

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

Приведена трехуровневая классификация энергосберегающих методов для мобильных компьютерных устройств. Показано, что программно реализованные алгоритмы определяют возможность адаптивного поведения мобильного устройства при выборе режима работы с минимальным потреблением электрической энергии. Приведены примеры существующих энергосберегающих методов, дана библиография по тематике.

**Ключевые слова:** автономная работа, адаптивное управление, аккумуляторная батарея, информационные компьютерные технологии, операционная система, прикладная программа.

### Введение

Современному обществу требуются не просто информационные технологии (ИТ), а мобильные ИТ. Темпы роста продаж настольных и портативных компьютеров перестали расти несколько лет назад, спрос переместился в область мобильных устройств. Многие из современных мобильных компьютерных устройств не уступают по вычислительной мощности стационарным компьютерам и одновременно с этим обладают такими свойствами, как портативность и переносимость. Но эти плюсы влекут за собой ряд довольно значительных проблем: проблема с выводом излишков тепла, образуемого при работе таких компонентов как процессор, видеокарта и др., проблема малого срока работы устройства без подключения к сети электропитания. Обе эти проблемы имеют два взаимодополняющих пути решения – это применение новых технологий для создания аппаратных компонент и внедрение новых подходов к разработке энергосберегающего программного обеспечения (ПО).

Экологичное и эффективное использование энергоресурсов — фундаментальная проблема XXI века, академические и производственные сообщества прилагают значительные усилия для разработки новых решений, позволяющих достигать энергоэффективности в таких областях, как телекоммуникации, создание экологически чистых строений и городов, интеллектуальные энергосистемы и т. д. Среди достаточно эффективных средств минимизации негативных воздействий ИТ выделим программы Energy Star, TCO, стандарт управления питанием и конфигурацией ACPI (Advanced Configuration and Power Interface), стандарт на источники питания – 80 PLUS, сертификацию EPEAT (Electronic Products Environ-

mental Assessment Tool), директиву RoHS (Restriction of Hazardous Substances), набор эталонных тестов для оценки экологической безопасности электронных устройств - PC Magazine Green Tech Approved и т.д.

Для мобильных устройств задача создания ПО, которое экономно расходует ресурсы вычислительной платформы, тем более актуальна, поскольку от работы ПО зависит такой важный параметр, как продолжительность работы устройства от автономного источника питания и, как следствие, расходование ресурса аккумуляторной батареи. Проблема быстрого разряда аккумуляторной батареи при работе без подключения мобильного устройства к сети электропитания – это не только неудобство в использовании, но и сокращение срока жизни аккумулятора, что в свою очередь увеличивает общие затраты на утилизацию элементов питания в целом.

### Анализ публикаций

Мобильные технологии в настоящее время активно развиваются по меньшей мере в четырех основных направлениях [1, 2].

1. В мобильные телефоны добавляется все больше возможностей выполнять вычисления (смартфоны), что позволяет использовать их не только для голосовой связи, но и в качестве небольших компьютеров.

2. Миниатюризация компьютеров привела к созданию карманных персональных компьютеров (КПК), которые пользователь может носить с собой и в автономном режиме использовать нужные ему программы.

3. Расширение встроенного функционала [3]. Глобальное позиционирование (GPS) стимулирует развитие приложений с географической привязкой, а встроенные камеры – обмен изображениями, про-

ведение видеоконференций, то, что называют дополненной реальностью (Augmented Reality) и т. п.

4. Активно развиваются технологии и инфраструктура беспроводной связи, которые позволяют обмениваться данными между карманными персональными компьютерами и стационарными информационно-вычислительными сетями как в рамках локальных, так и глобальных компьютерных сетей [4]. Распространяется связь ближнего радиуса действия (Near Field Communication, NFC) - обмен данными между устройствами, а устройства дополняются новыми типами сенсоров и становятся источниками новых типов данных.

Все это происходит на фоне снижения стоимости, а значит повышения доступности мобильных вычислительных устройств.

Рассмотрим подробнее проблему быстрого разряда аккумулятора при работе без подключения к сети электропитания. Помимо неудобств в использовании, быстрый разряд несет за собой одну проблему – утилизацию элементов питания после окончания сроков их эксплуатации. Уменьшение суммарного энергопотребления мобильных устройств ведет не только к увеличению времени разряда батареи мобильного устройства, но и к продлению срока жизни аккумулятора, что в свою очередь снижает общие затраты на утилизацию элементов питания в целом.

Все вышеперечисленное определяет актуальность анализа и классификации методов и программно-аппаратных средств энергетически эффективного управления работой мобильных компьютерных устройств.

### **Технологии управления энергопотреблением мобильных компьютерных устройств**

На аппаратном уровне одним из наиболее действенных способов сокращения энергопотребления является энергосберегающая функция (DTX - Discontinuous transmission), при наличии которой телефон не работает на передачу во время пауз в разговоре и тем самым уменьшает расход энергии батареи [5], но качество звука при ее включении ухудшается. Для экономии расходуемой мобильной станцией энергии также используется метод прерываемого радиоприема (Discontinuous reception). Пейджинговый канал, используемый базовой станцией для оповещения о входящем вызове, структурируется в подканалы.

Следующим способом понижения энергопотребления является разделение интерфейса и радиочасти. В качестве еще одного интересного примера тенденций развития технологий энергосбережения можно привести управление скоростью интерфейса.

Все же основное энергопотребление мобильного телефона обеспечивают экран(ы): известна простая формула, предложенная компанией Siemens – «одна минута работы экрана = часу работы в режиме ожидания» [6].

Технологии контроля энергопотребления и рабочих характеристик SmartReflex™ компании Texas Instruments (TI) в настоящий момент значительно усовершенствованы с появлением второго поколения технологий SmartReflex™ 2, обладают проверенными на практике интеллектуальными адаптивными возможностями, обеспечивающими:

- динамическую подстройку рабочих характеристик транзистора ключа питания в зависимости от утечки;

- динамическое снижение напряжений блоков памяти, находящихся в режиме ожидания;

- автоматизацию применения технологий SmartReflex™ в процессе проектирования [7].

На уровне операционной системы (ОС) известны следующие решения, предназначенные для использования в мобильных устройствах [8].

Zeng и др. предложили framework ECOsystem для управления энергией, как ресурсом первого уровня в ОС устройств с батарейным питанием [9, 10]. По мнению авторов, именно прикладные приложения играют ключевую роль в возможности справедливого распределения энергии, поэтому ECOsystem предоставляет интерфейс для определения срока службы батареи и приоритетов приложений. Авторы разделили управление энергией на уровне ОС на 2 измерения. Первое – это множество системных устройств (например, процессор, память, диск, сетевой интерфейс), которые могут потреблять энергию одновременно. Второе – это приложения, которые могут использовать системные устройства. Авторы ввели новую единицу измерения под названием «currentcy», которая характеризует право приложения потреблять определенное количество энергии в течение фиксированного периода времени. Когда пользователь устанавливает целевой срок батареи и приоритеты приложений ECOsystem преобразует эти данные в соответствующее количество «currentcy» и определяет, сколько «currentcy» должно быть выделено каждому приложению в каждом временном кадре. Приложение расходует выделенное количество «currentcy», используя системные ресурсы, а также может их накапливать до определенного предела. Система была реализована в виде модифицированного ядра Linux и получила позитивную экспериментальную оценку.

Neugebauer, McAuley [11] для обеспечения качества обслуживания чувствительных ко времени приложений разработали ресурсоориентированную ОС Nemesis. Nemesis обеспечи-

вает контроль и учет использования энергии по всем ресурсам системы: процессора, памяти, диска и сетевых устройств. Для возможности учета использования ресурсов для каждого процесса, ОС была вертикально структурирована: большинство функций системы, стеки протоколов и драйверов устройств реализованы на пользовательском уровне разделяемых библиотек, которые вызываются приложениями. Если текущие темпы потребления энергии могут привести к несоответствию ожиданиям пользователя, то система оповещает об этом приложение, после чего приложение должно адаптировать свое поведение. В противном случае ОС выполнит отключение низкоприоритетных задач.

D.G. Sachs и др. создали Иллинойский проект GRACE (Global Resource Adaptation through Cooperation) [12], затем развили его в GRACE-2 [13], в котором предложили экономить энергию путем координированной адаптации на трех уровнях системы в соответствии с изменениями потребностей. Эти 3 уровня включают:

- глобальную адаптацию, учитывающую все приложения, запущенные в системе, и все системные уровни, которая выполняется в случае значительных изменений в система, таких как запуск или завершение работы приложения;

- адаптацию приложения, которая проводится после завершения кванта времени, выделенного приложению;

- внутренняя адаптация отвечает за приспособление к фактическому состоянию ресурсов.

Идеи GRACE-2 были реализованы как часть ядра Linux, и доказали возможность экономии до 33 % энергии.

Rajkumar и др. [14] предложили четыре альтернативных алгоритма для реализации динамического управления напряжением и частотой процессора (Dynamic voltage and frequency scaling – DVFS) в системах реального времени и внедрили прототип как модифицированное ядро ОС Linux. Выбор алгоритма система осуществляет автоматически по мере необходимости. Правила выбора определяются текущим состоянием системы с учетом оценки накладных расходов на изменение частоты и напряжения. Результаты эксперимента показали возможность 50 % экономии энергии.

Flinn, Satyanarayanan [15] исследовали проблему управления ограниченными вычислительными ресурсами и сроком службы батареи в мобильных системах с учетом неустойчивых сетевых коммуникаций. В итоге они разработали две системы: Coda и Odyssey, которые реализуют адаптацию на нескольких уровнях системы.

Coda реализует распределенную файловую систему, не требующую какой-либо модификации существующих приложений, а Odyssey несет от-

ветственность за инициирование и управление приложениями с учетом доступности ресурсов и требуемого качества мультимедийных данных.

На уровне всех современных ОС реализован метод управления энергопотреблением, основанный на выборе схемы управления питанием [16] из доступных схем:

- сбалансированная обеспечивает максимально эффективное использование батареи, когда это необходимо и экономит энергию, когда устройство находится в состоянии простоя;

- энергосберегающая является лучшим способом для максимально долгого использования батареи без перезарядки за счет снижения производительности;

- с высокой производительностью, которая увеличивает производительность системы за счет снижения времени работы батареи

Кэширование данных активно используется во всех ОС, поскольку позволяет значительно сократить количество прямых обращений к памяти (flash, жесткие диски), что ведет к повышению производительности и снижению потребления энергии, а также, позволяя одному из ядер процессора использовать всю кэш-память при бездействии другого ядра.

Общие рекомендации по энергосбережению **на уровне прикладной программы** также хорошо известны.

1. Оптимизация энергопотребления за счет распараллеливания задачи. В современных устройствах все чаще используются многоядерные процессоры. Использование всех доступных ядер способствует не только повышению производительности, но и экономии электроэнергии. Бессмысленно нагружать одно ядро в течение длительного периода на полную или почти полную мощность, если можно выполнить задачу быстрее (и экономнее), используя все доступные ядра.

2. Оптимизация энергопотребления за счет уменьшения количества системных вызовов. Одной из основных причин высокого потребления электричества в активном состоянии приложения является высокая частота системных вызовов. В многопоточном приложении может возникнуть конфликт между потоками, взаимодействующими с ядром системы. Экономия потребления электроэнергии четырехпоточным приложением при снижении числа блокировок из-за конфликтов может достигнуть 60 % [17].

3. Распространенным источником вызовов синхронизации на уровне ядра являются переходы между активным состоянием и состоянием простоя. Если объединить периодические действия в группы и избежать излишние переходы между активным состоянием и состоянием простоя, то уда-

стся повысить параллельность потоков. Эти изменения, дополненные многопоточностью, приведут к снижению потребления электроэнергии приложением.

4. Минимизация итеративных обновлений и простоев. Если использовать длительную периодичность системного таймера и избегать частых периодических опросов, можно снизить количество энергии, затраченное на ожидание ресурсов системы.

5. Оптимизация энергопотребления за счет объединения в пакеты операций работы с ресурсами (сеансов ввода-вывода). Экономии электроэнергии при этом достигается за счет продления периодов простоя внешних устройств.

6. Оптимизация энергопотребления за счет минимизации использования оперативной памяти достигается за счет [18]:

- исключения ненужных преобразований формата графики (из YUV в RGB и обратно) для минимизации числа обращений к графическому и центральному процессорам;

- кэширования часто используемых структур данных;

- ограничения количество перемещений данных между пространством ядра и пространством пользователя и т.д.

7. Оптимизация энергопотребления за счет адаптации под текущий источник питания позволяет продлить срок работы устройств от аккумуляторов, при этом приложения должны менять режим своей работы в зависимости от используемого в данный момент источника электроэнергии (сеть или аккумулятор) и от уровня оставшегося заряда аккумулятора [19].

8. Повышение энергоэффективности мобильных устройств за счет переноса вычислительной нагрузки в облако [20], когда в случае выявления факта интенсивного потребления энергии определенными компонентами мобильного приложения оно становится распределенным. Изучение распределенных программных абстракций и эффективности энергопотребления показало, что энергия, затрачиваемая при переносе данных, во многом зависит от типа сети и условий ее функционирования.

Оценивая эти параметры, исследователи могут создавать адаптивные механизмы облачной разгрузки, которые обеспечивают максимальную экономию энергии, потребляемой мобильными приложениями на различных устройствах в неоднородных сетях.

Однако большинство существующих технологий разгрузки статичны и неспособны адаптироваться в условиях переключения между мобильными сетями с разными характеристиками. Те тех-

нологии, которые в состоянии адаптировать свои механизмы разгрузки на этапе выполнения, предназначены для реализации отдельных исследовательских проектов и пока не имеют четких программных интерфейсов, поэтому настройка их конфигурации, повторное использование и перенос крайне затруднены.

Для повышения эффективности энергосбережения в гетерогенных и изменчивых мобильных сетях облачные схемы должны поддерживать адаптивные стратегии разгрузки.

Зависимость методов экономии электроэнергии мобильных устройств от вида прикладного ПО. Каждое ПО по-своему уникально, но можно выработать общие стратегии, которые будут приемлемы для большинства задач.

Так, например:

- в 3D-играх, когда система оповещает о работе от аккумуляторов, можно ограничить максимальную скорость кадров более низким значением;

- в видеопроигрывателях при низком уровне заряда аккумулятора можно меньше использовать или отключить фильтры улучшения четкости и цветов изображения при воспроизведении;

- в произвольных приложениях необходимо: не обновлять экран, когда приложение свернуто, выбрать параметры по умолчанию, оптимальные с точки зрения экономии электричества, при работе от аккумулятора откладывать второстепенные задачи, предлагать пользователям дополнительные способы сокращения расхода электричества в виде необязательных параметров.

## Заключение

Энергетически эффективное использование мобильных компьютерных устройств реализуется на уровнях аппаратной части, операционной системы и прикладных программ.

От программно реализованных алгоритмов зависит возможность адаптивного поведения мобильного устройства, когда оно потребляет только необходимую электрическую энергию. Собственно адаптивность необходима, прежде всего, для поиска компромисса между экономным расходом остаточной энергии аккумуляторной батареи мобильного устройства и скоростью обработки информации, временем отклика, либо пропускной способностью.

## Список литературы

1. Соколова В.В. Разработка мобильных приложений: учебное пособие / В.В. Соколова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 175 с.

2. Мобильная революция и ее последствия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.os.ru/os/2013/01/13033978/> (дата обращения: 02.01.2015).

3. Ванг Й. Проблемы безопасности смартфонов [Электронный ресурс] / Йонг Ванг, Кевин Стрефф, Со-нелл Раман // Открытые системы. СУБД. – 2013. – № 2. – С. 27-33. – Режим доступа: URL: <http://www.osp.ru/os/2013/01/13033981/> (дата обращения: 02.01.2015).

4. Fling B. Mobile design and development: practical concepts and techniques for creating mobile sites and web apps. / B. Fling – O'Reilly Media, 2009. – 336 p.

5. Методы снижения потребления энергии современными портативными устройствами [Электронный ресурс] / Е. Бирюков, Д. Василенко. – Режим доступа: [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05\\_06/stat\\_198.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_06/stat_198.htm) (дата обращения: 26.01.2014).

6. Энергосберегающие технологии [Электронный ресурс] / А. Спиридонов. – Режим доступа: <http://www.mobile-review.com/articles/2006/smart-energy.shtml> (дата обращения: 13.02.2015).

7. Технологии контроля энергопотребления и рабочих характеристик SmartReflex™: снижение потребляемой мощности и оптимизация производительности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://scanti.ru/journal\\_ti\\_components/test/2008/2008-4%2820%29\\_35.htm](http://scanti.ru/journal_ti_components/test/2008/2008-4%2820%29_35.htm) (дата обращения: 29.01.2014).

8. Beloglazov A. A Taxonomy and Survey of Energy-Efficient Data Centers and Cloud Computing Systems / A. Beloglazov, R. Buyya, Y. C. Lee, A. ZOMAYA // ADVANCES IN COMPUTERS, VOL. 82, 2011 Elsevier Inc. – P. 47-111.

9. Currentcy: A Unifying Abstraction for Expressing Energy Management Policies Heng Zeng, Carla S. Ellis, Alvin R. Lebeck, and Amin Vahdat [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cseweb.ucsd.edu/~vahdat/papers/usenix03.pdf> (дата обращения: 23.01.2015).

10. Zeng H. Experiences in managing energy with ecosystem/ H. Zeng, C.S. Ellis, A.R. Lebeck // IEEE Pervasive Comput. 4 (1) (2005). – P. 62–68.

11. Neugebauer R. Energy is just another resource: Energy accounting and energy pricing in the Nemesis OS / R. Neugebauer, D. McAuley // Proceedings of the Eighth Workshop on Hot Topics in Operating Systems, 2001. – P. 67-72.

12. Sachs D.G. GRACE: a hierarchical adaptation framework for saving energy/ D.G. Sachs, W. Yuan, C.J. Hughes, A. Harris, S.V. Adve, D.L. Jones, et al. // University of Illinois at Urbana-Champaign, Technical Report, UIUCDCS, 2003, pp. 2004–2409.

13. Vibhore V. GRACE-2: integrating fine-grained application adaptation with global adaptation for saving energy / Vibhore Vardhan, Wanghong Yuan, Albert F. Harris, Sarita V. Adve, Robin H. Kravets, Klara Nahrstedt, Daniel G. Sachs, Douglas L. Jones // Journal: Int. J. of Embedded Systems, 2009 Vol.4, No.2. – P. 152 - 169

14. Rajkumar R. Resource kernels: a resource-centric approach to real-time and multimedia systems/ R. Rajkumar, K. Juvva, A. Molano, S. Oikawa // Readings in Multimedia Computing and Networking, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001. – P. 476-490.

15. Flinn J. Managing battery lifetime with energy-aware adaptation / J. Flinn, M. Satyanarayanan // ACM Trans. Comput. Syst. 22 (2) (2004). – P. 137-179.

16. Экономия заряда батареи [Электронный ресурс] / Microsoft inc. – Режим доступа: <http://windows.microsoft.com/ru-ru/windows/conserving-battery-power#ITC=windows-7> (дата обращения: 23.02.2014).

17. Energy-Efficient Software Guidelines [Электронный ресурс] / Intel inc. – Режим доступа: <http://software.intel.com/ru-ru/articles/partner-energy-efficient-software-guidelines> (дата обращения: 03.02.2014).

18. Снижение энергопотребления приложений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Intel inc. – <http://software.intel.com/ru-ru/articles/conserving-active-power> (дата обращения: 01.02.2014).

19. Повышение эффективности энергопотребления для приложений [Электронный ресурс] / S. Sinofsky. – Режим доступа: [http://blogs.msdn.com/b/b8\\_ru/archive/2012/02/15/improving-power-efficiency.aspx](http://blogs.msdn.com/b/b8_ru/archive/2012/02/15/improving-power-efficiency.aspx) (дата обращения: 30.01.2014).

20. Тилевич Э. Энергоэффективность мобильных приложений [Электронный ресурс] / Эли Тилевич, Янг-Ву Вон // Открытые системы. СУБД. – 2014. – №2. – Режим доступа: URL: <http://www.osp.ru/os/2014/02/13040042/> (дата обращения: 02.01.2015).

Поступила в редколлегию 23.02.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.М. Вартамян, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## КЛАСИФІКАЦІЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ МЕТОДІВ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ПРИСТРОЇВ

С.С. Аль-Кхшаб

Наведена трирівнева класифікація енергозберігаючих методів для мобільних комп'ютерних пристроїв. Показано, що програмно реалізовані алгоритми визначають можливість адаптивного поведінки мобільного пристрою при виборі режиму роботи з мінімальним споживанням електричної енергії. Наведені приклади існуючих енергозберігаючих методів, дана бібліографія за тематикою.

**Ключові слова:** автономна робота, адаптивне управління, акумуляторна батарея, інформаційні комп'ютерні технології, операційна система, прикладна програма.

## CLASSIFICATION METHODS FOR ENERGY SAVING IN MOBILE COMPUTING

S.S. Al-Khshab

A three-tier classification of energy-saving techniques for mobile computing devices is presented. It is shown that software algorithms determine the possibility of adaptive behavior of the mobile device for selecting the operating mode with minimum consumption of electric energy. The examples of existing energy-saving methods and a bibliography on the subject are given.

**Keywords:** battery life, adaptive control, computer information technology, operating system, application program.