing & Communications» (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

Присвячено вивченню методів оцінки та побудови енергоефективних мобільних додатків та вбудованих мікропроцесорних систем. Приводиться навчальна програма курсу, дається опис лабораторних и практичних робіт, методичні рекомендації щодо самостійного вивчення матеріалу курсу.

Призначено для студентів і аспірантів університетів, що навчаються за напрямками комп'ютерних наук, комп'ютерній і програмній інженерії при вивченні підходів до забезпечення енергоефективності вбудованих мікропроцесорних систем та мобільних додатків, а також буде корисно для викладачів відповідних навчальних курсів.

Рецензенты:

− Prof. Alex Yakovlev, Professor, Newcastle University (Newcastle upon Tyne, UK);

− Ass. Prof. Evangelos Evangelou, University of Ioannina (Ioannina, Greece);

− Dr Mario Fusani, Research Associate, ISTI-CNR (Pisa, Italy).

Т19 Тарасюк О.М., Мазуренко А.В., Горбенко А.В. **Исследование и разработка энергоэффективных мобильных и встроенных систем. Практикум** / Под ред. Харченко В.С. – Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2016. – 80 с.

ISBN 978-966-662-710-3

Изложены материалы практической части учебного курса «Исследование и разработка энергоэффективных мобильных и встроенных систем» (Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems), подготовленного для аспирантов в рамках проекта TEMPUS-GREENCO «Green Computing & Communications» (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

Посвящено изучению методов оценки и построения энергоэффективных мобильных приложений и встроенных микропроцессорных систем. Приводится учебная программа курса, дается описание лабораторных и практических работ, методические рекомендации по самостоятельному изучению материала курса.

Предназначено для магистров и аспирантов университетов, обучающихся по направлениям компьютерных наук, компьютерной и программной инженерии при изучении подходов к оценке и обеспечению энергоэффективности встроенных микропроцессорных систем и мобильных приложений, а также может быть полезно для преподавателей, ведущих занятия по соответствующим курсам.

Библ. – 20 наименований, рисунков – 15.

Рекомендовано к изданию ученым советом Национального аэрокосмического университета имени Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» (протокол № 1 от 16 сентября 2015 г.).

УДК 004.052

ISBN 978-966-662-710-3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие является частью учебно-методического обеспечения курса «Исследование и разработка энергоэффективных мобильных и встроенных систем» (Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems), подготовленного для аспирантов в рамках проекта TEMPUS-GREENCO «Green Computing & Communications» (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR), и служит дополнением к лекционному материалу, изложенному в [19, 20].

Курс посвящен изучению современных подходов и технологий построения энергоэффективных мобильных приложений и встроенных микропроцессорных систем, а также методам и средствам анализа, оценивания и экспериментального исследования энергопотребления аппаратных и программных средств.

В пособии приводятся описание лабораторных работ и семинаров, методические рекомендации по самостоятельному изучению материала курса, в приложении дана учебная программа курса. Практическая часть курса включает лабораторные работы и семинарские занятия, посвященные анализу, разработке и исследованию:

– методик и средств измерения потребляемой мощности цифровых вычислительных устройств (лабораторная работа №1);

– факторов, оказывающих влияние на величину статического энергопотребления микропроцессорных систем (лабораторные работы №2);

– энергоэффективности программного обеспечения микропроцессорных систем и факторов, влияющих на величину динамического энергопотребления микропроцессорных систем (лабораторные работы №3);

– методик оценки энергопотребления мобильных приложений (лабораторная работа №4).

Каждая из лабораторных работ включает: цель, учебные, практические и исследовательские задачи; программу подготовки; краткий теоретический материал; программу проведения

разработок и исследований; требования к содержанию отчету; варианты заданий; контрольные вопросы.

Семинарские занятия проводятся по перспективным направлениям развития современных встроенных микропроцессорных систем и мобильных приложений 1) энергоэффективность мобильных приложений в рамках сервис-ориентированной модели взаимодействия; 2) энергоэффективность схем электрического питания и структурной организации цифровых устройств; 3) инструменты исследования и моделирования энергопотребления цифровых систем; 4) управление энергоэффективностью компьютерных систем и др. Описание семинарских занятий включает тему, цель, методические указания по подготовке и проведению.

Пособие предназначено для магистров и аспирантов университетов, обучающихся по направлениям компьютерных наук, компьютерной и программной инженерии при изучении подходов к оценке и обеспечению энергоэффективности встроенных микропроцессорных систем и мобильных приложений, а также может быть полезным для преподавателей, ведущих занятия по соответствующим курсам.

Авторы выражают благодарность рецензентам, коллегам по проекту, кафедрам университетов за ценную информацию, методическую помощь и конструктивные предложения, которые высказывались в процессе обсуждения практической части данного курса.

1 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1.1 Методы измерения энергопотребления цифровых вычислительных устройств

Цель и задачи работы

Цель работы – изучение общих принципов измерения тока и методов применяемых для измерения тока потребления цифровых устройств.

Учебные задачи:

изучение схем измерения тока путем преобразования его в напряжение (шунтовой метод);

изучение принципа измерения тока путем преобразования его в частоту;

изучение принципа измерения тока на основе эффекта Холла.

Практические задачи:

получение навыков моделирования измерительных схем в среде моделирования Proteus.

Исследовательские задачи:

исследование точности измерения тока потребления цифровых устройств методом измерения падения напряжения на шунте;

исследование факторов влияющих на точность шунтового метода измерения тока потребления .

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

ознакомиться с целью и задачами исследования;

изучить теоретический материал, приведенный в учебном пособии;

ознакомиться с принципом моделирования электронных схем в среде Proteus.

Теоретический материал

Энергопотребление цифровых устройств характеризуется мощностью потребляемой устройством ($P_{потр}$). Мощность P в электрической цепи, как известно, представляет собой энергию потребляемую нагрузкой от источника за единицу времени. В цепях постоянного тока потребляемая мощность может быть определена как

$$P_{потр} \quad I_{потр} \; U_{пит} \quad I_{потр} \; R_н^2 \quad U_{пит} \Big/ R_н^2 , \qquad (1)$$

где $I_{потр}$ – ток потребляемый нагрузкой; $U_{пит}$ – напряжение питания нагрузки; $R_н$ – сопротивление нагрузки.

Определение сопротивления нагрузки для цифровых устройств является нетривиальной задачей, кроме того, в разных режимах работы оно может изменяться. Поэтому определение мощности потребляемой цифровыми устройствами базируется на одновременном измерении напряжения питания и силы тока, протекающего через электрическую цепь [1]. Причем для анализа энергопотребления цифровых устройств чаще всего важно не среднее за некоторый интервал времени, а мгновенное значение потребляемой мощности:

$$P_{потр}(t) \quad I_{потр}(t) \; U_{пит}(t). \qquad (2)$$

Измерение напряжения цифровыми методами основано на аналогово-цифровом преобразовании (АЦП). Вторая задача (измерение тока), также является достаточно распространенной в различных приложениях электроники.

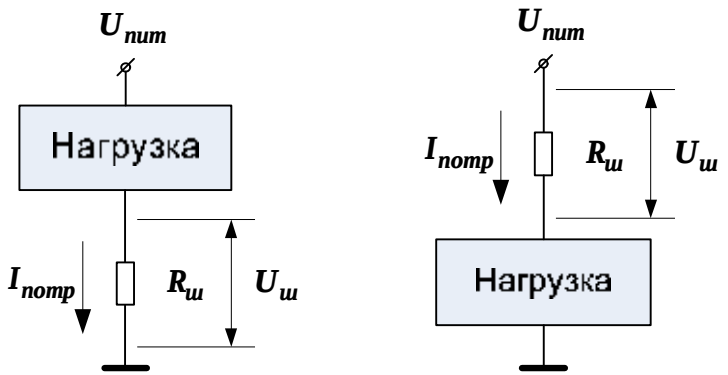
Обычно в цифровых системах она решается путем преобразования тока в одну из измеряемых физических величин – напряжение, временной интервал или частоту, или измерения напряженности магнитного поля, которое создает протекающий в цепи ток (например, с использованием эффекта Холла).

Измерение тока путем преобразования в напряжение. Один из наиболее распространенных способов измерения тока в электрической цепи – это измерение падения напряжения на

токоизмерительном резисторе (шунте) с известным сопротивлением, включенном последовательно с нагрузкой:

$$I_{потр} \quad U_ш / R_ш . \qquad (3)$$

Здесь возможны две схемы включения шунта – в нижнем или верхнем «плече» (отрицательном или положительном полюсе) нагрузки (рис. 1).



а) б)

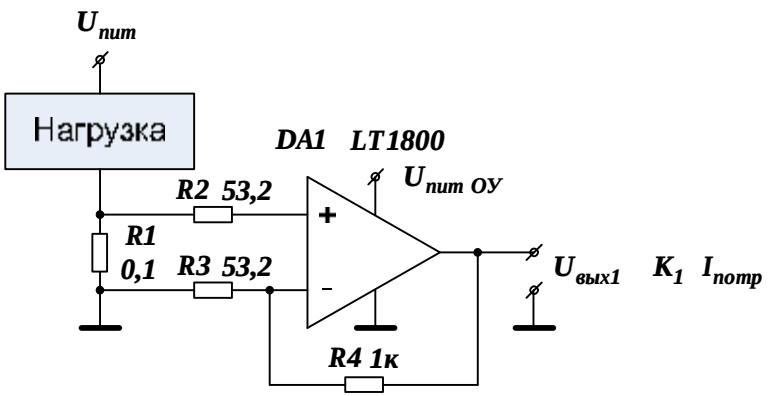
Рис. 1. Схемы включения шунта для измерения тока в нагрузке:
а) – в нижнем «плече»; б) – в верхнем «плече»

Чтобы сопротивление шунта оказывало минимальное воздействие на режим работы нагрузки, оно выбирается минимально возможной величины. Но при уменьшении сопротивления уменьшается и напряжение на нем. Это приводит к необходимости усиления и измерения слабых сигналов.

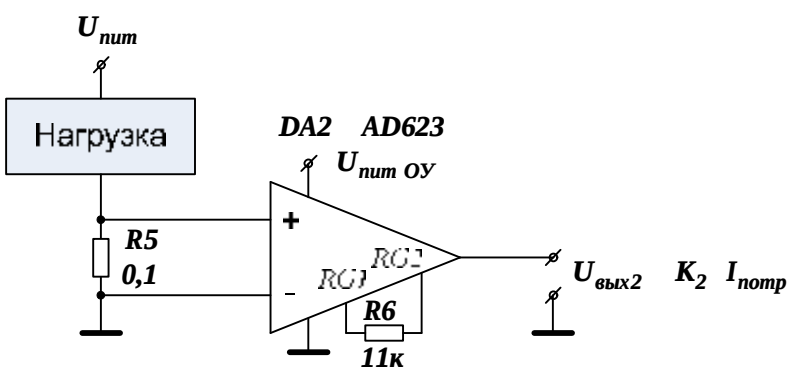
Измерение тока в отрицательном полюсе нагрузки не представляет особой сложности. Схемы усиления напряжения на шунте могут быть построены как с применением обычных операционных, так и инструментальных усилителей в зависимости от требуемой точности и необходимого быстродействия схемы. Для этой цели подходит множество операционных усилителей, предназначенных для работы с однополярным питанием с

входным синфазным напряжением, включающим потенциал общей шины, а также многие из инструментальных усилителей.

На рис. 2 представлены примеры схем измерения тока в отрицательном полюсе.



а)



б)

Рис. 2. Схемы измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки: а) – схема на ОУ (***K₁ = 2 В/А***); б) – схема на инструментальном усилителе (***K₂ = 1 В/А***)

В начале шкалы неизбежна значительная погрешность преобразования, вызванная ненулевым значением минимального выходного напряжения усилителя, что для большинства практических применений несущественно. Для исключения этого недостатка требуется либо двухполярное питание усилителя, либо смещение уровня выходного сигнала с помощью опорного напряжения.

Схемы измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки имеют следующие достоинства:

– низкое входное синфазное напряжение;

– входной и выходной сигнал имеют общую «землю»;

– простота реализации с одним источником питания.

В качестве недостатков можно выделить такие:

– нагрузка не имеет непосредственной связи с «землей»;

– возможность выхода из строя измерительной схемы при коротком замыкании в нагрузке.

Достоинством ***схем измерения тока в положительном полюсе нагрузки*** (рис. 3, 4) является то, что нагрузка заземлена, и возможно обнаружение короткого замыкание в нагрузке.

К недостаткам относится высокое синфазное входное напряжение усилителей, а также необходимость смещения выходного сигнала до уровня, приемлемого для последующей обработки в системе (привязка к «земле»).

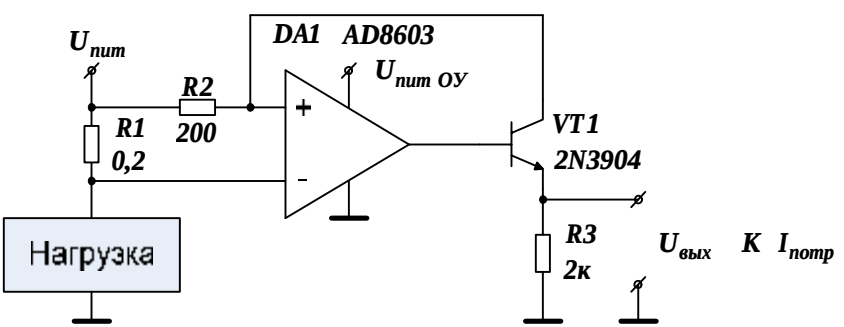


Рис .3. Схема измерения тока в положительном полюсе нагрузки на ОУ (***K = 2 В/А***)

Напряжение питания схемы ($U_{пит}$) не может превышать максимально допустимого напряжения питания усилителя ($U_{пит\ ОУ\ max}$). Но для некоторых операционных усилителей (так называемые Over-The-Top ОУ, например, ***LT1636, LT1637, LT1672*** и др.) допустимое входное синфазное напряжение может превышать максимально допустимое напряжение питания. В этом случае $U_{пит}$ может значительно превышать $U_{пит\ ОУ}$.

Для измерения тока в положительном полюсе нагрузки с малой погрешностью подходят также инструментальные усилители. На рис. 4 показана схема с применением инструментального усилителя ***LTC6800***. Напряжение питания схемы не может превышать максимально допустимого напряжения питания усилителя (***5,5В***).

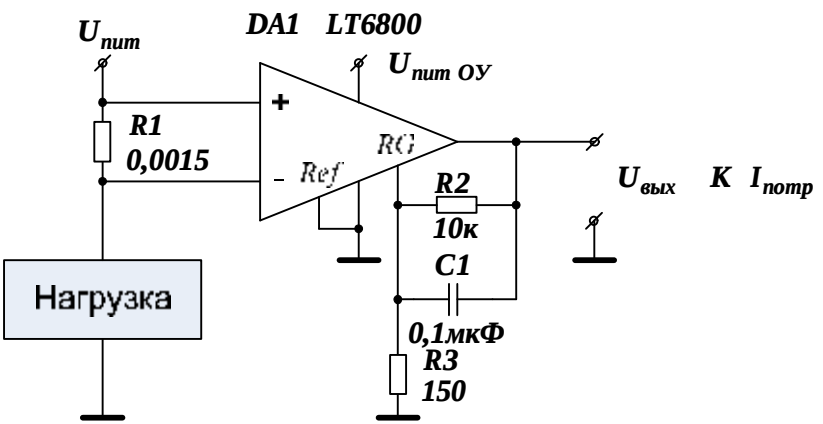


Рис. 4. Схема измерения тока в положительном полюсе нагрузки на инструментальном усилителе (***K = 100 мВ/А***)

Интеграция практически всех необходимых элементов схемы в одном кристалле привела к созданию специализированных микросхем – мониторов тока. Как правило, эти микросхемы не обеспечивают точности измерения, достижимой с использованием прецизионных усилителей и используются только для контроля тока [2].

Измерение тока с преобразованием в частоту импульсов. При необходимости измерять токи потребления в широком диапазоне их изменения, метод шунтов применять не практично, потому что при больших токах сопротивление шунта должно быть маленьким, иначе падение напряжения на нем будет влиять на работу нагрузки.

В то же время при измерении малых токов сопротивление шунта нужно увеличивать, иначе падение напряжения на нем будет недостаточным для точного измерения. Это приводит к необходимости использовать коммутацию шунтов разных сопротивлений, но трудно учитываемое влияние сопротивления коммутирующего устройства в свою очередь может приводить к дополнительной погрешности измерения.

Для решения задачи измерения токов потребления цифровых устройств в широком диапазоне значений с высокой точностью, которая часто встречается во встроенных системах (например, в микропроцессорных системах, которые могут работать в обычном штатном режиме, когда токи потребления могут составлять десятки миллиампер и одном из режимов энергосбережения с токами порядка десятых долей микроампер) может использоваться преобразование (зависимость) тока потребления нагрузки от частоты или скважности управляющих импульсов.

Группа разработчиков компании Texas Instruments предложила измерительную схему (рис. 5), в которой для измерения тока потребляемого нагрузкой используется подсчет импульсов (их мгновенной частоты) управления импульсного блока питания [3].

В предложенной измерительной схеме рабочая энергия для питания нагрузки подается небольшими, последовательно подсчитываемыми дискретными порциями – «квантами». Ключевым элементом является импульсный преобразователь, обычно состоящий из ключевого транзистора (***VT***1), индуктивности (***L***1), диода (***VD***1) и накопительного конденсатора (***C***2), как это показано на рис. 5. Схема питается от стабилизированного источника напряжения питания, к выходу которого подключен конденсатор ***C***1.

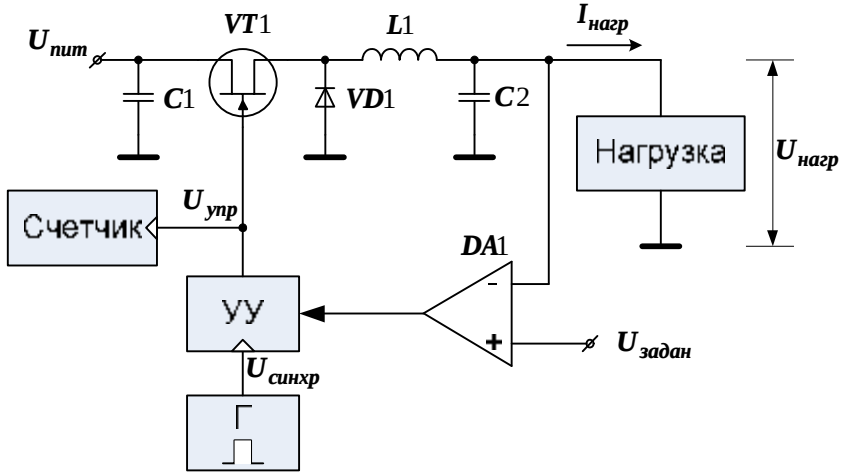


Рис. 5. Схема измерения тока по мгновенной частоте импульсов управления импульсного вторичного источника питания

Импульсный преобразователь работает не в обычном режиме, когда рабочая частота фиксирована, а изменяется скважность импульса. Вместо этого зафиксировано время включенного состояния ***VT***1.

Управление открыванием\закрыванием ключевого транзистора осуществляет управляющее устройство, работа которого синхронизируется задающим генератором (Г).

Для контроля выходного напряжения ($U_{нагр}$) усилитель ошибки DA1 сравнивает текущее значение с заданным ($U_{задан}$). При снижении выходного напряжения ниже некоторого порогового уровня, ключевой транзистор, по фронту следующего синхроимпульса, включается управляющим устройством на определенный фиксированный отрезок времени, равный одному или более периодов сигнала частоты задающего генератора ($U_{синхр}$). При открытом транзисторе ***VT***1 индуктивность ***L***1 накапливает энергию от источника питания и после его закрывания, отдает ее в ***C***2. Тем самым повышая выходное напряжение.

Частота задающего генератора и номиналы компонентов выбираются таким образом, чтобы энергия, накопленная в индуктивности во время открытого состояния ***VT***1, была небольшой по сравнению с энергией, запасенной в конденсаторах ***C***1 и ***C***2. На величины напряжений на конденсаторах это оказывает минимальное влияние. Из-за того, что ток из ***C***2 течет в нагрузку постоянно, выходное напряжение на ***C***2 будет уменьшаться до тех пор, пока усилитель ошибки после нескольких синхроимпульсов не определит, что напряжение слишком мало. После этого транзистор опять будет включен на фиксированное время, и вся последовательность повторится.

Таким образом, время выключенного состояния транзистора (и частота переключения) будут зависеть от потребления нагрузки. В каждом цикле с входа на выход будет передаваться одно и тоже количество энергии. При увеличении тока нагрузки ($I_{нагр}$) будет, соответственно, возрастать число циклов накопления энергии в секунду (рис. 6). Иными словами, частота $U_{упр}$ окажется пропорциональной току нагрузки.

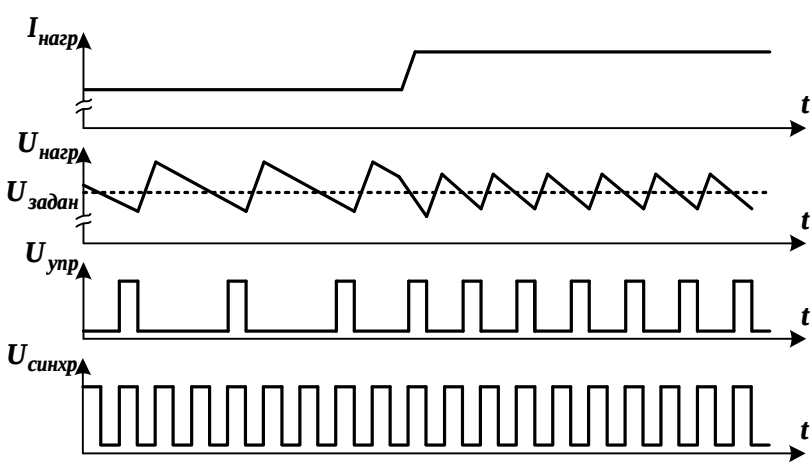


Рис. 6. Эпюры напряжений в схеме измерения тока по мгновенной частоте импульсов управления

Число импульсов, подсчитанных счетчиком в течение определенного интервала времени, соответствует количеству энергии (или силе тока, если разделить эту величину на время измерения и выходное напряжение).

Сравнение напряжения на выходе блока питания с опорным, управление и подсчет импульсов могут быть реализованы в одном устройстве – например, в микроконтроллере с встроенным аналоговым компаратором, цифро-аналоговым преобразователем и, минимум, одним таймером\счетчиком.

Практические эксперименты показали, что предложенный подход обеспечивает измерения в диапазоне нескольких порядков, демонстрируя высокую линейность при токах свыше 100 нА.

Следует отметить, что число импульсов, возникающих на определенном интервале времени, уменьшается с падением тока потребления. Поэтому для получения требуемой точности интервал измерения частоты должен быть сделан достаточно большим. Для устранения этого недостатка можно вместо частоты измерять расстояние между импульсами, затрачивая на измерения меньше времени при очень низких частотах.

Измерение тока с использованием эффекта Холла. Этот способ преобразования тока в напряжение часто используется в технике измерения больших значений токов потребления. Эффект Холла (см. рис. 7.) заключается в появлении поперечного напряжения ($\boldsymbol{U_{Холла}}$) в проводнике расположенном в магнитном поле, через который протекает ток.

Различают две основные схемы датчиков тока на основе эффекта Холла – с разомкнутым (рис. 8) и замкнутым (рис. 9) контуром.

Датчики тока с разомкнутым контуром работают по схеме прямого усиления. Они позволяют измерять постоянный и переменный ток с любой формой сигнала. Такие приборы конструируются для работы с электрическими токами от единиц до сотен тысяч ампер. Точность измерения составляет единицы процентов. Датчики прямого усиления обладают относительно невысокой стоимостью и небольшими массо-габаритными параметрами.

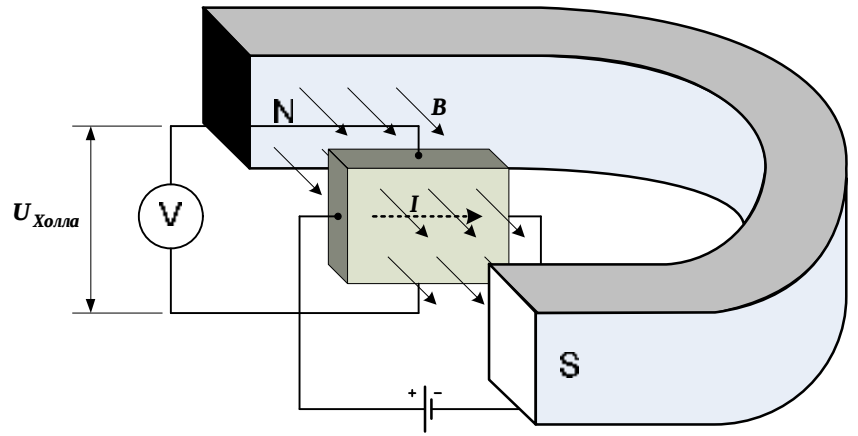


Рис. 7. Эффект Холла

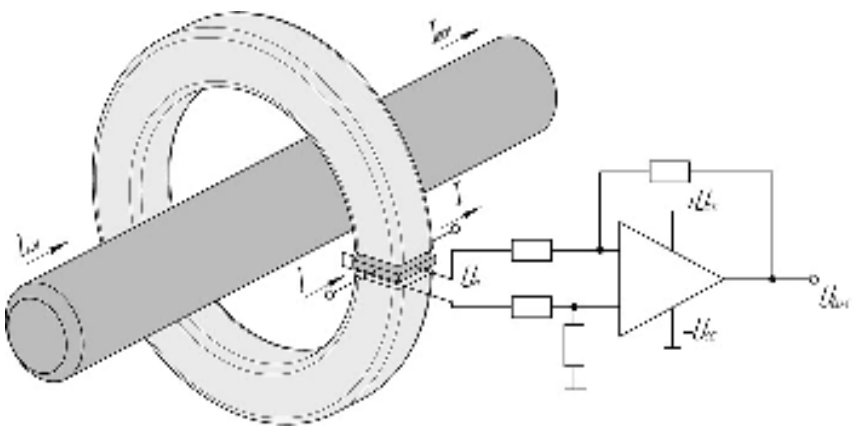


Рис. 8. Схема датчика тока на эффекте Холла
с разомкнутым контуром

Датчики тока с замкнутым контуром имеют полную (100%-ную) обратную связь. Они также называются датчиками с нулевым потоком или компенсационными датчиками, т.к. имеют

встроенную компенсационную цепь. Диапазон измеряемых токов для такой системы от единиц до десятков тысяч ампер. Это может быть постоянный ток и переменный ток с любой формы сигнала.

Точность измерения – десятые доли процента. Датчики тока на эффекте Холла с замкнутым контуром обладают отличной точностью, прекрасной линейностью, очень широким частотным диапазоном, очень хорошим быстродействием, хорошей помехоустойчивостью. Компенсационные датчики без повреждений выдерживают токовые перегрузки.

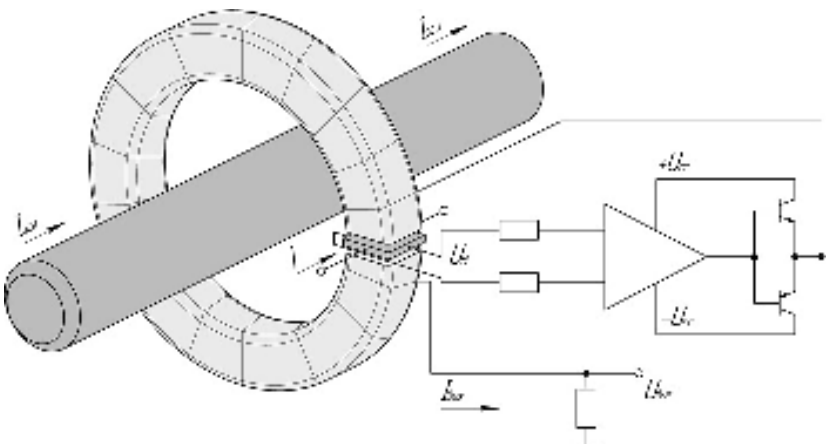


Рис. 9. Схема датчика тока на эффекте Холла с замкнутым контуром

Следует отметить, что использование эффекта Холла затруднительно для измерений токов потребления малых значений, которые обычно имеют место во встроенных системах.

Программа разработок и исследований

В лабораторной работе необходимо исследовать различные схемы измерения тока.

В качестве инструмента для разработки и моделирования электрических схем использовать инструментальное средство Proteus, HSPICE, PSPICE или другое (см. рис. 5).

Для практической реализации измерительных схем и подтверждения их работоспособности целесообразно использовать макетные платы.

Этапы выполнения работы

1. В среде Proteus построить схему измерения тока на ОУ (рис. 10). Установить напряжение питания схемы +5В.

2. Выполнить моделирование схемы и записать результаты показаний амперметра и вольтметра при трех значениях эквивалентного сопротивления нагрузки ($R_{нагр.экв.}$ $R1$): $R_{нагр.экв.}1$ $10\,Ом$, $R_{нагр.экв.}2$ $100\,Ом$, $R_{нагр.экв.}3$ $1\,кОм$.

3. Построить зависимость напряжения на выходе измерительной схемы от тока потребления нагрузки. Определить коэффициенты (k и b) линейной аппроксимации этой зависимости.

4. Изменить сопротивление шунта ($R2$) в схеме (рис. 10): установить значение $R2$ $0{,}11\,Ом$. Повторить выполнение п.2. Определить значения относительной погрешность измерения тока в зависимости от нестабильности сопротивления шунта.

5. Выполнить практическую реализацию схему измерения на макетной плате. Сравнить результаты моделирования измерительной схемы в среде Proteus или HSPICE с результатами, полученными на практике.

6. Исследовать схемотехнические решения для реализации методов измерения тока на основе его преобразования в частоту импульсов, а также при использовании датчиков Холла.

7. Оценить точность каждого из рассмотренных методов измерения тока.

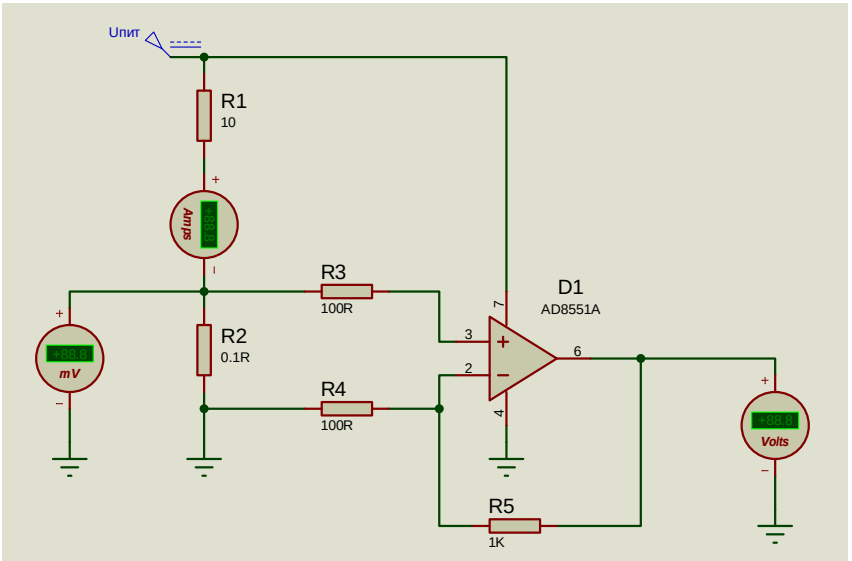


Рис. 10. Модель схемы измерения тока в среде Proteus

Требования к содержанию отчета

Отчет должен включать:

цели и программу проведения исследований;

модели схемы в среде Proteus или HSPICE для каждого из экспериментов;

расчеты и результаты экспериментов;

выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что является основной характеристикой энергопотребления цифровых устройств?
2. Что такое потребляемая мощность?
3. Перечислите основные методы измерения тока.
4. Перечислите основные достоинства и недостатки схем измерения тока потребления в верхнем и нижнем плечах нагрузки.

5. Каким образом характеристики АЦП влияют на точность измерения потребляемой мощности?

6. Объясните принцип измерения тока потребления нагрузки путем его преобразования в частоту.

7. Приведите примеры практической реализации схемы измерения тока по мгновенной частоте импульсов управления.

8. В чём заключается эффект Холла? Поясните физику процесса измерения тока на основе использования эффекта Холла.

9. Почему метод измерения тока с использованием эффекта Холла редко применяется для измерения потребления встроенных систем?

10. Перечислите инструменты разработки и моделирования электрических принципиальных схем с использованием аналоговых и цифровых элементов.

1.2 Исследование статического энергопотребления цифровых вычислительных устройств

Цель и задачи работы

Цель работы – изучение энергопотребления микропроцессорных устройств (МПУ) в статическом режиме и исследование факторов влияющих на него.

Учебные задачи:

изучение статического энергопотребления МПУ.

Практические задачи:

получение навыков программирования в среде IAR Embedded Workbench for ARM;

получение навыков программирования микроконтроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3 и практической работы с отладочной платой DVK_103_DB;

получение навыков измерения статического энергопотребления цифровых вычислительных устройств.

Исследовательские задачи:

исследование изменения общего энергопотребления цифровых устройств в зависимости от задействованных периферийных узлов, а также от уровня питающего напряжения.

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

ознакомиться с целью и задачами исследования;

изучить теоретический материал, приведенный в учебном пособии;

ознакомиться с техническим описанием лабораторной установки и отладочной платой DVK_103_DB;

изучить характеристики микроконтроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3;

ознакомиться с принципами работы программной среды IAR Embedded Workbench for ARM.

Теоретический материал

Энергопотребление цифровых вычислительных устройств. Мощность, потребляемую элементарным узлом цифрового устройства можно разделить на два основных вида – статически потребляемую мощность (static power consumption) и динамически потребляемую мощность (dynamic power consumption) [4]:

$$P_{потр} \quad P_{стат} \quad P_{динам}. \tag{1}$$

Статически потребляемая мощность ($P_{стат}$) включает в себя мощность потерь из-за наличия токов утечки (leakage current) и мощность потребления в режиме ожидания из-за так называемых токов простоя (standby current) [5].

Применительно к цифровым вычислительным устройствам (ЦВУ) статически потребляемую энергию можно рассматривать как систематическую составляющую энергопотребления ЦВУ (энергию потребляемую в режиме простоя). Она зависит от количества и типа задействованных узлов цифровых устройств, их энергопотребления в режиме ожидания. Например, для цифровых вычислительных устройств она зависит от используемых периферийных устройств (интерфейсов, различного рода аналого-цифровых преобразователей, таймеров и т.д.). Безусловно, статическая потребляемая энергия зависит от архитектуры ЦВУ (от способа тактирования узлов, способа выполнения команд процессора, типа реализованного конвейера вычислений, типа доступа к ЗУ и т.д.).

Архитектура микроконтроллеров ARM. Одной из наиболее продвинутых архитектур ЦВУ применяемых во встроенных системах в настоящее время является архитектура ARM (Advanced RISC Machine – усовершенствованная RISC-машина или по-другому Acorn RISC Machine – RISC-машина компании Acorn) – семейство лицензируемых 32-битных и 64-битных микропроцессорных ядер разработки компании ARM Limited. Среди лицензиатов практически все наиболее известные производители ЦВУ для широкого круга задач.

Отличительной чертой ЦВУ с архитектурой ARM является отсутствие микрокода, фиксированная длина команд, ***предикация*** –

возможность условного исполнения команд, отдельные шины для обмена с периферийными устройствами, работающими на разных частотах тактирования и матричный коммутатор шин осуществляющий их взаимодействие. Особенности ARM-архитектуры определяют высокое быстродействие и значительно меньшее энергопотребление процессоров на ее основе по сравнению с другими архитектурами.

Одним из представителей ARM-архитектуры является процессорное ядро серии Cortex. Фактически, под общей торговой маркой Cortex можно увидеть три типа процессоров (профилей), обозначаемых буквами A, R, M. Задачей профиля A стало достижение большой вычислительной мощности. Изделия с этой маркировкой – Cortex-A, представляют собой классические микропроцессоры, являющиеся дальнейшей эволюцией разработок ARM. Профиль R нацелен на исполнения задач в реальном времени. Основной задачей профиля M заявлена простота и низкая стоимость. Технически Cortex-M представляют сильно упрощенные варианты старших моделей. Тем не менее, даже такие «урезанные» контроллеры обладают вычислительной мощностью, значительно превышающей многие аналоги.

В профиль Cortex-M в настоящее время входит четыре основных ядра: Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4, Cortex-M7.

Микроконтроллеры, использующие ядро Cortex-M0, позиционируются производителями в качестве замены 8-ми разрядных моделей. Их отличительной особенностью стала предельно низкая стоимость и малое энергопотребление, при сохранении многих возможностей архитектуры ARM.

По своей структуре ядро Cortex-M0 – это конфигурируемый мультистадийный 32-разрядный RISC процессор, основанный на архитектуре. Благодаря использованию современных технологий проектирования, количество транзисторов, из которых построено данное ядро, составляет примерно 12 тысяч. Такое количество обеспечило низкое энергопотребление и невысокую стоимость. Для сравнения процессор i8086 имел 32 тысячи транзисторов при намного меньших возможностях. Энергопотребление процессора M0, в зависимости от исполнения и решаемых задач, колеблется от 73 до 4мкВт/МГц.

Процессорное ядро Cortex-M3 стало наиболее популярным вариантом архитектуры ARM у производителей и разработчиков микроконтроллеров. Структурно, это также мультистадийный RISC процессор, но в отличие от M0, данное ядро основано на архитектуре ARMv7-M. Из особенностей следует упомянуть аппаратное умножение 32-разрядных чисел за 1 цикл, а также аппаратное деление 32-разрядных чисел (от 2 до 12 циклов). Производительность процессора составляет 1.25DMIPS/МГц. Энергопотребление примерно в два раза выше, чем у ядра M0. Cortex-M3, в отличие от классической ARMv7, выполнен по Гарвардской архитектуре и поддерживает несколько периферийных шин. Это позволяет оптимизировать энергопотребление в зависимости от решаемых задач.

Ядро Cortex-M4, кроме аппаратной реализации операций умножения и деления, дополнительно оснащено DSP-инструкциями. Наличие последних существенно ускоряет обработку потоковых данных, что в свою очередь делает M4 весьма привлекательным для использования в системах управления и обработки информации.

Отличительной особенностью Cortex-M7 является наличие кэша и почти в два раза большая производительность чем у Cortex-M3 и Cortex-M4. Производительность процессора составляет 2.14DMIPS/МГц. Cortex-M7 как и Cortex-M4 опционально оборудован модулем выполнения операций над числами с плавающей точкой.

Описание лабораторной установки. Исследование энергопотребления микропроцессорных устройств выполним с помощью лабораторной установки на основе отладочной платы DVK_103_DB. В ее состав входит микроконтроллер STM32F103RBT6 серии Cortex-M3. Основные технические характеристики исследуемого МК представлены в [6].

Упрощенная функциональная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.

Напряжение питания и программатор могут отключаться от исследуемого микроконтроллера (МК). Программатор\отладчик позволяет записывать программный код в ПЗУ микроконтроллера и выполнять отладку программы по интерфейсу SWD (Serial Wire Debug).

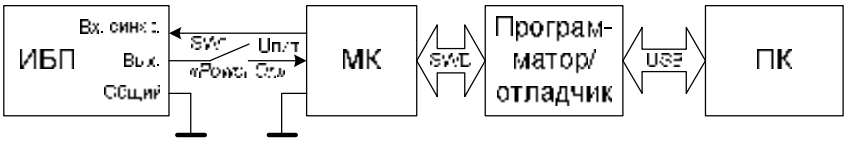


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки для измерения энергопотребления микропроцессорного устройства

Для выполнения отладки в состав МК входит аппаратная часть реализующая SWD. Для устранения влияния SWD на точность измерения энергопотребления МК в процессе работы, программатор должен быть отключен от исследуемого МК.

Особенностью работы микропроцессорных устройств является наличие «бесконечного» цикла выполнения программы.

То есть программа должна содержать программный цикл выполняющийся постоянно (из которого нет выхода вне зависимости от программных условий) или должна предполагать такую логику работы, которая содержит замкнутый цикл ее выполнения. Иначе МПУ будет периодически перезагружаться и заново начинать выполнение программы, а это при исследовании энергопотребления будет приводить к резким скачкам в его измерениях и их несоответствии реальной картине потребления МПУ. Поэтому при исследовании статического энергопотребления сначала проводится измерение энергопотребления МПУ в режиме выполнения холостого (пустого) «бесконечного» цикла программы, которое учитывается в последующих экспериментах.

Измерительный блок питания. Для запитки и измерения мощности, отдаваемой в нагрузку, в лабораторной работе используется измерительный блок питания (ИБП), структурная схема которого представлена на рис. 2.

Проведение научных исследований и поддержка образовательного процесса в области создания энергоэффективных цифровых устройств требует наличия специализированной измерительной техники.

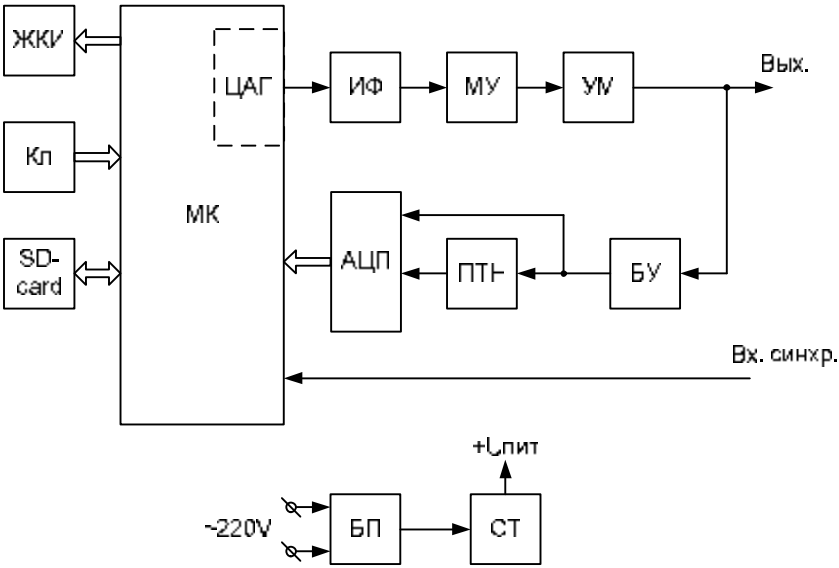


Рис. 2. Структурная схема измерительного блока питания:
ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; Кл – клавиатура;
SD-card – карта памяти; СТ – стабилизатор напряжения;
БП – блок питания; ИФ – интерполирующий фильтр;
МУ – масштабирующий усилитель; УМ – усилитель мощности;
БУ – буферный усилитель; ПТН – преобразователь тока в
напряжение; Вх. синхр. – вход синхронизации.

Например, исследование влияния нестабильности питающего напряжения на надежность работы цифровых устройств и компонентов, в частности, ПЛИС, микроконтроллеров, оперативных запоминающих устройств, невозможно без использования программируемых источником энергии.

Другой актуальной задачей является прецизионное измерение потребляемой мощности с возможностью сохранения и последующего анализа результатов измерения.

Существующие на рынке измерительной и генераторной техники устройства (генераторы напряжений, осциллографы, цифровые мультиметры и т.п.) не в полной мере отвечают предъявляемым требованиям к точности, быстродействию,

динамической программируемой настройке, возможности преобразования результатов измерений в цифровой формат и их сохранения на компактных носителях информации. В связи с этим в рамках выполнения проекта Tempus GreenCo была решена задача создания программируемого источника питания со встроенным цифровым измерителем потребляемой мощности (тока и напряжения).

Разработанное устройство представляет собой переносной прибор с питанием от сети переменного тока общего пользования для работы в лабораторных условиях. Устройство позволяет генерировать сигналы заданных форм на выходах трех аналоговых каналов: два независимых канала и один канал генерации аддитивной смеси сигналов независимых каналов.

Форма и параметры сигналов для каждого из независимых каналов задаются с помощью клавиатуры и отображаются на жидкокристаллическом индикаторе.

Генератор может использоваться в качестве управляемого блока питания с возможностью установки уровня выходного напряжения, а также формирования аддитивной смеси постоянного напряжения с одним из генерируемых сигналов. Форма и характеристики генерируемых сигналов устанавливаются с помощью органов управления и индикации.

Встроенный модуль оценки потребляемой мощности обеспечивает измерение тока и напряжения с программируемой частотой дискретизации, а также позволяет управлять началом и окончанием процесса измерения, устанавливать временные метки и сохранять полученные результаты в виде файла на съемной SD-карточке для последующего анализа и обработки.

Измерение тока выполняется в положительном полюсе подключения нагрузки (high-side current sensing), т.е. по падению напряжения на резисторе, включенном между источником питания и нагрузкой (см. рис. 3).

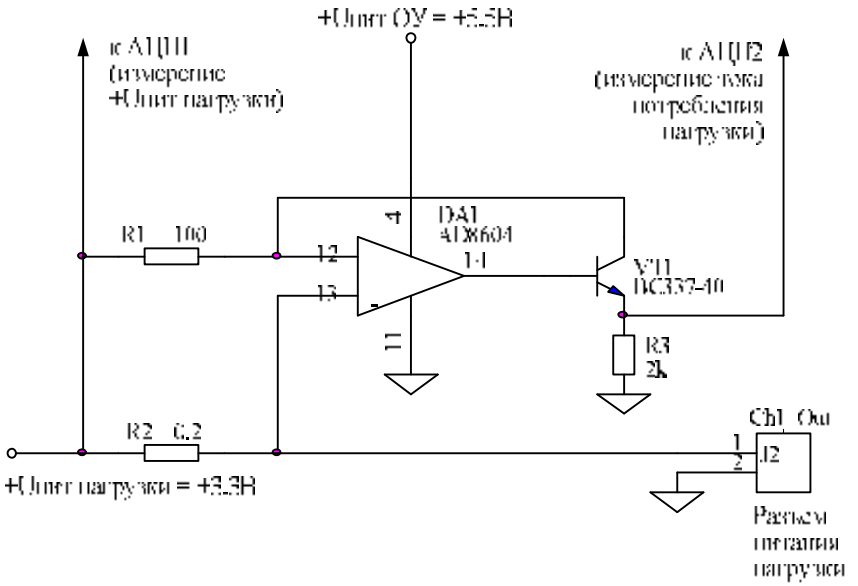


Рис. 3. Используемая схема измерителя напряжения питания и тока потребления нагрузки

Основные технические характеристики ИБП:

1) напряжение питания: ~220В±22В;

2) формы генерируемых сигналов (генерируемые сигналы формируются программным способом, поэтому при необходимости формы и параметры генерируемых сигналов могут быть изменены путем изменения программного обеспечения):

– постоянное напряжение;

– непрерывный гармонический сигнал;

– прямоугольные периодические импульсы;

– пилообразные периодические импульсы;

– шумоподобный сигнал с нормальным законом распределения;

– шумоподобный сигнал с равномерным законом распределения;

3) количество каналов генерации:

– независимых каналов одновременной генерации: 2;

– каналов генерации аддитивной смеси сигналов: 1;

4) параметры сигналов по каждому из независимых каналов генерации задаются дискретно в диапазонах:

– амплитуда (или среднеквадратическое отклонение): 0…5 В с дискретностью 0,1 В;

– смещение (или математическое ожидание): -2,5 В …+2,5 В с дискретностью 0,1 В;

– частота: 1 Гц…100 кГц с дискретностью 1 Гц;

– скважность импульсов: 15%…85% с дискретностью 5%;

5) точность установки и поддержания параметров сигналов: ±5%;

6) максимальная частота дискретизации при измерении тока и напряжения: 10 кГц;

7) погрешность измерения:

– тока: 15 мкА;

– напряжения: 0,1 мВ.

Внешний вид измерительного блока питания представлен на рис. 4.

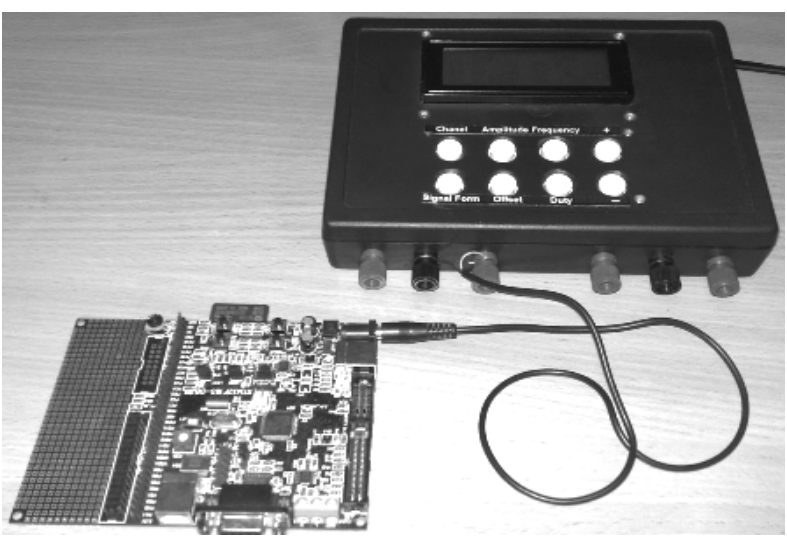


Рис. 4. Подключение измерительного блока питания к отладочной плате DVK_103_DB

Программа разработок и исследований

В лабораторной работе необходимо исследовать статическое энергопотребление микропроцессорных устройств на примере контроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3. Также необходимо оценить зависимость энергопотребления от задействованных периферийных узлов и уровня питающего напряжения.

В качестве среды для проведения исследований предлагается использовать отладочную плату DVK_103_DB с размещённым на ней микроконтроллером STM32F103RBT6 серии Cortex-M3.

В качестве интегрированной среды для разработки и отладки программного кода предлагается использовать IAR Embedded Workbench for ARM.

Программа исследований включает в себя задачи:

– измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении холостого «бесконечного» цикла;

– измерение энергопотребления микроконтроллера при использовании периферийных узлов;

– измерение энергопотребления микроконтроллера при уменьшении напряжения питания;

– измерение энергопотребления микроконтроллера при уменьшении тактовой частоты.

Этапы выполнения работы

Подготовка исследовательской среды

1. Запустить программную среду IAR Embedded Workbench for ARM. Загрузить рабочее пространство (WorkSpace) проекта CortexM3_PowerConsuption_Reserch.

2. Включить исследовательскую установку. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = +3,3 В;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

Измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении холостого «бесконечного» цикла. Для решения указанной задачи в главной пользовательской функции программы создать цикл языка C\C++ типа ***while(1)***.

1. Выполнить компиляцию проекта и загрузку в память микроконтроллера.

2. После загрузки программного кода выключить питание целевой платы и отключить программатор.

3. Повторно включить питание целевой платы. Нажать клавишу «S» на панели управления измерительного блока питания, должна начаться запись изменения напряжения питания и тока потребления. На экране индикатора блока питания появится надпись "Save". Файлу записи на SD-карте памяти при этом будет автоматически присвоено имя – «MeasData_i.mpu» (где i – номер файла записи). (Внимание! Для упрощения поиска нужных файлов на SD-карте рекомендуется перед каждым новым исследованием старые файлы архивировать на ПК и удалять с SD-карты памяти).

4. По истечению 10 сек (время записи можно фиксировать приблизительно с помощью секундомера) повторно нажать клавишу «S». При этом запись будет завершена, о чем свидетельствует исчезновение на индикаторе блока питания надписи "Save". Далее перейти к выполнению следующего пункта исследования.

Измерение энергопотребления микроконтроллера при использовании периферийных узлов. Для решения указанной задачи в начале главной пользовательской функции программы вызвать функцию конфигурирования и активации цифровых линий ввода\вывода общего назначения (***void GPIO_configuration(void)***). Повторно выполнить пп.3-6.

1. В начале главной пользовательской функции программы вместо функции конфигурирования выводов порта МК вызвать функцию конфигурирования и активации таймера счетчика 1 (***void TIM1_configuration(void)***). Повторно выполнить пп.3-6.

2. В начале главной пользовательской функции программы вместо функции конфигурирования таймера\счетчика вызвать функцию конфигурирования и активации АЦП МК (***void ADC1_configuration(void)***). Повторно выполнить пп.3-6.

3. Загрузить файлы записей с SD-карты памяти на ПК. В среде Matlab выполнить считывание файлов в массивы и обработку результатов измерений. Заполнить таблицу вида:

Измеренная характеристика	Активированный периферийный узел			
	АЛУ (холостой цикл)	Порт ввода\ вывода	Таймер\ счетчик	АЦП
Средний потребляемый ток, ***I*** [мА]				
Среднее напряжение, ***U*** [В]				
Средняя потребляемая мощность, ***P*** [мВт]				

Измерение энергопотребления микроконтроллера при уменьшении напряжения питания.

1. Включить исследовательскую установку. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = **+2,0 В**;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

2. Повторно выполнить измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении холостого «бесконечного» цикла, а также при использовании периферийных узлов.

3. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = **+1,8 В**;

– дисперсия – Var = 0 В2.

4. Повторно выполнить измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении холостого «бесконечного» цикла, а также при использовании периферийных узлов.

Измерение энергопотребления микроконтроллера при уменьшении тактовой частоты.

1. Включить исследовательскую установку. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = +3,3 В;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$;

– с помощью функции SetSysClockToxx(), где xx – значение тактовой частоты в МГц программно установить одно из значений тактовой частоты МК: 1) 24 МГц; 2) 36 МГц, 3) 48 МГц; 4) 72 МГц.

2. Выполнить измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении холостого «бесконечного» цикла, а также при использовании периферийных узлов при разных установленных значениях тактовой частоты микроконтроллера.

Требования к содержанию отчета

Отчет должен включать:

цели и программу проведения исследований;

схему проведения экспериментов;

расчеты и результаты экспериментов;

выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. На какие основные виды делиться мощность, потребляемая цифровым вычислительным устройством?

2. Что такое статическая потребляемая мощность?

3. От чего зависит уровень статической потребляемой мощности?

4. Как по результатам экспериментов вычислить среднюю мощность, статически потребляемую только портом ввода\вывода?

5. Почему при уменьшении напряжения питания уменьшается потребляемая мощность?

6. Каким образом связаны между собой тактовая частота и уровень питающего напряжения?

7. До какого уровня можно снизить напряжение питания МК STM32F103RB и почему?

8. Перечислите периферийные узлы микроконтроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3. Какие из них, по результатам измерений, являются наибольшими потребителями электроэнергии в статическом режиме?

9. Назовите основные характеристики микроконтроллеров с архитектурой ARM. Каковы основные преимущества данной архитектуры?

10. Перечислите основные характеристики процессорных ядер Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4, Cortex-M7. Сравните их между собой.

1.3 Исследование динамического энергопотребления цифровых вычислительных устройств

Цель и задачи работы

Цель работы – изучение энергопотребления микропроцессорных устройств в динамическом режиме и исследование факторов влияющих на него.

Учебные задачи:

изучение факторов определяющих динамическое энергопотребления МПУ.

Практические задачи:

получение навыков программирования в среде IAR Embedded Workbench for ARM;

получение навыков программирования микроконтроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3 и практической работы с отладочной платой DVK_103_DB;

получение навыков измерения динамического энергопотребления цифровых вычислительных устройств.

Исследовательские задачи:

исследование общего энергопотребления МПУ при выполнении основных арифметических операций;

исследование влияния тактовой частоты на динамическое энергопотребления МПУ;

исследование влияния напряжения питания на динамическое энергопотребления цифровых устройств.

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

ознакомиться с целью и задачами исследования;

изучить теоретический материал, приведенный в учебном пособии;

ознакомиться с техническим описанием лабораторной установки;

ознакомиться с принципами работы программной среды IAR Embedded Workbench for ARM.

Теоретический материал

Как было отмечено ранее, мощность, потребляемую цифровым устройством, можно разделить на две составляющие: статическую и динамическую.

Термин динамически потребляемая мощность (dynamic power consumption) относится к сумме мощностей потребления уходящей на заряд\разряд паразитных емкостей и токи короткого замыкания (short-circuit current) при переключении состояний цифрового узла [5]. Мощность потребляемая из-за наличия токов короткого замыкания (к.з.) в момент переключения выхода для инвертора пропорциональна времени нарастания\спада сигнала, сопротивлению нагрузки и размерам транзисторов вентиля.

Максимальные токи к.з. – при отсутствии нагрузки и уменьшаются с увеличением последней. Для аппроксимации мощности потребления из-за токов к.з. могут использоваться различные зависимости [8-10], отличающиеся точностью расчета. Но если размеры вентиля выбраны таким образом что время нарастания и спада на входе и выходе примерно одинаковы, то потребление за счет токов к.з. составляет не выше примерно 15% от динамической потребляемой мощности [8] и им можно пренебречь.

Поэтому можно сказать, что динамически потребляемая мощность в основном определяется потерями на заряд\разряд емкостей и зависит от частоты переключения (f) узлов цифровых устройств, размаха переключаемого напряжения (напряжения питания), паразитной емкости узла (C) и в общем виде определяется [7]:

$$P_{динам} \quad C \; U_{пит}^2 \quad f \; . \qquad (1)$$

Или с учетом переключательной активности ( ) и суммарной внутренней емкости цифрового узла ($C_{вн}$) и нагрузки ($C_{нагр}$):

$$P_{динам} \quad 0{,}5 \quad U_{пит}^2 \quad f \quad (C_{внутр} \quad C_{нагр}) \; . \qquad (2)$$

Переключательная активность узла ( ) – это среднее количество переходов выхода узла за период тактовой частоты

($1/f$). Произведение f равное количеству переходов узла за секунду еще называют плотностью переходов [11].

Следует отметить, что определение переключательной активности даже для простого цифрового узла представляет собой нетривиальную задачу. Потому что, например, даже для 16-разрядного умножителя она может отличаться 5-кратно [5].

Очевидно, что снижение энергопотребления возможно при уменьшении плотности переходов (за счет уменьшения переключательной активности), внутренней емкости (за счет уменьшения размеров узла), или напряжения питания цифрового устройства. Однако, уменьшение плотности переходов очень часто может означать уменьшение быстродействия цифрового устройства.

Уменьшение напряжения питания, которое судя по соотношениям (1), (2) может быть более эффективным путем снижения потребляемой мощности, может приводить к увеличению задержек и вероятности ошибок в устройстве. То есть существует компромисс между задержкой, быстродействием и уменьшением динамически потребляемой мощности в устройстве [12].

Одним из путей повышения энергоэффективности цифровых устройств может быть использование узлов с разными уровнями напряжения питания в составе цифрового устройства [13].

Общая динамически потребляемая мощность цифрового устройства определяется как сумма мощностей потребляемых каждым задействованным узлом устройства в динамическом режиме. Как правило, ЦВУ содержат некоторую избыточную часть аппаратной реализации, которая может не использоваться при решении текущей вычислительной задачи (не все узлы ЦВУ задействованы одновременно). Поэтому суммарная динамически мощность потребляемая цифровым устройством может быть определена с использованием соотношения:

$$P_{динам} \quad 0{,}5\ U_{пит}^2 \quad f \quad \sum_i K_{исп_i} \quad _i \ (C_{внутр_i} \quad C_{нагр_i}), \qquad (3)$$

где $K_{исп_i}$ – коэффициент использования для i-го узла цифрового устройства.

Для МК серии STM32 с учетом особенностей их архитектуры, также можно записать:

$$P_{динам\ STM32} \quad 0{,}5\ U^2_{пит} \quad \sum_i f_i\ K_{исп_i}\ _i\ C_i\ , \qquad (4)$$

где f_i – тактовая частота i-го периферийного узла микроконтроллера.

Получить оценку динамически потребляемой мощности расчётным путем затруднительно в силу сложности расчета коэффициента переключательной активности, невозможности расчёта паразитной емкости каждого из периферийных узлов, статистического характера коэффициента их использования.

Поэтому такая оценка будет получена опытным путем с помощью измерений с использованием исследовательской установки описанной выше (см. раздел 1.2).

Первая задача исследований – получение оценки энергии потребляемой МК динамически при выполнении основных арифметических операций.

В процессе исследования для повышения точности результатов измерений исследуемые операции выполняются в цикле, а результат усредняется. При этом для инициации начала и сигнализации об окончании записи перед и после выполнения цикла МК должен вырабатывать на входе синхронизации измерительного БП сигнал стробирования. Для этого используется один из выводов общего назначения (GPIO) микроконтроллера, что требует тактирования (включение) всего порта МК, а это может вносить погрешность в результат измерения, поскольку логическая схема порта ввода\вывода МК начинает при этом потреблять некоторую энергию, которую следует учесть при проведении исследований.

Энергию, потребляемую портом ввода\вывода можно отнести к систематической составляющей потребления. О ее определении упоминалось выше (см. раздел 1.2).

Программа разработок и исследований

В лабораторной работе необходимо исследовать динамическое энергопотребление микропроцессорных устройств на примере контроллера STM32F103RBT6 серии Cortex-M3. Также необходимо оценить зависимость энергопотребления от уровня питающего напряжения и тактовой частоты микроконтроллера.

В качестве среды для проведения исследований предлагается использовать отладочную плату DVK_103_DB с размещённым на ней микроконтроллером STM32F103RBT6 серии Cortex-M3.

В качестве интегрированной среды для разработки и отладки программного кода предлагается использовать IAR Embedded Workbench for ARM.

Программа исследований включает в себя задачи:

– измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении программного цикла для разных значений тактовой частоты;

– измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении арифметических операций для разных значений тактовой частоты;

– измерение динамического энергопотребления микроконтроллера при уменьшенном напряжения питания.

Выполнение лабораторной работы

1. Запустить программную среду IAR Embedded Workbench for ARM. Загрузить рабочее пространство проекта CortexM3_PowerConsuption_Reserch.

2. Включить исследовательскую установку. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = +3,3 В;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

Измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении программного цикла для разных значений тактовой частоты.

3. В главной пользовательской функции программы создать цикл языка C\C++ типа for с количеством итераций $N=10^7$.

4. С помощью функции SetSysClockToxx(), где xx – значение тактовой частоты в МГц установить одно из значений тактовой частоты МК: 1) 24 МГц; 2) 36 МГц, 3) 48 МГц; 4) 72 МГц.

5. Выполнить компиляцию проекта и загрузку в память микроконтроллера. После загрузки программного кода выключить питание целевой платы и отключить программатор.

6. Повторно включить питание целевой платы. Должна автоматически начаться запись напряжения питания и тока потребления. На экране индикатора измерительного блока питания появится надпись "Save". Файлу записи на SD-карте памяти при этом будет автоматически присвоено имя – «MeasData_i.mpu» (где i – номер файла записи). После окончания записи, о чем свидетельствует исчезновение на индикаторе блока питания надписи "Save", перейти к выполнению следующего пункта исследования.

7. Повторно выполнить пп.4-6 для каждого из указанных в п.4 значений тактовой частоты.

8. Загрузить файлы записей с SD-карты памяти на ПК. В среде Matlab выполнить считывание файлов в массивы и обработку результатов измерений. Заполнить таблицу вида:

Измеренная характеристика	Тактовая частота: [МГц]			
	24	36	48	72
Абсолютное время выполнения, ***t*** [с]				
Относительное время выполнения (относительно времени выполнения на максимальной (f_{max}) частоте)				1
Средний потребляемый ток, ***I*** [мА]				
Среднее напряжение, ***U*** [В]				
Средняя потребляемая мощность, ***P*** [мВт]				
Относительная потребляемая мощность (относительно потребляемой мощности на максимальной (f_{max}) частоте)				1
Средняя потребляемая энергия, ***E*** [мДж]				
Относительное энергопотребление (относительно энергопотребления на максимальной (f_{max}) частоте)				1

Измерение энергопотребления микроконтроллера при выполнении арифметических операций для разных значений тактовой частоты.

9. В главной пользовательской функции программы в теле цикла разместить программный код, включающий одну из арифметических операций: суммирование, вычитание, умножение, деление, вычисление остатка деления, для одного из типов операндов: целочисленного однобайтного (char), целочисленного двухбайтного (integer), целочисленного четырехбайтного (long integer), вещественного с плавающей запятой (float). Предварительно в программе нужно определить тип операндов и результата!

Например:

```
char fresult, foperand1=100, foperand2 = -10;

  for (u32 i=0; i<(1e7); i++)
  {
    fresult = foperand1 + foperand2;
  }
```

10.В среде IAR Embedded Workbench в режиме программной симуляции (Simulator) поочередно выполнить все указанные операции, для всех типов операндов, и определить количество тактов выполнения программного цикла для каждого эксперимента.

11.Повторно выполнить пп.4-6, 9 для каждого из указанных в п.4 значений тактовой частоты для всех указанных в п.9 операций и типов операндов.

12.Загрузить файлы записей с SD-карты памяти на ПК. В среде Matlab выполнить считывание файлов в массивы и обработку результатов измерений. Для каждой операции и каждого типа операндов заполнить таблицу вида:

Измеренная характеристика	Тактовая частота: [МГц]			
	24	36	48	72
Арифметическая операция:				
Тип и значения операндов:				
Общее кол-во тактов				
Абсолютное время выполнения, ***t*** [с]				
Относительное время выполнения (относительно времени выполнения на максимальной (f_{max}) частоте)				1
Средний потребляемый ток, ***I*** [мА]				
Среднее напряжение, ***U*** [В]				
Средняя потребляемая мощность, ***P*** [мВт]				
Относительная потребляемая мощность (относительно потребляемой мощности на максимальной (f_{max}) частоте)				1
Средняя потребляемая энергия, ***E*** [мДж]				
Энергопотребление на одну операцию, ***E***0 [мДж/оп.]				
Относительное энергопотребление (относительно энергопотребления на максимальной (f_{max}) частоте)				1

При вычислении потребляемой мощности и энергии для выполнения операции следует из общей потребляемой мощности и энергии вычесть мощность и энергию потребляемые МК для выполнения операций программного цикла, а также мощность и статическое энергопотребление порта ввода\вывода, с помощью которого формируется сигнал синхронизации для ИБП!

Измерение динамического энергопотребления микроконтроллера при уменьшенном напряжения питания.

13.Включить исследовательскую установку. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = **+2,0 В**;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

14.Повторно выполнить пп. 4-9, 11, 12 исследований.

15.. На измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) – Mean = **+1,8 В**;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

16.Повторно выполнить пп. 4-9, 11, 12 исследований.

Требования к содержанию отчета

Отчет должен включать:

цели и программу проведения исследований;

схему проведения экспериментов;

расчеты и результаты экспериментов;

выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое динамически потребляемая мощность цифрового вычислительного устройства?

2. Какие существуют пути снижения динамически потребляемой мощности цифровых вычислительных устройств?

3. Объясните, почему уменьшение напряжения питания может быть более эффективным путем снижения динамической потребляемой мощности, чем изменение других факторов влияющих на нее?

4. Реализация какой арифметики (целочисленной или с плавающей запятой) более выгодна во встроенных системах на основе МК серии STM32 с точки зрения энергоэффективности? Почему? Какие при этом возможны ограничения?

5. При реализация какой арифметики (целочисленной или с плавающей запятой) снижение тактовой частоты работы МК серии STM32 дает больший выигрыш по энергопотреблению при одинаковом снижении быстродействия операций?

6. Каким образом связаны между собой тактовая частота работы микропроцессора и уровень питающего напряжения?

7. Каковы отличия RISC и CISC архитектур микропроцессоров? Каким образом эти отличия будут влиять на энергопотребление при выполнении арифметических операций?

8. Зависит ли энергопотребление и продолжительность выполнения арифметических операций с плавающей точкой от значения операндов для микроконтроллеров ARM?

9. Существенно ли отличается энергопотребление микроконтроллеров ARM при выполнении различных арифметических операций (+, -, /, *) с целочисленными операндами?

10. Насколько отличается энергопотребление микроконтроллеров ARM при выполнении различных арифметических операций (+, -, /, *) с целочисленными операндами и с операндами с плавающей точкой?

1.4 Исследование энергопотребления мобильных устройств и приложений на платформе Android

Цель и задачи работы

Цель работы – исследование энергопотребления мобильных устройств (смартфонов, планшетов) и приложений для платформы Android.

Учебные задачи:

изучение моделей и методов программной оценки энергопотребления различных приложений и служб.

Практические задачи:

получение навыков работы с утилитой оценки энергопотребления PowerTutor для платформы Android;

получение навыков написания пользовательских приложений для платформы Android;

получение навыков измерения энергопотребления мобильных устройств (смартфонов, планшетов) и приложений.

Исследовательские задачи:

исследование энергопотребления основных арифметических операций;

исследование энергопотребления основных аппаратных компонентов мобильных устройств (экрана, модулей беспроводной связи, навигации, и др.).

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

ознакомиться с целью и задачами исследования;

изучить теоретический материал, приведенный в учебном пособии;

ознакомиться с техническим описанием лабораторной установки;

ознакомиться с принципами работы утилиты оценки энергопотребления PowerTutor для платформы Android;

получить начальные навыки разработки приложений для платформы Android.

Теоретический материал

Утилита измерения энергопотребления PowerTutor для платформы Android. Одной из наиболее популярных утилит для мониторинга энергопотребления мобильных устройств и приложений, работающих на платформе Android, является PowerTutor [14], разработанная в университете Мичигана при содействии корпорации Google (см. рис. 1).

С помощью этого инструмента разработчики мобильного программного обеспечения могут оценить, как внесение изменений в код приложения отражается на энергетической эффективности устройства. Пользователи мобильных устройств на основании отображаемых утилитой данных могут выработать оптимальный режим работы, позволяющий продлить срок службы батареи, а также выявить наиболее энергоемкие приложения.

Рис. 1. Утилита Power Tutor

Power Tutor отображает статистику энергопотребления основных системных компонентов мобильного устройства (процессор, OLED или LCD экран, модули GPS, Wi-Fi, 3G (GPRS), Audio). Также имеется возможность выполнить мониторинг количества энергии, потребляемого системными процессами и прикладными приложениями, работающими на мобильном устройстве.

Программа отображает графики и статистическую информацию энергопотребления с использованием следующих показателей:

– мгновенная мощность в мВт;

– средняя мощность потребления энергии за выбранный период времени (по умолчанию 5 минут) и с начала работы профайлера;

– потребленную энергию в джоулях (единица измерения энергии, равная 1 ватту умноженному на 1 секунду, которую также можно перевести в миллиамперчасы).

Полученные с помощью утилиты данные можно использовать для прогнозирования времени работы устройства.

Если измеренную мощность разделить на напряжение питания аккумуляторной батареи, то будет получен ток потребления, например, 600 мВт/4 В=150 мА. Допустим, аккумуляторная батарея имеет емкость 1500 мАч, тогда при таком токе ее полного заряда хватит на 10 часов работы мобильного устройства.

Модель энергопотребления мобильных устройств и компонентов. Необходимость разработки и использования модели энергопотребления обусловлена тем, что мобильные устройства, как правило, имеют единый измеритель потребляемой устройством мощности. Как следствие, возникает проблема оценки вклада каждого аппаратного модуля и работающего программного компонента в общее энергопотребление устройства.

Работа утилиты Power Tutor основана на использовании моделей энергопотребления основных аппаратных модулей мобильного устройства (процессор, OLED или LCD экран, модули GPS, Wi-Fi, 3G (GPRS), Audio). Эти модели были получены в результате экспериментального измерения с помощью внешних измерительных приборов и последующей статистической

обработки данных потребления электроэнергии мобильными устройствами (разработчиками были использованы смартфоны HTC G1, HTC G2 и Nexus) в разных режимах работы с отключенными и работающими аппаратными модулями [15, 16].

Используемая модель энергопотребления мобильного устройства учитывает следующие особенности работы аппаратных модулей:

1) загрузка процессора и его тактовая частота;

2) уровень яркости LCD экрана; для OLED экранов дополнительно используется информация о цвете каждого пикселя;

3) скорость передачи модуля Wi-Fi и объем передаваемой информации в секунду;

4) состояние модуля 3G (включен, выключен) и объем передаваемой информации в секунду;

5) состояние модуля GPS (включен, выключен, в состоянии сна), а также количество спутников, которые используются для определения местоположения;

6) состояние аудиоустройства (включено, выключено).

Утилита Power Tutor определяет какие аппаратные модули используются каждым из запущенных приложений и на основании этого прогнозируют энергопотребление каждого приложения. Минимальная периодичность измерения энергопотребления (чтение информации из монитора состояния аккумуляторной батареи) равна одной секунде.

Очевидно, что получаемая оценка является весьма приблизительной. Более того, само приложение Power Tutor в режиме измерения потребляет до 30-40% энергии от общего энергопотребления.

Несмотря на то, что Power Tutor используется некоторыми авторами для проведения научных исследований, например [17, 18], достоверность результатов использования утилиты может вызывать сомнения. В связи с этим актуальной задачей остаётся дальнейшее совершенствование моделей энергопотребления устройств, при использовании единого измерителя используемой электроэнергии.

Подключение измерительного блока. При подключении ИБП для питания и измерения энергопотребления мобильного устройства вместо съемного аккумулятора необходимо учитывать следующие особенности.

Как правило, аккумуляторные батареи смартфонов имеют три контакта для подключения (-, земля и +). Крайние разъемы соответствуют «-» и «+».

Средний контакт – это вывод термодиода, подключённого другим выводом к контакту «-». Термодиод служит для контроля температуры аккумулятора во время зарядки. Некоторые производители мобильных устройств защищаются от подделки аккумуляторной батарей путём контроля сопротивления этого термодиода. Таким образом, для правильного подключения ИБП к смартфону вместо аккумуляторной батареи необходимо соблюдать полярность, а также подключить подобрать резистор для подключения к среднему выводу, номинал которого соответствует сопротивлению термодиода аккумулятора.

Приспособление для подключения ИБП к смартфону можно изготовить самостоятельно по аналогии с https://www.youtube.com/watch?v=Ao14aiO1qwY.

Кроме того, ИБП может быть подключен к смартфону вместе с аккумуляторной батареёй в режиме измерения.

Программа разработок и исследований

В лабораторной работе необходимо исследовать энергопотребление энергопотребления мобильных устройств, отдельных аппаратных модулей (экран, GSM, GPRS, 3G, Wi-Fi, BlueTooth, GPS, и др.), а также программных приложений для платформы Android.

В качестве платформы для проведения исследований может быть использовано любое мобильное устройство с ОС Android (смартфон, планшет).

В качестве измерительных инструментов предполагается совместное применение программной утилита PowerTutor, разработанной для платформы Android, и измерительного блока питания, описание которого представлено в разделе 1.2.

Программа исследований включает в себя задачи:

– получение оценки энергопотребления мобильных устройств Android при выполнении основных арифметических операций; в процессе исследования для повышения точности результатов измерений исследуемые операции выполняются в цикле, а результат усредняется;

– оценка энергопотребления отдельных аппаратных компонентов мобильных устройств (экрана, модулей беспроводной связи, навигации, и др.) на платформе Android.

Выполнение лабораторной работы

1. Разработайте пользовательскую программу или набор программ для ОС Android, в которой реализуйте в цикле for с количеством итераций $N=10^7$ выполнение различных арифметических операций с целочисленными операндами и операндами с плавающей точкой.

2.

Например:

```
char fresult, foperand1=100, foperand2 = -10;

  for (u32 i=0; i<(1e7); i++)
  {
    fresult = foperand1 + foperand2;
  }
```

3. Загрузите программы на смартфон и убедитесь в их работоспособности.

4. Подключите ИБП к смартфону, как описано в теоретической части лабораторной работы. Если ИБП используется одновременно и для измерения энергопотребления и для питания смартфона вместо аккумуляторной батареи, на измерительном блоке питания задать параметры напряжения питания целевой платы:

– форма сигнала (Signal Form) = DC+noise (– постоянное напряжение + шум);

– смещение (среднее значение) установите равным напряжению, измеренному на клеммах аккумуляторной батареи смартфона;

– дисперсия – Var = 0 $В^2$.

5. Отключите на смартфоне все модули передачи данных и навигации, выгрузите неиспользуемые программные компоненты и службы, установите минимальную яркость экрана и уровень громкости динамиков.

6. Выполните измерение «статической» потребляемой смартфоном энергии.

7. Для выполнения всех измерений используйте поочередно программу PowerTutor и ИБП.

Измерение энергопотребления аппаратных компонентов мобильных устройств.

8. Выполните измерение энергопотребления смартфона во время включения того или иного модуля, выполнения загрузки или передачи данных, изменения яркости экрана, громкости медиаплеера, выполнения звонка.

9. После выполнения измерений верните настройки телефона в первоначальное состояние.

10. Результаты измерений сохраните на SD-карте памяти для последующего анализа.

11. Загрузить файлы записей с SD-карты памяти на ПК. В среде Matlab выполнить считывание файлов в массивы и обработку результатов измерений. По результатам измерений с помощью утилиты Power Tutor и ИБП заполните таблицы вида:

Приложение/Режим работы	Потребляемая мощность		
	Экран выключен	Экран включен	
		LCD	AMOLED
Ожидание без соединения с мобильной сетью, все неиспользуемые модули отключены, программы выгружены			
3G (UMTS) – ожидание			
3G (UMTS) – разговор			
3G (UMTS) – загрузка данных			
2G (GSM) – ожидание			
2G (GSM) – разговор			
2G (GSM) – загрузка данных			
Bluetooth – ожидание			
Bluetooth – передача данных			
Точка доступа Wi-Fi – ожидание			
Точка доступа Wi-Fi – передача			
Аудиоплеер			
FM-радио			
Wi-Fi – ожидание			
Wi-Fi – передача			
Фотосъемка – без вспышки			
Фотосъемка – со вспышкой			
Запись видео – без подсветки			
Запись видео – с подсветкой			
Светодиодный фонарь			
GPS – поиск			
Экран – максимальная яркость			
Экран – мАксимальная яркость + инверсия цвета			
Экран – минимальная яркость			
Экран – минимальная яркость + инверсия цвета			
Видеоплеер – максимальная яркость			
Видеоплеер – минимальная яркость			

Измерение энергопотребления мобильного устройства при выполнении арифметических операций.

12. По аналогии с процедурой, описанной в предыдущей лабораторной работе, выполните измерение энергопотребление во время запуска на выполнение той или иной пользовательской программы, реализующей выполнение в цикле определенной арифметической операции с операндами определённого типа.

13.Загрузить файлы записей с SD-карты памяти на ПК. В среде Matlab выполнить считывание файлов в массивы и обработку результатов измерений.

14.По результатам измерений с помощью утилиты Power Tutor и ИБП для каждой операции и каждого типа операндов заполнить таблицу вида:

Измеренная характеристика	Потребляемая мощность	
	PowerTutor	ИБП
Арифметическая операция:		
Тип и значения операндов:		
Абсолютное время выполнения, ***t*** [с]		
Средний потребляемый ток, ***I*** [мА]		
Среднее напряжение, ***U*** [В]		
Средняя потребляемая мощность, ***P*** [мВт]		
Средняя потребляемая энергия, ***E*** [мДж]		
Энергопотребление на одну операцию, ***E***0 [мДж/оп.]		

При вычислении потребляемой мощности и энергии для выполнения операции следует из общей потребляемой мощности и энергии вычесть мощность и энергию потребляемые МК для выполнения операций программного цикла.

Требования к содержанию отчета

Отчет должен включать:

цели и программу проведения исследований;
схему проведения экспериментов;
расчеты и результаты экспериментов;
выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Какой подход используется утилитой Power Tutor для измерения энергопотребления аппаратных модулей и программных компонентов, работающих в многозадачной среде Android? Каковы сложности такой оценки?
2. Каким образом формируется модель энергопотребления, являющаяся основой утилиты Power Tutor?
3. От чего зависит энергопотребление смартфонов и планшетов?
4. Выполните ранжирование аппаратных модулей смартфонов и планшетов по степени потребляемой энергии.
5. Какой способ беспроводной передачи данных является более энергоэффективным: Wi-Fi, GPRS или UMTS? Поясните ответ на примерах.
6. Сравните результаты измерения энергопотребления аппаратных модулей мобильных устройств Android, полученные с помощью утилиты PowerTutor и ИБП.
7. Сравните результаты измерения энергопотребления арифметических операций для мобильных устройств Android, полученные с помощью утилиты PowerTutor и ИБП.
8. Объясните, чем может быть обусловлено отличие в результатах измерений при их повторном выполнении.
9. Существенно ли отличается энергопотребление смартфона при выполнении различных арифметических операций (+, -, /, *) с целочисленными операндами?
10. Насколько отличается энергопотребление смартфона при выполнении различных арифметических операций (+, -, /, *) с целочисленными операндами и с операндами с плавающей точкой?

2 СЕМИНАРЫ

Тематика семинара

В структуре курса предусмотрен семинар на тему: «Методы оценки и способы снижения энергопотребления мобильных и встроенных систем». В ходе семинара выполняется анализ современных и перспективных разработок в области создания энергоэффективных мобильных и встроенных компьютерных систем.

Цель семинара

Приобретение знаний и практических навыков по подготовке и презентации выполненного проекта (реферата, аналитического обзора, разработки) по вопросам современных и перспективных разработок в области создания энергоэффективных мобильных и встроенных компьютерных систем.

Подготовка к семинару

1. ***Получение (определение) темы работы*** (реферата аналитического обзора, разработки) и уточнение задач.

Темы работ могут формироваться обучаемыми самостоятельно и согласовываться с руководителями исходя из ориентировочного перечня:

– энергоэффективность мобильных приложений в рамках сервис-ориентированной модели взаимодействия;

– энергоэффективность схем электрического питания и структурной организации цифровых устройств;

– инструменты исследования и моделирования энергопотребления цифровых систем;

– управление энергоэффективностью компьютерных систем;

– энергоэффективность многоядерных компьютерных систем.

2. ***Разработка плана работ и распределение ответственности между участниками целевой группы.*** План работ может быть представлен в виде диаграммы Ганта, включающей основные мероприятия, сроки и распределение ответственности между участниками целевой группы.

Целевая группа состоит из 3 человек. Примерный ресурс времени на подготовку 9х3=27 часов (+ 15 мин презентации). Распределение ответственности определяют участники группы.

3. ***Поиск информации по теме работы*** (библиотека, Интернет) и ее предварительный анализ.

Англоязычные термины даны для удобства поиска информации в Интернет. Возможно представление реферата и презентации на английском языке, что повысит оценку за семинар. Поиск информации осуществляется по ключевым словам, приведенным в пункте 1.

Методические указания и список рекомендуемой литературы к рефератам выдаются индивидуально (по группам).

4. ***Разработка плана отчета и презентации проекта.*** План отчета (и презентации) включает подготовку следующих разделов:

– введение (актуальность, вызовы практики, краткий анализ состояния вопроса – литературы, цель и основные задачи реферата, структура и характеристика содержания, план работ и распределение ответственности);

– систематизированное изложение основных частей реферата (классификационные схемы, характеристика моделей, методов, средств, технологий по группам, выбор показателей и критериев для оценки, сравнительный анализ);

– выводы (констатация достижения поставленной цели, основные теоретические и практические результаты, их значимость, направления дальнейших работ);

– список литературы;

– приложения.

5. ***Написание отчета.*** Отчет имеет объем 15-20 страниц формата А4 (шрифт 14, интервал полуторный, поля 2 см), включая титульный лист, содержание, основной текст, литература, приложения. Рефераты, подготовленные путем простой компиляции Интернет-материалов, без тщательного структурирования, с некорректной терминологией и без выводов не рассматриваются.

Обязательным приложением к реферату является план работ и распределение ответственности (диаграмма Ганта), презентационные слайды и электронный вариант всех материалов.

6. ***Подготовка презентации.*** Презентация разрабатывается в PowerPoint и соответствует плану реферата (10-15 слайдов) исходя из времени на презентацию – 10 мин.

Презентация должна включать следующие слайды:

– титульный слайд (с указанием темы доклада, автора, даты презентации);

– содержание (структура) доклада;

– актуальность рассматриваемых вопросов, цель и задачи доклада исходя из этого анализа;

– слайды с раскрытием содержания поставленных задач;

– выводы по докладу;

– список использованных источников.

Каждый из слайдов должен содержать колонтитул с указанием темы и авторов доклада.

Содержание слайдов не должно представлять собой части текста из отчета, а включать ключевые слова, рисунки, формулы.

Подача информации может быть динамической.

Защита работы

Защита работы осуществляется на семинаре, занимает 15 мин и включает собственно доклад с презентацией (10 мин) и обсуждение (5 мин).

Оценка работы

Оценка выполненной работы учитывает качество текста отчета (форма и содержание), презентации (содержание и дизайн), собственно доклад (структура, содержание и выводы), полноту, глубину и правильность ответов на вопросы.

Оценка за выполненную работу выставляется каждому обучаемому из группы авторов доклада индивидуально в соответствии с результатами и распределением ответственности.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

3.1 Пояснения к учебной программе

Самостоятельную работу над дисциплиной «Исследование и разработка энергоэффективных мобильных и встроенных систем» следует начинать с изучения учебной программы, которая приведена в Приложении. Эта программа включает следующие элементы.

Объект изучения – энергоэффективные мобильные приложения и встроенные микропроцессорные системы систем.

Предмет изучения – методы, технологии и инструментальные средства создания энергоэффективных мобильных и встроенных систем.

Требования к исходным знаниям и навыкам, которые необходимо иметь перед началом изучения:

– принципы и методы системного анализа;

– базовые знания в области современных микропроцессорных систем;

– знания и практические навыки программирования на языках C++/Java, а также создания мобильных приложений для платформы Android.

Целью дисциплины является изучение современных подходов, методов и средств оценки и обеспечения мобильных и встроенных компьютерных систем.

В результате ее изучения обучаемые должны научиться:

– анализировать и синтезировать информацию;

– задавать и отвечать на поставленные вопросы, мыслить креативно и критически;

– предпринимать исследовательские действия и оценивать получаемые результаты с использованием качественных и количественных показателей;

– формулировать практические решения проблем, эффективно использовать время и доступные ресурсы для достижения целей дисциплины;

– демонстрировать гибкость, адаптируемость, самомотивацию и инициативу, умение выразить свое мнение.

Структура и содержание модулей. Дисциплина включает пять модулей:

– модуль МР4.1 – Methods of energy saving for mobile technologies; в данном модуле рассмотрены проблемы энергозбережения для мобильных устройств, а также выполнен анализ существующих программно-аппаратных средств адаптивного управления энергопотреблением, включая стандарт управления питанием и конфигурацией ACPI; проанализированы современные методы снижения энергопотребления мобильных устройств;

– модуль МР4.2 – Development of intelligent energy monitoring subsystem devices; в данном модуле исследуются вопросы построения аппаратных и программных измерительных средств, позволяющих измерять энергопотребление как отдельных аппаратных модулей, так и программных компонентов мобильных систем; в модуле рассмотрены подходы к измерению энергопотребления и их программно-аппаратные реализации;

– модуль МР4.3 – Adaptive mobile technologies for hybrid systems; данный модуль посвящен вопросам энергоэффективного предоставления Cloud-услуг для мобильных клиентов, аспектам Green-взаимодействия в гибридных Cloud-системах и адаптивного распределения вычислительных ресурсов; в модуле рассмотрены показатели энергоэффективности центров обработки данных и актуальные вопросы построения адаптивных энергоэффективных технологий для гибридных систем.

– модуль МР4.4 – Tools for support of energy saving for mobile devices; в данном модуле проанализированы инструментальные средства энергетического профилирования мобильных приложений и другие методики улучшения их энергоэффективности; рассмотрена проблема реинжиниринга мобильных приложений с целью оптимизации энергопотребления; предложены критерии и ограничения оценки стратегий оптимизации энергопотребления при разработке программного обеспечения для мобильных платформ.

По каждому из модулей предусмотрены лабораторные занятия и семинары и дан список рекомендуемой литературы.

Отчетность по дисциплине включает отчеты по каждой из лабораторных работ и семинарам, а также экзамен, который включает типовые вопросы и задачи.

3.2 Подготовка к занятиям и экзамену

Подготовка к занятиям по дисциплине детально описана в разделах 2 и 3.

При подготовке к лабораторным работам следует обратить внимание на уяснение целей и задач (учебных или теоретических, практических и исследовательских) и знаний, которые нужны для их выполнения. При выполнении разработок и исследований необходимо строго руководствоваться описанием и попытаться найти ответы на вопросы, приведенные в конце каждой работы. Особое внимание следует уделить формулировке выводов по результатам исследований при оформлении отчета.

При подготовке к семинарам важно правильно спланировать свою работу в составе группы проекта, организовать отбор и анализ необходимой литературы, подготовку качественной презентации и подготовку к ответам на возможные вопросы.

Своевременная и основательная подготовка к лабораторным работам – гарантия успешной сдачи экзамена.

Важным элементом изучения дисциплины является формирование полной и корректной системы используемых терминов и ключевых понятий (энергоэффективность, производительность, пропускная способность и т.д.). Целесообразно по каждому из модулей сформировать их множество и установить логические святи между соответствующими понятиями.

Кроме того, следует обратить внимание на вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение, которые приводятся в программе и уточняются преподавателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елизаров, А.С. Электрорадиоизмерения. Учебник для ВУЗов по специальности «Радиотехника» / А.С. Елизаров. – Мн. : Выш. шк., 1986. – 320 с.

2. Пушкарев, М. Микросхемы для измерения тока [Электронный ресурс] / М.Пушкарев // Компоненты и технологии. – 2006. – №10. – Режим доступа: http://www.kit-e.ru/articles/chip/2006_10_116.php

3. Bowers, N. Digitising linear measurement for greater accuracy / N. Bowers [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.electronicspecifier.com/test-and-measurement/digitising-linear-measurement-for-greater-accuracy

4. Nguyen, D. Minimization of Dynamic and Static Power Through Joint Assignment of Threshold Voltages and Sizing Optimization / D.Nguyen, et al. // Int. Symposium on Low Power Electronics and Design : conference proceedings. – Seoul, 2003. – P. 158–163.

5. Pedram, M. Tutorial and survey paper, power minimization in IC design: principles and applications / M. Pedram // ACM Trans. on Design Automation of Electronic Systems. – 1996. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–56.

6. STM32F103x8, STM32F103xB Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU. Datasheet [Электронный ресурс]. – STMicroelectronics, 2015. – 117 p. – Режим доступа : http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00161566.pdf

7. Grover, N. Reduction of Power Consumption in FPGAs – An Overview [Текст] / N. Grover, M.K.Son // Int. Journal on Information Engineering and Electronic Business. – 2012. – Vol. 5. – P. 50–69.

8. Veendrick, H.J.M. Short-circuit dissipation of static CMOS circuitry and its impact on the design of buffer circuits / H.J.M. Veendrick // IEEE Journal of Solid State Circuits. – 1984. – Vol. 19. – P. 468–473.

9. Hedenstierna, N. CMOS circuit speed and buffer optimization / N. Hedenstierna, K. Jeppson // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1987. – Vol. 6(3). – P. 270–281.

10. Turgis, S. Explicit evaluation of short circuit power dissipation for CMOS logic structures / S. Turgis, N. Azemard, D. Auvergne // Int. Symposium on Low Power Design : conference proceedings. – Dana Pt., 1995. – P. 129–134.

11. Najm, F.N. Transition density: A new measure of activity in digital circuits [Текст] / F.N. Najm // IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1993. – Vol. 12(2). – P. 310–323.

12. Banovic, K. Algorithms for Budget Management with Gate-Sizing and Other Low Power Applications / K. Banovic, H. Abdulhamid // IEEE Int. Conference on Electro-Information Technology (EIT 2006): conference proceedings. – Lansing, 2006. – P. 290–294.

13. Srivastava, A. Power minimization using simultaneous gate sizing, dual-Vdd and dual-Vth assignment / A. Srivastava, D. Sylvester, D. Blaauw // Design Automation Conference (DAC'04) : conference proceedings. – San Diego, 2004. – P. 783–787.

14. Power Tutor. A Power Monitor for Android-Based Mobile Platforms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ziyang.eecs.umich.edu/projects/powertutor/index.html

15. Accurate Online Power Estimation and Automatic Battery Behavior Based Power Model Generation for Smartphones / Lide Zhang, B. Tiwana, R. P. Dick, et al. // IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis : conference proceedings. – Scottsdale, 2010. P. 105 – 114.

16. Dong, M. Self-Constructive High-Rate System Energy Modeling for Battery-Powered Mobile Systems / M. Dong, L. Zhong // ACM/USENIX International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'2011) : conference proceedings. – Bethesda, 2011. – P. 335–348.

17. Measuring Power Consumption For Image Processing On Android Smartphone / K. M. Saipullah, A. Anuar, N. Atiqah Ismail,Y. Soo // American Journal of Applied Sciences. – 2012. – No 9 (12). – P. 2052–2057.

18. An analysis of power and performance of applications for mobile devices with Android OS / A. Vieira, D. Debastiani, L. Agostini, F. Marques, J. Mattos // South Symposium on

Microelectronics (SIM) : conference proceedings. – Novo Hamburgo, 2012. – P. 1–4.

19. Зеленая ИТ-инженерия. Т.1: Принципы, модели, компоненты / В. С. Харченко и др.; под ред. В. С. Харченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", 2014. – 629 с.

20. Зеленая ИТ-инженерия. Т. 2 : Системы, индустрия, социум / В. С. Харченко и др.; под ред. В. С. Харченко. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", 2014. – 687 с.19.

АНОТАЦІЯ ТА ЗМІСТ

УДК 004.052

О.М. Тарасюк, О.В. Мазуренко, А.В. Горбенко. **Дослідження та розробка енергоефективних мобільних та вбудованих систем. Практикум /** Під ред. Харченка В.С. – Міністерство освіти та науки України, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2016. – 80 с.

ISBN 978-966-662-710-3

У посібнику викладені матеріали практичної частини навчального курсу «Дослідження та розробка енергоефективних мобільних та вбудованих систем» (Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems), підготовленого для аспірантів в рамках проекту TEMPUS-GREENCO «Green Computing & Communications» (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

Курс присвячений вивченню методів оцінки та побудови енергоефективних мобільних додатків та вбудованих мікропроцесорних систем. Приводиться навчальна програма курсу, дається опис лабораторних и практичних робіт, методичні рекомендації щодо самостійного вивчення матеріалу курсу.

Книга призначена для студентів і аспірантів університетів, що навчаються за напрямками комп'ютерних наук, комп'ютерній і програмній інженерії при вивченні підходів до забезпечення енергоефективності вбудованих мікропроцесорних систем та мобільних додатків, а також буде корисна для викладачів відповідних навчальних курсів.

Бібл. – 20 найменувань, рисунків – 15.

ЗМІСТ

ABSTRACT AND CONTENT

UDC 004.052

Tarasyuk O., Mazurenko A., Gorbenko A. **Research and Development for Power Efficient Mobile and Embedded Systems /** Kharchenko V. (edit.). – Department of Education and Science of Ukraine, National Aerospace University named after N. Zhukovsky "KhAI", 2016. – 80 p.

ISBN 978-966-662-710-3

Practical materials of study course the "Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems" are expounded in this training textbook prepared for PhD-students within the framework of project TEMPUS-GREENCO «Green Computing & Communications» (530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR).

The course focuses on the study of evaluation and development techniques of energy-efficient mobile applications and embedded microprocessor systems. Course curriculum, description of laboratory works, practical trainings and methodical recommendations for self-sufficient study are given.

The book is intended for university master and PhD students learning computer sciences, computer and software engineering, and studying techniques ensuring energy-efficiency of mobile and embedded systems as well as for teachers lecturing respective courses.

Ref. – 19 items, figures – 28, tables – 6.

CONTENT

ПРИЛОЖЕНИЕ. УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА

TEACHING PROGRAM

TITLE OF THE MODULE	Code
Research and Development for Green Mobile and Embedded Systems	**PhD3**

Teacher(s)	Department
Coordinating: Prof. Anatoliy Gorbenko **Others:** Dr. Olga Tarasyuk	Computer Systems and Networks

Study cycle	Level of the module	Type of the module
PhD	B	Full-time tuition

Form of delivery	Duration	Language(s)
Full-time tuition	One semester	English

Prerequisites	
Prerequisites: Computer Systems and System Analysis; Microprocessor systems; Embedded systems development	**Co-requisites (if necessary):**

Credits of the module	Total student workload	Contact hours	Individual work hours
4	108	36	72

Aim of the module (course unit): competences foreseen by the study programme
The aim of module is to create a knowledge base for multidisciplinary research on energy-efficient mobile applications and embedded microprocessor systems. It includes overview of methods, and approaches to measure and evaluate power consumption of embedded microprocessor systems and to develop energy-efficient mobile applications.

Learning outcomes of module (course unit)	Teaching/learning methods	Assessment methods
At the end of course, the successful student will be able to: 1. Choose and implement in practice different techniques of energy saving for mobile applications and embedded computer systems.	Interactive lectures, Learning in laboratories, Just-in-Time Teaching	Module Evaluation Questionnaire
2. Understand different power consumption measurement techniques.	Interactive lectures, Learning in laboratories, Just-in-Time Teaching	Module Evaluation Questionnaire
3. Estimate power-efficiency metrics and identify trade-offs of computing resource distribution in hybrid mobile systems.	Interactive lectures, Learning in laboratories, Just-in-Time Teaching	Module Evaluation Questionnaire
4. Understand energy-saving techniques and optimize energy consumption of software applications for mobile devices.	Interactive lectures, Learning in laboratories, Just-in-Time Teaching	Module Evaluation Questionnaire

Themes	Contact work hours							Time and tasks for individual work	
	Lectures	Consultations	Seminars	Practiacl work	Laboratory work	Placements	**Total contact work**	**Individual work**	**Tasks**
1. Methods of energy saving for mobile technologies 1.1. Problems of energy saving for mobile devices	6				4		**10**	**18**	1.5. Learning standards on power consumption

1.2. SW and HW adaptive power management 1.3. ACPI standard for power and configuration management 1.4. Methods of reducing the power consumption of mobile devices									measurement and management 1.6. Reading research paper on methods of energy saving for mobile technologies
2. Development of intelligent energy monitoring subsystem devices 2.1. Techniques of power consumption measurement 2.2. HW and SW power consumption measurement tools 2.3. Models of power consumption 2.4. Power consumption modelling tools for embedded systems	4				4		**8**	**18**	2.5. Reading research paper on energy measurement and monitoring techniques and tools
3. Adaptive mobile technologies for hybrid systems 3.1. Energy efficiency metrics 3.2. Energy efficiency of data centers 3.3. Cloud-providing energy efficient services for mobile customers 3.4. Trade-off of energy-efficient distribution of computing resources in hybrid systems	4				4		**8**	**18**	3.5. Reading research paper on adaptive mobile technologies for hybrid systems
4. Tools for support of energy saving for mobile devices 4.1. Energy efficiency techniques for mobile software 4.2. Power profiling tools for mobile applications 4.3. Power-efficient re-engineering of mobile applications	4		2		4		**10**	**18**	4.5. Reading research paper on techniques and tools for energy saving for mobile applications and embedded devices

4.4. Energy optimization tasks for SW development for mobile platforms									4.6. Preparation of material for seminars according to individual tasks.
Total	**18**		**2**		**16**		**36**	**72**	

Assessment strategy	Weight in %	Deadlines	Assessment criteria
Lecture activity, including fulfilling special self-tasks	10	7,14	85% – 100% Outstanding work, showing a full grasp of all the questions answered. 70% – 84% Perfect or near perfect answers to a high proportion of the questions answered. There should be a thorough understanding and appreciation of the material. 60% – 69% A very good knowledge of much of the important material, possibly excellent in places, but with a limited account of some significant topics. 50% – 59% There should be a good grasp of several important topics, but with only a limited understanding or ability in places. There may be significant omissions. 45% – 49% Students will show some relevant knowledge of some of the issues involved, but with a good grasp of only a minority of the material. Some topics may be answered well, but others will be either omitted or incorrect. 40% – 44% There should be some work of some merit. There may be a few topics answered partly or there may be scattered or perfunctory knowledge across a larger range.

			20% – 39% There should be substantial deficiencies, or no answers, across large parts of the topics set, but with a little relevant and correct material in places. 0% – 19% Very little or nothing that is correct and relevant.
Learning in laboratories	30	7,14	85% – 100% An outstanding piece of work, superbly organised and presented, excellent achievement of the objectives, evidence of original thought. 70% – 84% Students will show a thorough understanding and appreciation of the material, producing work without significant error or omission. Objectives achieved well. Excellent organization and presentation. 60% – 69% Students will show a clear understanding of the issues involved and the work should be well written and well organized. Good work towards the objectives. The exercise should show evidence that the student has thought about the topic and has not simply reproduced standard solutions or arguments. 50% – 59% The work should show evidence that the student has a reasonable understanding of the basic material. There may be some signs of weakness, but overall the grasp of the topic should be sound. The presentation and organization should be reasonably clear, and the objectives should at least be partially achieved. 45% – 49% Students will show some appreciation of the issues involved. The exercise will indicate a basic

			understanding of the topic, but will not have gone beyond this, and there may well be signs of confusion about more complex material. There should be fair work towards the laboratory work objectives. 40% – 44% There should be some work towards the laboratory work objectives, but significant issues are likely to be neglected, and there will be little or no appreciation of the complexity of the problem. 20% – 39% The work may contain some correct and relevant material, but most issues are neglected or are covered incorrectly. There should be some signs of appreciation of the laboratory work requirements. 0% – 19% Very little or nothing that is correct and relevant and no real appreciation of the laboratory work requirements.
Module Evaluation Quest	60	8,16	The score corresponds to the percentage of correct answers to the test questions

Author	**Year of issue**	**Title**	**No of periodical or volume**	**Place of printing. Printing house or internet link**
Compulsory literature				
В. С. Харченко и др.	2014	Зеленая ИТ-инженерия. Т. 1 : Принципы, модели, компоненты		Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"
В. С. Харченко и др.	2014	Зеленая ИТ-инженерия. Т.2: Системы, индустрия,		Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского

		социум		"ХАИ"
Mahmoud S. S., Ahmad I.	2012	Green Performance Indicators for Energy Aware IT Systems: Survey and Assessment	Vol. 3	Journal of Green Engineering
A. P. Chandrakasan, S. Sheng, R. W. Brodersen	1992	Low-power CMOS digital design	Vol. 27, No 4	IEEE Journal of Solid-State Circuits
Елизаров, А.С.	1986	Электрорадиоизмерения. Учебник для ВУЗов по специальности «Радиотехника»		Мн. : Выш. шк.
Bowers N.	2006	Digitising linear measurement for greater accuracy		http://www.electronicspecifier.com/test-and-measurement/digitising-linear-measurement-for-greater-accuracy
Lide Zhang, B. Tiwana, R. P. Dick, et al.	2010	Accurate Online Power Estimation and Automatic Battery Behavior Based Power Model Generation for Smartphones		IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis
Nguyen D.	2003	Minimization of Dynamic and Static Power Through Joint Assignment of Threshold Voltages and Sizing Optimization		Int. Symposium on Low Power Electronics and Design
Pedram M.	1996	Tutorial and survey paper, power	Vol.1, No.1	ACM Trans. on Design

		minimization in IC design: principles and applications		Automation of Electronic Systems
N. Grover, M.K.Son	2012	Reduction of Power Consumption in FPGAs	Vol.5	Int. Journal on Information Engineering and Electronic Business
Ш. Фараг, Б. Сроур	2015	Повышение эффективности энергопотреблени я для приложений		http://blogs.msdn.com/b/b8_ru/archive/2012/02/15/improving-power-efficiency.aspx
	2014	Energy-Efficient Software Guidelines		http://software.intel.com/ru-ru/articles/partner-energy-efficient-software-guidelines
Е. Бирюков, Д. Василенко	2014	Методы снижения потребления энергии современными портативными устройствами		http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_06/stat_198.htm
Additional literature				
	2014	Снижение энергопотреблени я приложений		http://software.intel.com/ru-ru/articles/conserving-active-power
S. Sinofsky	2012	Повышение эффективности энергопотреблени я для приложений		http://blogs.msdn.com/b/b8_ru/archive/2012/02/15/improving-power-efficiency.aspx

	2015	Energy Usage Instrument		https://developer.apple.com/library/ios/documentation/AnalysisTools/Reference/Instruments_User_Reference/EnergyUsageInstrument/EnergyUsageInstrument.html
M. Dong, L. Zhong	2011	Dong, M. Self-Constructive High-Rate System Energy Modeling for Battery-Powered Mobile Systems		ACM/USENIX International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services
A. Vieira, D. Debastiani, L. Agostini, F. Marques, J. Mattos	2012	An analysis of power and performance of applications for mobile devices with Android OS		South Symposium on Microelectronics

СОДЕРЖАНИЕ

Тарасюк Ольга Михайлівна
Мазуренко Олександр Володимирович
Горбенко Анатолій Вікторович

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МОБІЛЬНИХ ТА ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ

Практикум
(російською мовою)

Редактор Харченко В.С.

Комп'ютерна верстка
Тарасюк О.М.

Зв. план, 2016
Підписаний до друку 26.01.2016
Формат 60x84 1/16. Папір офс. №2. Офс. друк.
Умов. друк. арк. 4,48. Уч.-вид. л. 4,27. Наклад 200 прим.
Замовлення 1. Ціна вільна

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
http://www.khai.edu
Віддруковано ФОП Лисенко І. Б.
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17, моторний корпус, к. 147
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи в державний реєстр видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК №2607 от 11.09.06 р.