

УДК 681.142

С.Ф. Тюрин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЗЕЛЁНОГО КОМПЬЮТИНГА

Анализируется зелёный компьютеринг – “Green computing” – экологически ориентированные информационные компьютерные технологии. Рассматриваются актуальные энергосберегающие технологии в основном в области аппаратного обеспечения. Исследования по этой тематике находятся в русле международного проекта «ТЕМПУС “GreenCo project”».

Ключевые слова: гринкомпьютинг – «зелёные» вычисления, масштабирование напряжения и частоты, энергосберегающие, энергоэффективные технологии в области компьютеринга, процессор, память, международный проект «ТЕМПУС».

S.F. Tyurin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

REVIEW OF TECHNOLOGIES OF GREEN COMPUTING

The article discusses the Green computing Engineering - the study and practice of environmentally computing or IT (Energy-Aware, Energy-Saving, Energy Efficient Computer Systems design). Provides an overview of the main Green Computing technologies: dynamic voltage & frequency reduction, the sleep mode, the power management, new circuit design.

Keywords: Green computing, dynamic voltage & frequency reduction, the sleep mode, the power management, new circuit design, TEMPUS GreenCo project.

В последние годы по всему миру идёт и ширится «зелёная» волна – бурно продвигаются «зелёные» технологии, или, как говорится, «экологически чистые» технологии при производстве продуктов питания, товаров народного потребления и не только потребления, в «тренде» ресурсосбережение, том числе энергосбережение. Причём всё это помимо всего прочего сопровождается разговорами (а также размашистыми голливудскими фильмами-катастрофами) по поводу снижения выброса парниковых газов в соответствии с пресловутым Киотским протоколом. Тут никак нельзя не вспомнить и дефицит пресной воды (что якобы грозит будущими «водяными» войнами), и так называемое высокоточное прецизионное земледелие в так называемых цивилизованных странах, и надписи «Не содержит ГМО», и пр.

Сегодня не только производители автомобилей борются за рынок, приводя цифры очень низкого потребления топлива (хотя, честно говоря, они практически никогда не подтверждаются при реальной эксплуатации), теперь производители даже стиральных машин в качестве показателей используют не менее привлекательные характеристики потребления воды и электроэнергии, не говоря уже о разных гаджетах (там соревнуются аккумуляторные батареи). Да, и режим «Старт-стоп» в некоторых продвинутых автомобилях – тоже ресурсосбережение и снижение выброса углекислого газа! Тут же электромобили (разжалованный ё-мобиль уже подзабыт – тоже «зелёный!»), гибридные авто, авто на солнечных батареях... А скандальные акции ГРИНПИС?!

Об этом говорит вся просвещенная Европа. На фоне падения цен на нефть дело доходит до того, что уже создаются так называемые «фекалобусы», использующие в качестве топлива экологически чистый газ биометан, полученный в результате переработки продуктов человеческой жизнедеятельности и пищевых отходов [1].

У нас в России всё гораздо проще, но буквально у всех ещё на слуху недавние дебаты об использовании бытовых ламп освещения с низким энергопотреблением. Все помнят громкое запрещение производства стоваттных ламп накаливания! А энергосберегающие лампы, содержащие ртуть?! Автор однажды пытался безуспешно сдать такую, когда она быстро перегорела. После чего обратно перешёл на обыкновенные лампы.

Спору нет, ресурсы надо беречь, даже на бытовом уровне: продвинутый домашний компьютер может потреблять до киловатта и больше энергии! Старшее поколение помнит: были раньше такие электронагревательные устройства – «киловаттки». А сколько домашней техники часто томится без дела, но под напряжением?! Телевизоры, микроволновые печи, газовые плиты, кондиционеры... А государственные информационные центры?!

Действительно, например, в США, по некоторым оценкам, на питании и охлаждении информационных центров тратится порядка \$4,5 млрд и ожидается, что эти затраты вырастут до \$8 млрд в ближайшие 5 лет [2]. В типовом офисе компьютеры расходуют примерно половину всей электроэнергии, причем серверы потребляют около двух третей, остальное приходится на рабочие станции и периферию [2].

Центры обработки данных потребляют в 100–200 раз больше, чем стандартные офисы. По некоторым оценкам, расходы на питание компьютеров в среднем составляют половину цены оборудования; 50 % от них – стоимость охлаждения [2].

В США порядка 50 % ПК не выключаются на ночь, в результате чего ежегодные потери энергии – порядка 30 млрд кВт·ч стоимостью \$3 млрд в год. В Европе потери на порядок меньше, а в России, по нашей вековой традиции, – никто не считал.

Уже созданы соответствующие образовательные программы – магистерские и аспирантские, например, в Австралийском национальном университете, в университете Атабаски (Канада), в Метрополитен университете (Великобритания) и др. Таким образом, речь фактически идёт о «зелёной» инженерии – Green IT-engineering и даже об энергетической «сознательности» – Energy_Awareness!

В 2012 г. на Украине, в Харьковском национальном исследовательском аэрокосмическом университете (Харьковском авиационном институте ХАИ) под эгидой ЕС и университета Нью-Касла (Великобритания) дан старт международному проекту «Fostering Innovations on Green Computing and Communications TEMPUS GreenCo project «Технологии зеленых вычислений», финансируемому ЕС (Project Number: 530270-TEMPUS-1-2012-1-UK-TEMPUS-JPCR Grant Holder: University of Newcastle upon Tyne (UK)) [3] (рис. 1).



Рис. 1. Эмблема TEMPUS GreenCo project

В этом проекте участвует и ПНИПУ (кафедра АТ). Целью является создание центров переподготовки специалистов и подготовки аспирантов и магистров в области «зелёных» вычислений на основе разработки соответствующих учебных программ. Предполагается разработать магистерские и аспирантские дисциплины. Готовятся к публикации соответствующие учебные пособия, планируются закупка оборудования, переподготовка преподавателей и распространение результатов выполнения проекта, а также запуск пилотного образовательного процесса.

Основные цели и направления зелёных вычислений. В XX в. борьба за экономию ресурсов в области компьютерной техники начинает преобладать над борьбой за скорость вычислений [2].

«Зелёная» гонка, как предполагается, началась около 1992 г., когда Агентство по охране окружающей среды США запустило проект Energy Star для поощрения добровольных тенденций энергоэффективности при разработке мониторов, оборудования климат-контроля и в других продуктах и технологиях.

Считается, что это и дало толчок широкому распространению «спящего» режима среди потребительской электроники. Энергосберегающие функции теперь имеются на любом компьютере, введены спящий [suspend] и ждущий [hibernate-спячка] режимы: в первом случае компьютер остается включенным, но останавливаются жесткий диск и процессор; во втором – содержимое ОЗУ записывается на винчестер, и компьютер выключается полностью.

«Green computing» – это теория и практика экологически ориентированных информационных компьютерных технологий (ИКТ, ICT), это энергосберегающие, энергоэффективные технологии вычислений и прочие – «зелёные» вычисления – ЗВ [2, 3].

Часто используются также такие экзотические понятия и термины: энергоориентированные (энергосознательные) компьютерные системы – (Energy-Aware Computer Systems), энергоэкономные (в смысле затрат энергии) компьютерные системы на основе энергосберегающих подходов – (Energy-Saving Computer Systems), энергоэффективные компьютерные системы – (Energy Efficient Computer Systems) и пр.

Основными целями ЗВ являются: сокращение использования опасных материалов, повышение эффективности энергопотребления на протяжении жизненного цикла IT-изделий, а также эффективная в экономическом и экологическом смысле утилизация [4, 5] (рис. 2).

Особый интерес вызывает такое направление создания экологически ориентированной компьютерной техники, как технологии долговечности (Longevity) – продление срока службы оборудования, в том числе с использованием таких подходов, как модернизируемость и модульность. Считается, что экологически эффективней обновление, модернизация уже произведённого оборудования, чем производство нового.

Создана соответствующая международная организация IFG (International Federation of Green ICT) и разрабатываются соответствующие стандарты IFG Standard. Созданы многочисленные организации, борющиеся за энергетическую эффективность с глобальной целью снижения выброса «парниковых» газов, например, Alliance to Save Energy, Climate Savers Computing Initiative 2Degrees (Low Carbon ITC Network), The Green Grid, Sustainable Electronics Initiative (SEI) и др. Пропагандируется соответствующая добровольная сертификация IT-изделий.

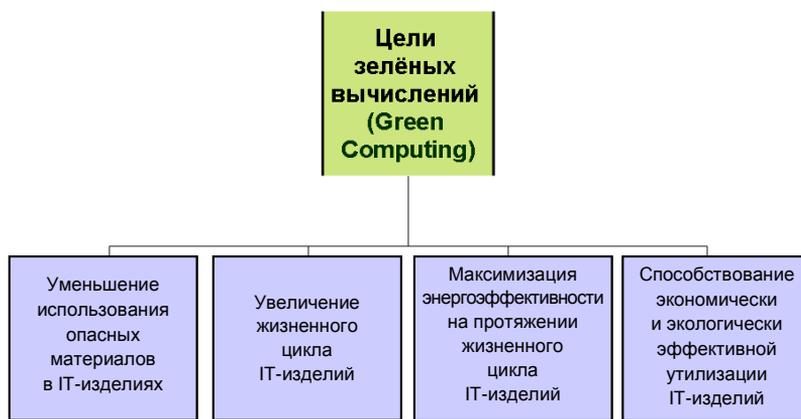


Рис. 2. Основные цели ЗВ

С целью минимизации энергозатрат рассматриваются направления использования пониженного напряжения питания, пониженной тактовой частоты, тогда, когда не требуется высокая скорость вычислений, причём предусматриваются специальные стандартизированные режимы управления напряжением и частотой процессора. В этом плане также развиваются новые схемотехнические технологии.

Отдельного изучения требует анализ энергоэффективного программного обеспечения ПО и соответствующих алгоритмов.

Разработан и используется стандарт IEEE 1680, являющийся фактически стандартом зелёных вычислений (ЗВ) для компьютеров, ноутбуков и мониторов. Energy Efficient Ethernet (IEEE 802.3az) (рис. 3) позволяет повысить также энергоэффективность сетевого оборудования. Предусмотрен аналогичный переход в режим пониженного энергопотребления (тоже «сон») или работа на меньшей по возможности скорости. Используются помимо оптики и специальные энергосберегающие кабели [6, 7].



Рис. 3. Эмблема Energy Efficient Ethernet

Активно продвигаются технологии так называемых виртуальных вычислений, в чём можно даже усмотреть некий возврат на новом уровне в ту эпоху, когда компьютеров было мало и они не были персональными. Авторы ещё помнят такой термин, как «машинное время» – оно было расписано буквально по минутам. В связи с этим рекомендуется использование по возможности там, где нет необходимости в «мощных» вычислениях, так называемых баребонов. Barebone (англ. «bare» – голый и «bone» – кость) – компьютер, собранный на основе «каркасной» системы, предназначенной для самостоятельной сборки пользователем и называемой баребон-основой. Предполагается, что они «энергоэффективнее», да и дешевле. Также пропагандируются в этих целях и так называемые упрощённые и малопотребляющие Plug-компьютеры (рис. 4).



Рис. 4. Plug-компьютер

Известна также ещё одна инициатива «Один ватт» – энергосберегающая инициатива Международного энергетического агентства (МЭА), рекомендующая снизить энергопотребление в режиме ожидания любым устройством: до 1 Вт потребляемой мощности в 2010 и 0,5 Вт в 2013 г. Основные направления ЗВ изображены на рис. 5.

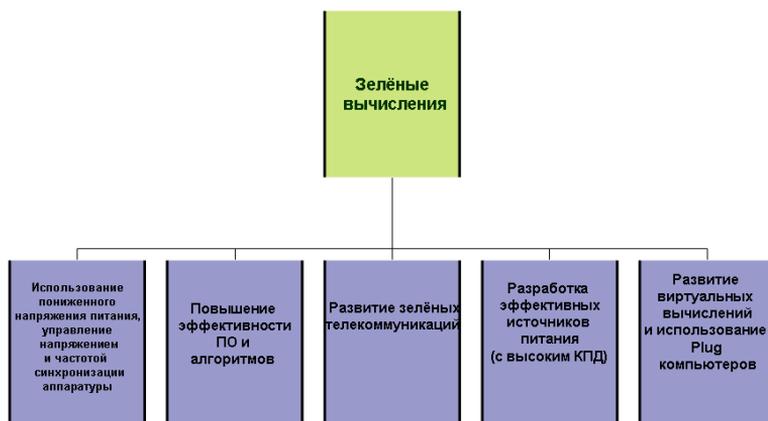


Рис. 5. Основные направления ЗВ

Основная проблема современных блоков питания персональных компьютеров (ПК) – «нагревание воздуха» – низкий коэффициент полезного действия (КПД). Мощность современных блоков питания в зависимости от мощности компьютерной системы варьируется в пределах от 50 (встраиваемые платформы малых форм-факторов) до 1800 Вт (самые высокопроизводительные рабочие станции, серверы или геймерские машины).

Программа добровольной сертификации, стартовавшая в 2004 г., – 80 Plus Titanium требовала повысить эффективность блоков питания с 70–75 %, по крайней мере, до 80 % при 20, 50 и 100 % от номинальной нагрузки и коэффициент мощности 90 % или выше при 100 % нагрузке [8]. Потом требования становились всё жёстче. В 2012 г. компании Dell и Delta Electronics достигли уровня 80 Plus Titanium в источнике питания для серверов (рис. 6).

80 Plus test type	115V internal non-redundant				230V internal redundant			
	10%	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
80 Plus		80%	80%	80%				
80 Plus Bronze		82%	85%	82%		81%	85%	81%
80 Plus Silver		85%	88%	85%		85%	89%	85%
80 Plus Gold		87%	90%	87%		88%	92%	88%
80 Plus Platinum		90%	92%	89%		90%	94%	91%
80 Plus Titanium	90%	92%	94%	90%	90%	94%	96%	91%

Рис. 6. Требования 80 Plus Titanium для блоков питания ПК

Снижение энергопотребления аппаратного обеспечения компьютеров. Анализ доступных источников позволяет выделить следующие основные направления снижения энергопотребления аппаратного обеспечения ПК [2, 9–12] (рис. 7).



Рис. 7. Основные технологии ЗВ относительно аппаратного обеспечения (АО)

Как известно, микросхемы типа КМОП (CMOS – complementary MOS: комплементарный МОП), использующие в логических элементах – вентилях комплементарные пары p - и n -канальных МОП-транзисторов (взаимно дополняющие транзисторы – один открыт, другой закрыт), и были созданы в 60-е гг. XX в. Фрэнком Вонласом (Frank Wanlass) из компании Fairchild Semiconductor как энергосберегающие. По сравнению с некомплементарными схемами такой вентиль занимает больше места и имеет меньшую предельную частоту, но потребляет значительно меньше энергии. Потом в связи с повышением степени интеграции микросхем (при разработке больших интегральных схем БИС) встала проблема рассеивания энергии на элементах. В результате технология КМОП оказалась в выигрышном положении. Тем не менее сейчас в самих процессорах технология КМОП используется редко. Кроме того, возможны оптимизация (минимизация) аппаратных затрат и использование по возможности программно-аппаратного перераспределения функций.

С целью снижения ёмкости (паразитной) межсоединений также возможно использование так называемого накристального терминирования – On-Die Termination (ODT), когда нагрузочные резисторы расположены, например, не на контроллере памяти, а на самой микросхеме памяти, что помимо повышения качества сигнала обеспечивает также некоторое снижение потребляемой мощности печатной платы [10].

Однако не следует забывать, что снижение напряжения питания снижает помехоустойчивость и увеличивает интенсивность сбоев. Поэтому предложен даже новый показатель энергонедёжности (a new metric – the energy-reliability product) [11].

Снижение тактовой частоты увеличивает время выполнения алгоритмов, что может свести на нет экономию энергии.

Использование так называемой самосинхронной схемотехники позволяет работать на сверхнизком напряжении питания (время вычислений увеличивается), но при этом требуется большая избыточность, что увеличивает аппаратные затраты.

Программно-аппаратное перераспределение функций может уменьшить количество аппаратуры, но и время опять-таки возрастает, что не всегда целесообразно.

Оптимизация (минимизация) аппаратных затрат также не всегда допустима в силу необходимости борьбы с состязаниями сигналов, обеспечения требований надёжности, сбоеустойчивости. Следовательно, как и всегда, «чудо-оружия» и панацеи нет, и нужна вдумчивая, скрупулёзная оптимизация при применении всех этих методов «озеленения».

Обеспечение энергоэффективности процессора. В начале микропроцессорной эры (40 с лишним лет тому назад) большинство процессоров использовало одно и то же напряжение и для процессора, и для схем ввода-вывода, они, как правило, работали при напряжении, равном 5 В, которое позже было снижено до 3,5 или 3,3 В (в целях уменьшения потребляемой мощности) [9]. Тем не менее один из первых известных микропроцессоров 8080А имел даже три уровня питания: +5, –5, +12 В, и прошло несколько лет, пока не был разработан 8085 с одним уровнем +5 В. В настоящее время основное оборудование ПК рассматривается в рамках так называемого чипсета (chipset), установленного на материнской плате, выполненной по стандарту – форм-фактору. Форм-фактор (от англ. form factor) – стандарт, имею-

щий рекомендательный характер и задающий габаритные размеры технического изделия – например, материнской платы, а также описывающий дополнительные совокупности его технических параметров, например, форму, типы дополнительных элементов, размещаемых в/на устройстве, их положение и ориентацию.

Теперь, как правило, применяется термин не «микросхема», а «процессор», так как язык не поворачивается говорить «микро» про таких гигантов. На рис. 8 представлены два процессора: процессор Intel Core i7-3770 Tray, кодовое название ядра Ivy Bridge (см. рис. 8, а), рассеиваемая мощность 77 Вт, максимальная рабочая температура 72,6 С, и совершенно зелёный 14 нм процессор CherryTrail (см. рис. 8, б). Благодаря переходу на более «тонкий» производственный процесс и прочим усовершенствованиям в архитектуре повышена энергоэффективность.

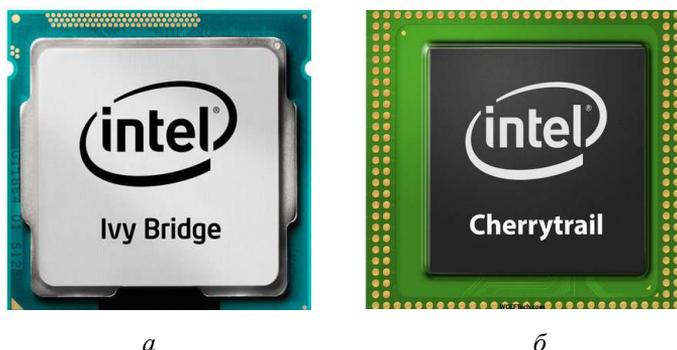


Рис. 8. Процессор Intel Core i7-3770 Tray (а) и процессор CherryTrail (б)

Как заявляется, новая технология 3D tri-gate transistors повышает быстродействие на 37 % или снижает энергопотребление на 50 %. Показатели кристалла процессора Haswell ULT = Ultra Low TDP; ULX = Ultra Low eXtreme TDP (показатель теплоотвода thermal design power). Помимо микросхемы процессора в чипсете ранее использовали так называемый северный мост (*northbridge*), который был расположен рядом с процессором и «отвечал» за все высокоскоростные устройства (видеокарту, оперативную память), южный мост (*southbridge*) согласовывал работу и связывал низкоскоростные интерфейсы (винчестер, аудио, PCI-слоты, USB и т.д.). В настоящее время северный мост встраивается в процессор, что значительно повысило производительность. Микросхема PCH (Platform Controller Hub) – контроллер-коммутатор платформы, которая используется сейчас как южный мост (рис. 9).

Для повышения энергоэффективности процессоров стали использовать технологию уменьшения напряжения (Voltage Reduction Technology – VRT) сначала в портативных вариантах процессора Pentium в 1996 г. Далее два уровня напряжения использовались также и в процессорах для настольных систем, например, Pentium MMX был рассчитан на напряжение 2,8 В, а схемы ввода-вывода работали при напряжении 3,3 В [9]. Далее напряжение питания процессора (Mobile Pentium II) ещё более снизили – до 1,6 В.

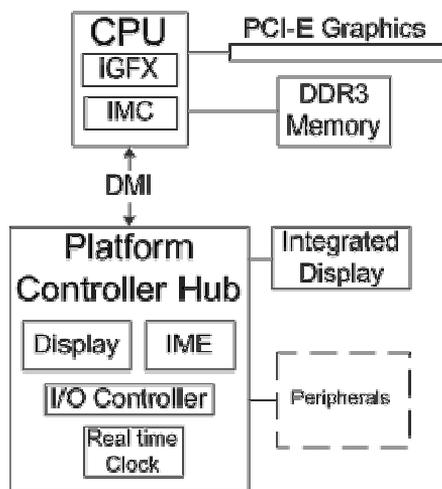


Рис. 9. Материнская плата с микросхемой PCH (Platform Controller Hub)

Теперь напряжение питания ядра процессора – от 1,0 до 1,55 В и даже может быть меньше 1 вольта – 0,98 и даже 0,95! Память – 1,5 В и даже 1,35 В. Контроллеры – 2,5...3,3 В и даже ниже.

Как правило, в ПК имеются средства UEFI (Unified Extensible Firmware Interface) BIOS, которые позволяют менять значение напряжения ядра V_{core} вручную с шагом 0,005 В в диапазоне от 1 до 2 В [9]. В настоящее время напряжения ± 5 , ± 12 , +3,3 В используются материнской платой. Для жёстких дисков, оптических приводов, вентиляторов в настоящее время используются только напряжения +5 и +12 В. Манипуляции с напряжением питания выполняют при так называемом «разгоне» процессора – увеличение его тактовой частоты выше номинальной (Overclocking). Соответственно есть и обратная операция – «торможение» – Underclocking – снижение тактовой частоты ниже номинальной.

В настоящее время для многоядерных процессоров используется технология PAIR (power aware interrupt routing) – подача ядрам сигналов о прерываниях с учётом экономии энергии, которая при частичной нагрузке выбирает одно из включенных ядер для обработки всех прерываний, чтобы остальные ядра продолжали спать. Введены приоритеты прерываний – обработка не требующих немедленной реакции событий может откладываться, пока какое-то из ядер не проснётся [9]. Уровни напряжения питания процессора делят на повышенное (XE), нормальное, низкое (LV) и очень низкое (ULV).

Задаётся показатель теплоотвода, (англ. thermal design power, TDP иногда англ. thermal design point), указывающий требования к производительности системы охлаждения процессора. Компания AMD использует новую энергетическую характеристику под названием ACP (Average CPU Power, «средний уровень энергопотребления») процессоров при нагрузке [7].

Задают также сценарный уровень энергопотребления (англ. Scenario design power, SDP) – уровень энергопотребления процессора, присущий наиболее распространённому сценарию рабочей нагрузки, температуры и частоты [8], он применяется компанией Intel только для своих процессоров серии Y, используемых в ультрабуках и планшетах. Компания AMD также начала использовать эту метрику для сравнения уровня энергопотребления некоторых своих процессоров с процессорами Intel [11].

Энергопотребление современных компьютерных систем определяется значениями токов питания в статическом и динамическом режиме функционирования. Энергопотребление в статическом режиме, определяемое токами утечки, зависит от размеров кристалла и используемых технологией его производства. Таким образом, энергопотребление в настоящее время более всего определяется тактовой частотой, чем она ниже – тем меньше энергии потребляет микросхема, но это приводит к падению производительности.

Метод динамического масштабирования напряжения и частоты (DVFS – Dynamic voltage and frequency scaling) используется для снижения динамического энергопотребления путём уменьшения напряжения питания или частоты [11] в соответствии с ACPI (англ. Advanced

Configuration and Power Interface – усовершенствованный интерфейс управления конфигурацией и питанием), о котором речь будет ниже. Сама схема тактирования занимает 20–40 % общего потребления. Динамическую мощность можно уменьшить за счёт количества переключаемых элементов, например, путём блокировки некоторых компонентов. Путем выявления неиспользуемых элементов и отключения их во время работы программы (стробирование) можно сэкономить 15–64 % мощности потребления без существенного увеличения задержек или занимаемой площади на кристалле [12]. Так, в настоящее время производят даже полное отключение питания блоков процессора.

Для оптимизации энергопотребления за счёт системы команд предложены также RISP-процессоры с реконфигурируемым набором инструкций [13], ASIP-процессоры со специализированным набором команд, NISC-процессоры без набора инструкций, когда они создаются «на лету» под конкретное приложение. Отдельного рассмотрения заслуживают вопросы энерго-оптимизации конвейеров процессоров.

Обеспечение энергоэффективности памяти. Для обеспечения энергоэффективности динамической оперативной памяти также используют снижение питающего напряжения (про накристальное терминирование при передаче сигнала от контроллера памяти мы уже говорили). За последние годы энергопотребление оперативной памяти снизилось до 30 % [14–17].

Напряжение питания DDR2 (*double-data-rate four synchronous dynamic random access memory*) – 1,8 В против 2,5 В ранее – DDR . Однако такое напряжение используется для «медленной» памяти, указано, что для обеспечения 800 МГц необходимо 2–2,2 В [11].

У DDR3 ещё более уменьшено потребление энергии по сравнению с модулями DDR2, что обусловлено пониженным уже до 1,5 В напряжением питания ячеек памяти [12] (рис. 10).

Снижение напряжения питания достигается за счёт использования более тонкого техпроцесса (вначале был 90-нм, в дальнейшем 65, 50, 40 нм) при производстве микросхем и применения специальных транзисторов с двойным затвором Dual-gate, что способствует снижению токов утечки).

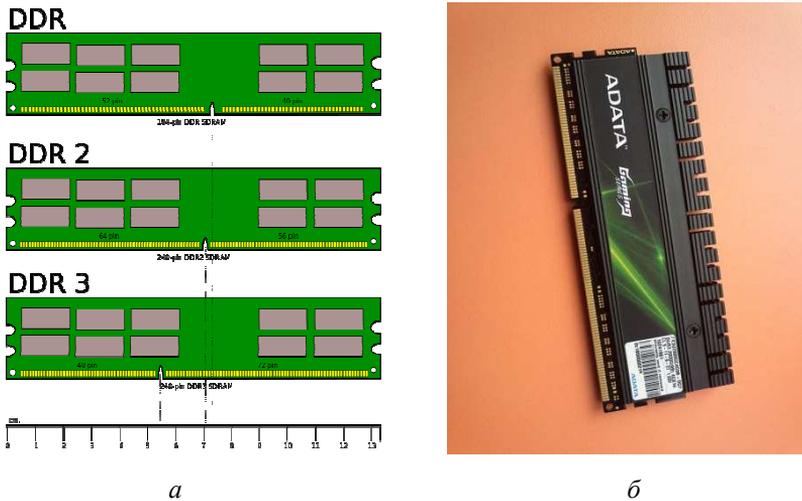


Рис. 10. Внешний вид памяти DDR, DDR2 и DDR3 (а); модуль DDR3 (б)

Существует вариант памяти DDR3L (L означает Low) с ещё более низким напряжением питания 1,35 В, что меньше традиционного для DDR3 на 10 %. Время передачи бита в настоящее время – доли наносекунды! В январе 2011 г. компания Samsung представила модуль DDR4 (рис. 11). Техпроцесс составил 30 нм, объём памяти – 2 Гб, а напряжение – 1,2 В! Минимальный объём одного модуля DDR4 составит 2 Гб, максимальный – 128 Гб.



Рис. 11. DDR4, 2 Гб

Основное отличие DDR4 заключается в удвоенном до 16 числе банков, что позволило вдвое увеличить скорость передачи – до 3,2 Гбит/с. Пропускная способность памяти DDR4 достигает 34,1 Гб/с

(в случае максимальной эффективной частоты 4 266 МГц, определённой спецификациями). Кроме того, повышена надёжность работы за счёт введения механизма контроля чётности на шинах адреса и команд [16]. Используется так называемое «расслоение» – многоканальная память, что увеличивает пропускную способность и соответственно производительность ПК.

Ожидается, что использование памяти типа MRAM (magnetoresistive random-access memory) ещё более снизит энергопотребление. Такая память знаменует своего рода возврат на новом уровне к ещё не забытым ФТЯ – феррит-транзисторным ячейкам, используемым в упомянутой выше «серьёзной» аппаратуре. Кэш-память, находящаяся во всех современных процессорах на ядре, – это самая быстрая память, в которую помещается информация, необходимая процессору. Первым делом процессор обращается к кэш-памяти 1-го уровня при отсутствии нужной информации, он обращается к кэш-памяти других уровней или берет ее из оперативной памяти.

Для снижения энергопотребления статической оперативной памяти – кэш-памяти – вводят буфер, чтобы брать данные из него напрямую без обращения к общему кэшу. Поскольку этот буфер относительно мал, то расход энергии существенно сокращается при условии, что обеспечивается достаточная частота попаданий. Используется также метод отключения неиспользуемых уровней кэш-памяти.

Что касается дисковой памяти, то меньшие форм-факторы (например, 2,5-дюймовый) жестких дисков приводят к потреблению меньшей энергии за гигабайт, чем физически больших дисков.

Переход на хранение данных в твердотельных накопителях также часто способствует снижению энергопотребления. Удалось снизить потребление энергии и эксплуатационные расходы центров обработки данных на 80 % при одновременном увеличении производительности сверх того, что было достижимо посредством использования нескольких жестких дисков в Raid 0 [17].

Твердотельный накопитель (англ. solid-state drive, SSD) – компьютерное немеханическое запоминающее устройство на основе микросхем памяти. Кроме них, SSD содержит управляющий контроллер. Различают два вида твердотельных накопителей: основанные на оперативной памяти и основанные на флеш-памяти [17] (рис. 12).

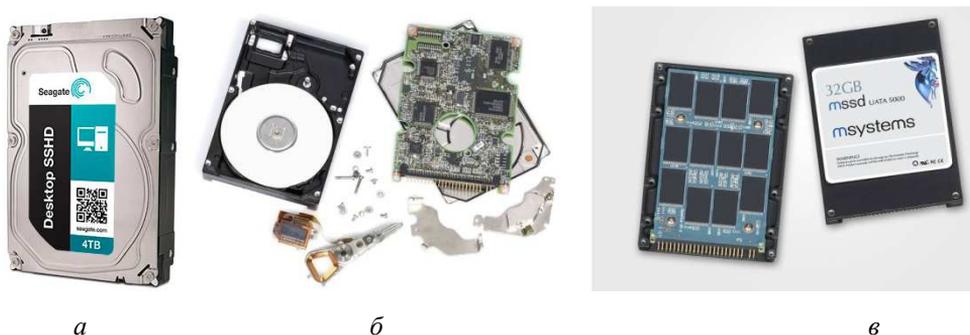


Рис. 12. Сравнение твердотельной памяти SSD (solid-state drive) (а, в) и памяти на жёстком диске – HDD (hard disk drive) (б)

С 2012 г. уже выпускаются твердотельные накопители со скоростью чтения и записи, во много раз превосходящие возможности жёстких дисков. Они характеризуются относительно небольшими размерами и низким энергопотреблением. Однако имеются и существенные недостатки, например, высокая стоимость, проблемы восстановления информации и др.

Поэтому разработаны и так называемые гибридные жёсткие диски. Такие устройства сочетают в одном устройстве накопитель на жёстких магнитных дисках (HDD) и твердотельный накопитель относительно небольшого объёма, в качестве кэша (для увеличения производительности и срока службы устройства, снижения энергопотребления). В настоящее время твердотельные накопители используются не только в компактных устройствах: ноутбуках, нетбуках, коммуникаторах и смартфонах, но могут быть использованы и в стационарных компьютерах для повышения производительности.

Можно с уверенностью констатировать, что технологии памяти и обеспечения её энергоэффективности динамично развиваются, уже созданы экспериментальные образцы эффективной нанопамати порядка нескольких терабайтов.

Обеспечение энергоэффективности шин и устройств ввода-вывода. В связи с уменьшением размеров транзисторов практически до молекулярных параметров определяющее значение приобретает энергопотребление соединительных проводников, а также задержки, вносимые ими [17]. В шинных соединениях рассеивается до трети всей потребляемой мощности (рис. 13).



Рис. 13. Шина 4 PCI Express (bus card slots)

Один из подходов, связанный с уменьшением амплитуды сигнала, передаваемого по шине, уже упомянут выше – накристалльное терминирование (On-Die Termination (ODT)) [17].

Используют также уменьшение числа переключений шины путём кодирования (коды Хэмминга, Грея). Если передаются адреса и они идут последовательно, то в дальнейшем может использоваться дополнительный разряд, а остальные разряды «замораживаются», иначе дополнительный разряд отключается и передаётся весь адрес. Кроме того, может использоваться сегментирование шины (по длине и ширине), когда используется только активный сегмент, что обеспечивает и сокращение длины шины [17].

В современных чипсетах используют уже такой показатель работы шины, как трансфер в секунду (количество операций по передаче данных), например, 3200 МТ/с – 3,2 ГТ/с.

Предполагается также расширенное использование оптических связей, уменьшающих задержку и снижающих потери при передаче информации (преодоление «бутылочного горлышка» связей – interconnect bottleneck, введение Optical Network-on-Chip – ONoC).

Переход с ЭЛТ-мониторов на ЖК-мониторы также способствовал энергосбережению. Кроме того, ЭЛТ содержат значительные количества свинца. ЖК-мониторы, как правило, используют люминесцентные лампы. Некоторые новые дисплеи используют массив светоизлучающих диодов (LED), что уменьшает количество требуемой электроэнергии. Быстрый графический процессор может быть самым большим потребителем электроэнергии в компьютере. Поэтому разрабатываются технологии не только увеличения производительности, но и энергоэффективности,

например, новая версия DirectX (Intel и Microsoft) также будет способствовать снижению уровня энергопотребления системы при сохранении высокой производительности в 3D.

На недавно завершившейся конференции SIGGRAPH 2014 в альянсе Intel и Microsoft продемонстрировали возможности DirectX 12 на примере нового планшета Microsoft Surface Pro 3, оснащённого экономичной версией Haswell с интегрированным графическим ядром Intel HD 4400. В сцене, демонстрирующей одновременно 50 тысяч астероидов, летящих сквозь космическое пространство, переключение с режима DirectX 11 на DirectX 12 вызывало двукратное падение уровня энергопотребления [18] (рис. 14).

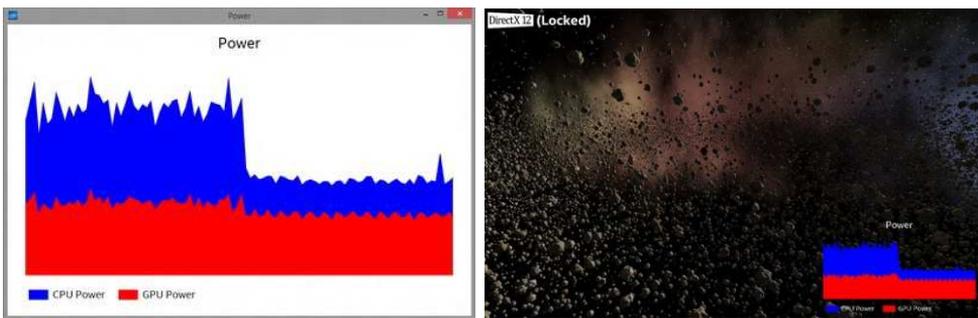


Рис. 14. Режимы графического процессора DirectX 11 и DirectX 12

Основная доля экономии пришлась на центральный процессор CPU, обозначенный синим цветом.

Энергоменеджмент. Кроме «метрических» стандартов на материнские платы в последние годы активно вводятся стандарты энергоэффективности. Так, Евросоюз сформулировал требования по энергоэффективности – ErP (Energy-related Products) и EuP (Energy Using Product). По требованию ErP/EuP система в выключенном состоянии должна потреблять менее 1 Вт энергии. Требования ErP/EuP 2.0 (вступили в действие в 2013 г.) – полное энергопотребление компьютера в выключенном состоянии не должно превышать 0,5 Вт.

EPU Engine [19–21] (Energy Processor/Processing Unit) – программно-аппаратная энергосберегающая технология, разработанная компанией ASUSTeK Computer (ASUS) и предназначенная для регулирования энергоснабжения компонентов персонального компьютера (ПК). EPU Engine присутствует на большинстве материнских плат производства ASUS, начиная с 2008 г., и позволяет динамически

регулировать количество электроэнергии, потребляемой компонентами персонального компьютера.

EPU-4 Engine поддерживает четыре компонента: CPU, видеокарту, носитель информации и кулер. EPU-6 Engine поддерживает шесть компонентов: центральный процессор (CPU), чипсет, оперативную память, видеокарту, носитель информации (как правило, жёсткий диск), процессорный кулер.

EPU Engine использует специальную микросхему EPU (рис. 15), которая встроена в материнскую плату и представляет собой ШИМ-контроллер (ШИМ – широтно-импульсная модуляция), динамически регулирует число активных каналов питания центрального процессора (CPU) в зависимости от его нагрузки.

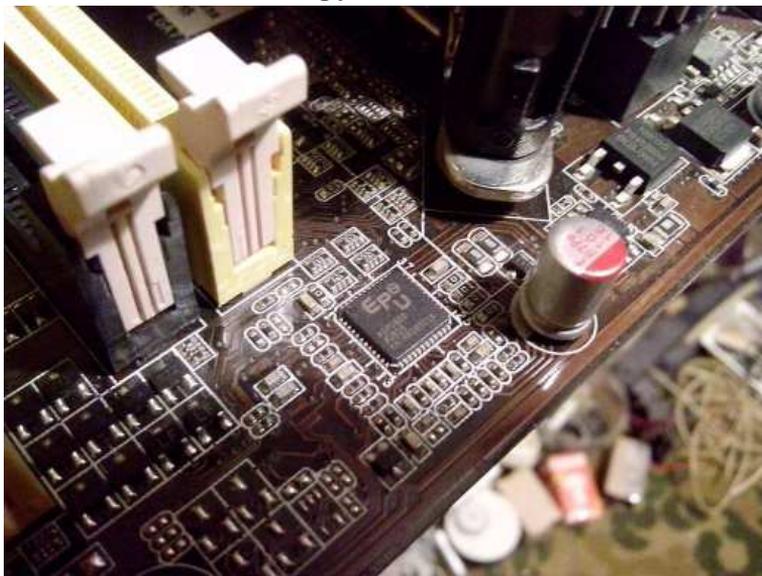


Рис. 15. Микросхема EPU на материнской плате ASUS P5Q SE

Также EPU может изменять частоту системной шины и множители процессора, уменьшая частоту FSB (Front Side Bus – шина, обеспечивающая соединение между x86-совместимым центральным процессором и внутренними устройствами) ниже штатной и снижая до минимума множители в моменты низкой загрузки CPU, а также слегка разгоняя процессор при её нарастании. Причём интервалы изменения частот можно варьировать, а также можно настроить несколько режимов пониженного энергопотребления или разгона, чтобы потом быстро переключаться между ними.

Кроме центрального процессора микросхема EPU способна изменять режимы питания других компонентов ПК. На программном уровне EPU Engine представлена утилитой, которая взаимодействует с микросхемой EPU. В настройках утилиты можно указать режимы энергопотребления, их конфигурации. Так, для режимов можно выставить интенсивность снижения напряжения питания того или иного компонента.

При самом энергоэффективном режиме энергопотребления EPU-6 Engine может снизить частоту процессора до 30 %, а его напряжение питания – до 40 %. Частота оперативной памяти уменьшается на 30–40 % от номинальной частоты. Системная шина между процессором и чипсетом может уменьшить частоту до 10–50 % в зависимости от модели процессора. Жесткие диски отключаются, вся необходимая для работы информация хранится в оперативной памяти. Если возникает необходимость в информации из жестких дисков, то они переводятся в номинальный режим работы за 3–5 с. Видеокарта работает в режиме повышенной экономии энергии, по заявлениям её энергопотребление снижается на 37 % от номинального значения. Процессорный кулер переходит в бесшумный режим [19].

В 2010 г. ASUS представила новую технологию Dual Intelligent Processors [22], которая согласно анонсу может мгновенно ускорить ПК на 37 % или уменьшить его энергопотребление на 80 %. Эта технология на аппаратном уровне реализуется двумя чипами TurboV Processing Unit (TPU) и EPU, которые отвечают за разгон и энергоэффективность соответственно (рис. 16).



Рис. 16. Микросхемы для технологии Dual Intelligent Processors (ASUS)

Ultra Durable (версии 1, 2 и 3) – технология от тайваньской компании Gigabyte, призванная улучшить температурный режим и надежность работы материнской платы, которая обеспечивает:

- увеличенную (удвоенную) толщину медных слоев толщиной 70 мкм (2 унции/кв.фут) как для слоя питания, так и для слоя заземления системной платы, что снижает полное сопротивление платы на 50 %, и обеспечивает снижение рабочей температуры компьютера, повышение энергоэффективности и улучшение стабильности работы системы в условиях разгона;

- использование полевых транзисторов, обладающих пониженным сопротивлением в открытом состоянии (RDS(on)), так как транзисторы преобразователей питания +12 В выделяют относительно много тепла;

- использование дросселей с ферритовым сердечником – они обеспечивают меньшие потери энергии и меньший уровень электромагнитного излучения;

- использование безсвинцового припоя; повторное использование картона и пластика упаковки (ну это уже, наверное, не «электрическая» эффективность, а экологическая).

ACPI (англ. Advanced Configuration and Power Interface – усовершенствованный интерфейс управления конфигурацией и питанием) – открытый промышленный стандарт, впервые выпущенный в декабре 1996 г. и разработанный совместно компаниями HP, Intel, Microsoft, Phoenix и Toshiba, который определяет общий интерфейс для обнаружения аппаратного обеспечения, управления питанием и конфигурации материнской платы и устройств [23].

ACPI выделяет следующие основные состояния «системы в целом» [23]. Глобальные состояния:

- G0 (S0) (Working) – нормальная работа;

- G1 (Suspend, Sleeping, Sleeping Legacy) – машина выключена, однако текущий системный контекст (system context) сохранён, работа может быть продолжена без перезагрузки. Для каждого устройства определяются «степень потери информации», а также места, где информация должна быть сохранена, откуда будет прочитана при пробуждении и время на пробуждение;

- G2 (S5) (soft-off) – мягкое (программное) выключение; система полностью остановлена, но под напряжением, готова включиться в любой момент. Системный контекст утерян;

– G3 (mechanical off) – механическое выключение системы; блок питания отключен.

Выделяют четыре состояния функционирования процессора (от C0 до C3) [23] (рис. 17):



Рис. 17. Четыре состояния функционирования процессора

- **C0** – оперативный (рабочий) режим;
- **C1** (известно как *Halt*) – состояние, в котором процессор не исполняет инструкции, но может незамедлительно вернуться в рабочее состояние;
- **C2** (известно как *Stop-Clock*) – состояние, в котором процессор обнаруживается приложениями, но для перехода в рабочий режим требуется время;
- **C3** (известно как *Sleep*) – состояние, в котором процессор отключает собственный кэш, но готов к переходу в другие состояния.



Рис. 18. Состояния «сна» процессора

Выделяют 4 состояния сна [23] (рис. 18):

– S1 – состояние, при котором все процессорные кэши сброшены и процессоры прекратили выполнение инструкций. Однако питание процессоров и оперативной памяти поддерживается; устройства, которые не требуются, могут быть отключены;

– S2 – дополнительное более глубокое состояние сна, чем S1, когда центральный процессор отключен, обычно пока неиспользуемое;

– S3 («Suspend to RAM» (STR) в BIOS, «Ждущий режим» («Standby»)) – в этом состоянии на оперативную память (ОЗУ) продолжает подаваться питание, и она остаётся практически единственным компонентом, потребляющим энергию. Поскольку состояние операционной системы и всех приложений, открытых документов и прочее хранится в оперативной памяти, пользователь может возобновить работу точно на том месте, где он её оставил, – состояние оперативной памяти при возвращении из S3 то же, что и до входа в этот режим. S3 имеет два преимущества над следующим S4: компьютер быстрее возвращается в рабочее состояние, и, второе, если запущенная программа (открытые документы и т.д.) содержит конфиденциальную информацию, то эта информация не будет принудительно записана на диск. Однако дисковые кэши могут быть сброшены на диск для предотвращения нарушения целостности данных в случае, если система не просыпается, например, из-за сбоя питания;

– S4 («Спящий режим» (Hibernation) в Windows, «Safe Sleep» в Mac OS X, также известен как «Suspend to disk») – в этом состоянии всё содержимое оперативной памяти сохраняется в энергонезависимой памяти, такой как жёсткий диск: состояние операционной системы, всех приложений, открытых документов и т.д. Это означает, что после возвращения из S4 пользователь может возобновить работу с места, где она была прекращена, аналогично режиму S3. Различие между S4 и S3, кроме дополнительного времени на перемещение содержимого оперативной памяти на диск и назад, в том, что перебои с питанием компьютера в S3 приведут к потере всех данных в оперативной памяти, включая все несохранённые документы, в то время как компьютер в S4 этому не подвержен.

Выделяют также четыре состояния функционирования других устройств (монитор, модем, шины, сетевые карты, видеокарта, диски, флоппи и т.д.) – от D0 до D3:

– **D0** – полностью рабочее (оперативное) состояние, устройство включено;

– **D1** и **D2** – промежуточные состояния, активность определяется устройством;

– **D3** – устройство выключено.

Дополнительно используется – технология OnNow от Microsoft (расширения S1–S4 состояния G1). Также Windows 7 поддерживает «Гибридный спящий режим», сочетающий в себе преимущества S1/S3 (быстрота пробуждения) и S4 (защищённость от сбоев электропитания). Так же он реализован в GNU/Linux (pm-suspend-hybrid), аналогичная реализация в Mac OS X имеет название Safe Sleep.

Масштабирование рабочих состояний процессора по используемому напряжению питания и частоты синхронизации показано на рис. 19.

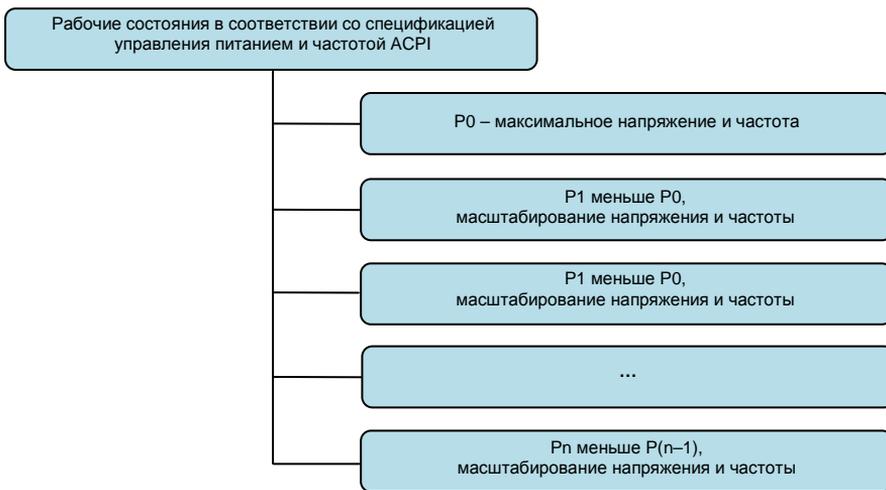


Рис. 19. Масштабирование рабочих состояний процессора

Международная инициатива – рейтинг Green500 оценивает суперкомпьютеры по показателю MFLOPS/W, исходя из количества электроэнергии, необходимого для выполнения фиксированного набора задач [24] (рис. 20).

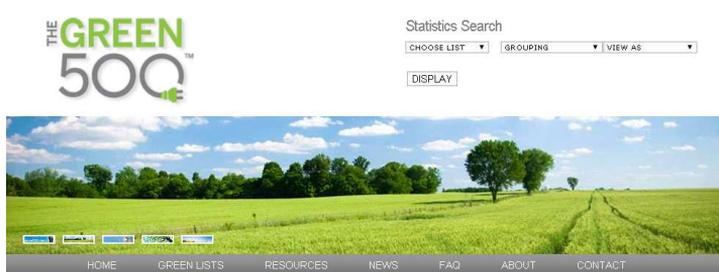
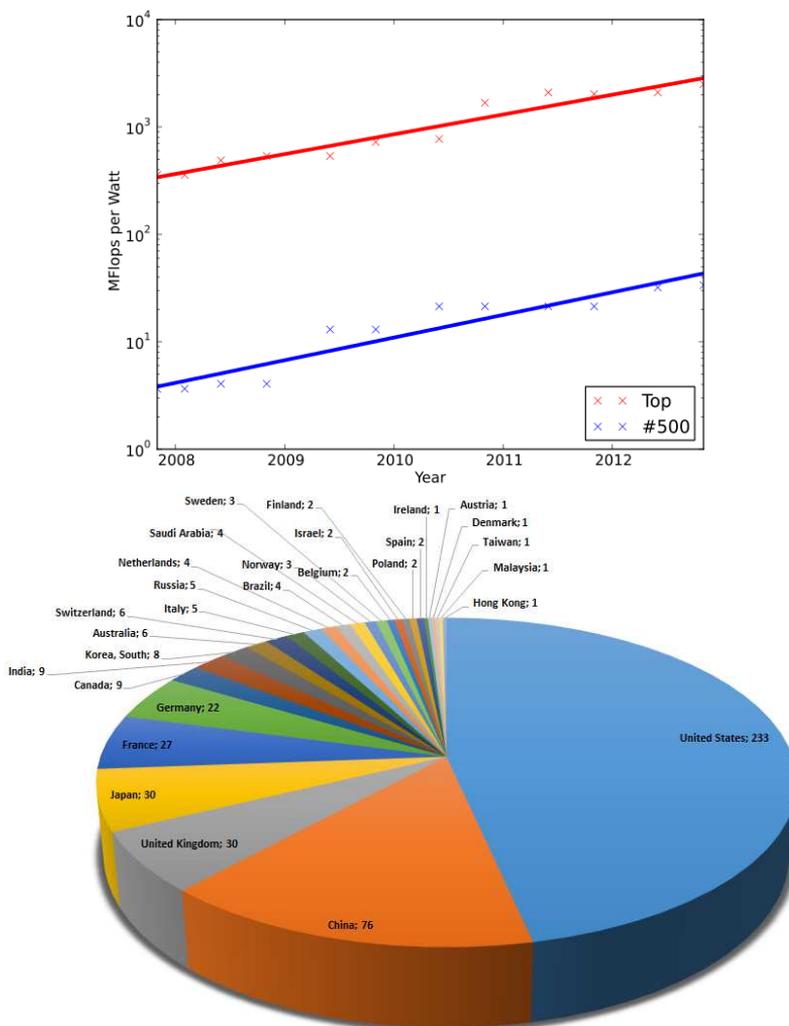


Рис. 20. Международная инициатива – рейтинг Green500

Некоторые результаты представлены на рис. 21.



Суперкомпьютер доли стран (июнь 2014)
Ресурс: www.top500.org

Рис. 21. Рейтинг Green500

В настоящее время на первом месте – TSUBAME-KFC-GSIC (Токийский технологический институт)1 с 4,503.17 MFLOPS/W и общим энергопотреблением 27,78 кВт. К сожалению, в этом топе РФ представлена всего пятью (!) суперкомпьютерами.

Зелёная наука. В русле научного направления «зелёных» вычислений проводятся масштабные научно-технические конференции

[25–26]. Здесь следует упомянуть оптокомпьютинг или оптоинформатику [27], поскольку использование оптической обработки информации (оптокомпьютинг, фотоника и фотонные микросхемы), оптических сетей на уровне электронного кристалла (Optical Network-on-Chip (ONoC) также может быть отнесено к зелёному компьютерингу. Однако уже существующие сейчас фотонные микросхемы, например в навигации (ПНППК развивает это направление), по существу, пока используют аналоговую обработку информации с последующим преобразованием в электронную форму.

Проектирование микромощных устройств производства и обработки информации (Low Power Design – LPD) является одним из приоритетных направлений современной микроэлектроники [28, 29]. Методы LPD включают совершенствование технологии (снижение паразитных емкостей за счет уменьшения размеров и снижение питающих напряжений за счет уменьшения пороговых напряжений), оптимизацию топологических размеров, разработку энергетически эффективной архитектуры больших БИС и ультрабольших интегральных схем УБИС, использование новой схемотехники [28, 29].

Большие перспективы, как ожидается, имеет адиабатическая или термодинамически обратимая логика – АТОЛ (Adiabatic circuits) [28, 29]. Такие схемы используют передачу накопленной энергии обратно к источнику, что основано на возможности возврата в систему энергии, затраченной на производство информации, и ее повторного использования для последующих вычислений. Практическая реализация адиабатических устройств производства информации требует создания не только соответствующей элементной базы (адиабатических базовых вентилях – логических элементов – ЛЭ), но и адиабатических источников питания [29].

Продвигается также самосинхронная схемотехника, одной из особенностей которой является, помимо повышенного быстродействия, устойчивая работа при сверхнизком напряжении питания [30]. Это направление развивает институт проблем управления (ИПИ) РАН – группа Ю.А. Степченкова. Уже имеются примеры соответствующих микросхем. Так, компания Epson заявляет о 70 % снижения энергопотребления по сравнению с синхронной схемотехникой.

Развиваются также некоторые другие технологии, учитывающие упомянутый выше принцип энергонадёжности (energy-reliability)

в соответствии с предлагаемым принципом «зелёной» логики (оказывается, есть и такая!) [31–36]. Так, активно развивается научное направление «зелёных» программируемых логических интегральных микросхем ПЛИС [37].

Выводы. Таким образом, в ближайшее время следует ожидать ужесточения соответствующих международных энергосберегающих стандартов в области информационных технологий, а также усиления государственного регулирования в этой области.

Современные энергосберегающие технологии компьютеров используют в качестве основного принцип динамического масштабирования напряжения и тактовой частоты в зависимости от ситуации. Широко используются состояния «сна», которые так же, как и другие состояния, стандартизируются.

Перспективными технологиями являются оптические (фотонные) технологии, технологии создания микромощных устройств производства и обработки информации (Low Power Design – LPD), например, изготовления специальных транзисторов 3D tri-gate transistors, которые уже используются в процессоре Haswell фирмы Интел.

Особый интерес вызывает адиабатическая или термодинамически обратимая логика АТОЛ (Adiabatic circuits), а также самосинхронная (self timed) схемотехника, которые пока широко не применяются, но, видимо, их звёздный час уже близится. Тем не менее пока относительно немногие источники подчёркивают необходимость учёта надёжности, которая входит в противоречие с требованиями снижения логических уровней – целесообразно использовать более «тонкий» показатель энергонадёжности (the energy-reliability product).

Международный образовательный проект ТЕМПУС, в котором участвует и автор со своими аспирантами, продвигает «зелёную» тематику, по которой уже есть курсы в зарубежных университетах, в университетах России и Украины, невзирая ни на что. Вероятно, соответствующие «зелёные» дисциплины в скором времени будут преподаваться не только для аспирантов и магистров, но и для специалистов и бакалавров.

Библиографический список

1. Первый «фекалобус» вышел на линию в Бристоле [Электронный ресурс]. – URL: http://www.vb.kg/doc/294597_pervyy_avtobys_na_fekaliih_vyshel_na_liniiu_v_bristole.html (дата обращения: 27.11.14).

2. Что такое зеленые вычисления или зеленые информационные технологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://nature-time.ru/2014/07/zelenyie-vyichisleniya-ili-zelenyie-informatsionnyie-tehnologii/> (дата обращения: 21.10.14).

3. Зеленый компьютеринг и коммуникации [Электронный ресурс]. – URL: http://csn.khai.edu/projects/-/asset_publisher/9yWh0PD4WOL9/content/mtempus-greenco (дата обращения: 30.10.14).

4. San Murugesan. Harnessing Green IT: Principles and Practices // IEEE IT Professional. – Jan.–Feb. 2008. – P. 24–33.

5. Donnellan Brian, Sheridan Charles, Curry Edward. A Capability Maturity Framework for Sustainable Information and Communication Technology» // IEEE IT Professional. – Jan.–Feb. 2011. – 13 (1). –P. 33–40.

6. Energy_Efficient_Ethernet [Электронный ресурс]. – URL: http://www.tadviser.ru/index.php/Статьи:IEEE_802.3az_-_Energy_Efficient_Ethernet (дата обращения: 02.11.14).

7. 80 Plus [Электронный ресурс]. – URL: http://www.nix.ru/support/faq/show_articles.php?number=684&faq_topics=Plus (дата обращения: 29.10.14).

8. Устройство процессоров Intel Ivy Bridge [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ixbt.com/cpu/ivy-bridge-architecture-2.shtml> (дата обращения: 25.10.14).

9. Handbook of Energy-Aware and Green Computing – Two Volume Set [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.crcpress.com/product/isbn/9781466501164> (дата обращения: 26.10.14).

10. The Green Computing Book: Tackling Energy Efficiency at Large [Электронный ресурс]. – URL: http://www.crcpress.com/product/isbn/9781439819876?source=crcpress.com&utm_source=productpage&utm_medium=website&utm_campaign=RelatedTitles (дата обращения: 26.10.14).

11. Архитектуры малопотребляющих процессоров и способы оптимизации энергопотребления [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2192/doc/52461/> (дата обращения: 26.10.14).

12. Каляев А.В. Микропроцессорные системы с программируемой архитектурой. – М.: Радио и связь, 1984. – С. 240.

13. Оперативная память DDR2 SDRAM [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ixbt.com/mainboard/ram-faq-2006.shtml> (дата обращения: 26.10.14).

14. Оперативная память DDR3 [Электронный ресурс]. – URL: http://perm.blizko.ru/predl/computer/computer/accessority/operativnaya_pamyat/DDR3 (дата обращения: 27.10.14).

15. Оперативная память DDR4 [Электронный ресурс]. – URL: <http://faqhard.ru/articles/4/11.php> (дата обращения: 27.10.14).

16. Материнская плата [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.thg.ru/mainboard/> (дата обращения: 27.10.14).

17. DirectX 12 повысит энергоэффективность совместимых графических решений [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.3dnews.ru/900110/?feed> (дата обращения: 29.10.14).

18. EPU Engine [Электронный ресурс]. – URL: <http://admindoc.ru/121/epu-6-part1/> (дата обращения: 27.10.14).

19. IT energy management [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.scotthyoung.com/blog/2006/07/14/energy-management/> (дата обращения: 29.10.14).

20. Central processing unit power dissipation [Электронный ресурс]. – URL: http://www.cpu-world.com/Glossary/M/Minimum_Maximum_power_dissipation.html (дата обращения: 29.10.14).

21. ASUS Dual Intelligent Processors ускоряет работу ПК и позволяет экономить энергию [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ferra.ru/ru/system/news/2010/07/05/asus-dual-intelligent-processors-uskoryaet-rabotu-pk-i-razvolyaet-ekonomit-energiyu/> (дата обращения: 07.11.14).

22. Advanced Configuration and Power Interface (ACPI) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.acpi.info/> (дата обращения: 07.11.14).

23. Green500 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.green500.org/> (дата обращения: 07.11.14).

24. International Conference on Energy Aware Computing (ICEAC) 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.bvents.com/event/401773-international-conference-on-energy-aware-computing-iceac> (дата обращения: 25.10.14).

25. The International Conference on Green Computing, Intelligent and Renewable Energies (GCIRE2015) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.clocate.com/conference/The-International-Conference-on-Green-Computing-Intelligent-and-Renewable-Energies-GCIRE2015/47730/> (дата обращения: 26.10.14).

26. Оптиинформатика [Электронный ресурс]. – URL <http://edu.glavsprav.ru/spb/vpo/journal/506/> (дата обращения: 26.10.14).

27. Adiabatic circuits [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.adv-radio-sci.net/1/247/2003/ars-1-247-2003.pdf> (дата обращения: 29.10.14; 02.11.14).

28. Лосев В.В. Исследование и разработка элементной базы цифровых устройств обработки информации на основе принципа термодинамической обратимости [Электронный ресурс]. – URL: <http://tekhnosfera.com/issledovanie-i-razrabotka-elementnoy-bazy-tsifrovyyh-ustroystv-obrabotki-informatsii-na-osnove-printsipa-termodinamicheskogo> (дата обращения: 02.11.14).

29. Соколов И.А., Степченков Ю.А., Петрухин В.С., Дьяченко Ю.Г., Захаров В.Н.. Самосинхронная схмотехника – перспективный путь реализации аппаратуры [Электронный ресурс]. – URL: <http://uchebana5.ru/cont/1639604.html> (дата обращения: 02.11.14).

30. Tyurin S.F. Retention of functional completeness of Boolean functions under «failures» of the arguments // Automation and Remote Control 60 (9 PART 2). – 1999. – P. 1360–1367.

31. Tyurin S., Kharchenko V. Redundant Bases for Critical Systems and Infrastructures General Approach and Variants of Implementation // Proceedings of the 1st International Workshop on Critical Infrastructures Safety and Security; Kirovograd, Ukraine 11–13, May, 2011 / V. Kharchenko, V. Tagarev (edits). – 2011. – Vol. 2. – P. 300–307.

32. Tyurin S.F., Grekov A.V., Gromov O.A. The principle of recovery logic FPGA for critical applications by adapting to failures of logic elements // World Applied Sciences Journal. – 2013. – 26 (3). – P. 328–332. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.26.03.13474

33. Tyurin S.F., Gromov O.A. A residual basis search algorithm of fault-tolerant programmable logic integrated circuits // Russian Electrical Engineering. – 2013. – 84 (11). – P. 647–651. DOI: 10.3103/S1068371213110163

34. Kamenskih A.N., Tyurin S.F. Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability Proceedings of the 2014 // IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRusNW 2014.

35. Тюрин С.Ф., Плотникова А.Ю. Концепция зелёной логики // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2013. – № 8. – С. 61–72.

36. Шалтырев В.А. Средства и методы повышения производительности и снижения энергопотребления систем на кристалле, реализуемых на базепрограммируемых логических интегральных схем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ». – М., 2009.

References

1. Pervyi «fekalobus» vyshel na liniuu v Bristole [The first "fekalobus" quitted to the line in Bristol], available at: http://www.vb.kg/doc/294597_pervyyu_avtobys_na_fekaliih_vyshel_na_linuu_v_bristole.html (accessed: 27 November 2014).

2. Chto takoe zelenye vychisleniia ili zelenye informatsionnye tekhnologii [What is the green computings or green information technologies], available at: <http://nature-time.ru/2014/07/zelenyie-vyichisleniya-ili-zelenyie-informatsionnye-tehnologii/> (accessed: 21 October 2014).

3. Zelenyi komp'uting i kommunikatsii [Green computing and communications], available at: http://csn.khai.edu/projects/-/asset_publisher/9yWh0PD4WOL9/content/mtempus-greenco (accessed: 30 October 2014).

4. San Murugesan. Harnessing Green IT: Principles and Practices. *IEEE IT Professional*, January–February 2008, pp. 24-33.

5. Donnellan Brian, Sheridan Charles, Curry Edward. A Capability Maturity Framework for Sustainable Information and Communication Technology». *IEEE IT Professional*, January–February, 2011, no. 13 (1), pp. 33-40.

6. Energy_Efficient_Ethernet, available at: http://www.tadviser.ru/index.php/Статьи:IEEE_802.3az_-_Energy_Efficient_Ethernet (accessed: 02 November 2014).

7. 80 Plus, available at: http://www.nix.ru/support/faq/show_articles.php?number=684&faq_topics=Plus (accessed: 29 October 2014).

8. Ustroistvo protsessorov Intel Ivy Bridge [Device of Intel Ivy Bridge processors], available at: <http://www.ixbt.com/cpu/ivy-bridge-architecture-2.shtml> (accessed: 25 October 2014).

9. Handbook of Energy-Aware and Green Computing – Two Volume Set, available at: <http://www.crcpress.com/product/isbn/9781466501164> (accessed: 26 October 2014).

10. The Green Computing Book: Tackling Energy Efficiency at Large, available at: [Scalehttp://www.crcpress.com/product/isbn/9781439819876?source=crcpress.com&utm_source=productpage&utm_medium=website&utm_campaign=RelatedTitles](http://www.crcpress.com/product/isbn/9781439819876?source=crcpress.com&utm_source=productpage&utm_medium=website&utm_campaign=RelatedTitles) (accessed: 26 October 2014).

11. Arkhitektury malopotrebliaiushchikh protsessorov i sposoby optimizatsii energopotrebleniia [Architecture of the low-consuming processors and energy consumption optimization methods], available at: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2192/doc/52461/> (accessed: 26 October 2014).

12. Kaliaev A.V. Mikroprotsessornye sistemy s programmiruemoi arkhitekturoi [Microprocessor systems with programmable architecture]. Moscow: Radio i sviaz', 1984. 240 p.

13. Operativnaia pamiat' DDR2 SDRAM [Random access memory of DDR2 SDRAM], available at: <http://www.ixbt.com/mainboard/ram-faq-2006.shtml> (accessed: 26 October 2014).

14. Operativnaia pamiat' DDR3 [Random access memory of DDR3], available at: http://perm.blizko.ru/predl/computer/computer/accessority/operativnaya_pamyat/DDR3 (accessed: 27 October 2014).

15. Operativnaia pamiat' DDR4 [Random access memory of DDR4], available at: <http://faqhard.ru/articles/4/11.php> (accessed: 27 October 2014).

16. Materinskaia plata [Motherboard], available at: <http://www.thg.ru/mainboard/> (accessed: 27 October 2014).

17. DirectX 12 povysit energoeffektivnost' sovместimyykh graficheskikh reshenii [DirectX 12 will increase energy efficiency of compatible graphic decisions], available at: <http://www.3dnews.ru/900110/?feed> (accessed: 29 October 2014).

18. EPU Engine, available at: <http://admindoc.ru/121/epu-6-part1/> (accessed: 27 October 2014).

19. IT energy management, available at: <http://www.scotthyoung.com/blog/2006/07/14/energy-management/> (accessed: 29 October 2014).

20. Central processing unit power dissipation, available: http://www.cpu-world.com/Glossary/M/MinimumMaximum_power_dissipation.html (accessed: 29 October 2014).

21. ASUS Dual Intelligent Processors uskoriaet rabotu personal'nogo komp'iutera i pozvoliaet ekonomit' energiiu [ASUS Dual Intelligent Processors accelerates operation of the personal computer and allows to save energy], available at: <http://www.ferra.ru/ru/system/news/2010/07/05/asus-dual-intelligent-processors-uskoryaet-rabotu-pk-i-pozvolyaet-ekonomit-energiyu/> (accessed: 07 November 2014).

22. Advanced Configuration and Power Interface (ACPI), available at: <http://www.acpi.info/> (accessed: 07 November 2014).

23. Green500, available at: <http://www.green500.org/> (accessed: 07 November 2014).

24. International Conference on Energy Aware Computing (ICEAC) 2011, available: <http://www.bvents.com/event/401773-international-conference-on-energy-aware-computing-iceac> (accessed: 25 October 2014).

25. The International Conference on Green Computing, Intelligent and Renewable Energies (GCIRE2015), available at: <http://www.clocate.com/conference/The-International-Conference-on-Green-Computing-Intelligent-and-Renewable-Energies-GCIRE2015/47730/> (accessed: 26 October 2014).

26. Optoinformatika [Optoinformatics], available at: <http://edu.glavsprav.ru/spb/vpo/journal/506/> (accessed: 26 October 2014).

27. Adiabatic circuits, available at: <http://www.adv-radio-sci.net/1/247/2003/ars-1-247-2003.pdf> (accessed: 29 October 2014; 02 November 2014).

28. Losev V.V. Issledovanie i razrabotka elementnoi bazy tsifrovyykh ustroystv obrabotki informatsii na osnove printsipa termodinamicheskoi obratimosti [Research and development of element basis of digital processing devices of information on the basis of the principle of thermodynamic reversibility], available at: <http://tekhnosfera.com/issledovanie-i-razrabotka-elementnoy-bazy-tsifrovyyh-ustroystv-obrabotki-informatsii-na-osnove-print-sipa-termodinamicheskoi> (accessed: 02 November 2014).

29. Sokolov I.A., Stepchenkov Iu.A., Petrukhin V.S., D'iachenko Iu.G., Zakharov V.N.. Samosinkhronnaia skhemotekhnika – perspektivnyi put' realizatsii apparatury [The self-synchronous circuit engineering – a perspective way of implementation of equipment], available at: <http://uchebana5.ru/cont/1639604.html> (accessed: 02 November 2014).

30. Tiurin S.F. Retention of functional completeness of Boolean functions under «failures» of the arguments. *Automation and Remote Control*, 1999, no. 60, pp. 1360-1367.

31. Tiurin S., Kharchenko V. Redundant Bases for Critical Systems and Infrastructures General Approach and Variants of Implementation. *Proceedings of the 1st International Workshop on Critical Infrastructures Safety and Security*; Kirovograd, Ukraine, 2011, no. 2, pp. 300-307.

32. Tiurin S.F., Grekov A.V., Gromov O.A. The principle of recovery logic FPGA for critical applications by adapting to failures of logic elements. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 26 (3), pp. 328-332. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.26.03.13474

33. Tiurin S.F., Gromov O.A. A residual basis search algorithm of fault-tolerant programmable logic integrated circuits. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84 (11), pp. 647–651. DOI: 10.3103/S1068371213110163

34. Kamenskikh A.N., Tiurin S.F. Application of redundant basis elements to increase self-timed circuits reliability Proceedings of the 2014. *IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRusNW 2014*.

35. Tiurin S.F., Plotnikova A.Iu. Kontseptsiiia zelenoi logiki [Concept of green logic]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2013, no. 8, pp. 61-72.

36. Shaltyrev V.A. Sredstva i metody povysheniia proizvoditel'nosti i snizheniia energopotrebleniia sistem na kristalle, realizuemykh na bazeprogrammiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh: dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk [Means and methods of increase of productivity and lowering of energy consumption of the systems on a crystal realized on the bazeprogrammuyemykh logic integrated circuits: thesis of Candidate of Technical Sciences]: 05.13.05. Natsional'nyi issledovatel'skii iadernyi universitet «MIFI». Moscow, 2009.

Сведения об авторе

Тюрин Сергей Феофентович (Пермь, Россия) – заслуженный изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru).

About the author

Tyurin Sergey Feofentovich (Perm, Russian Federation) is Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru).

Получено 20.02.2015