

Особенности подсистемы управления энергопотреблением современных встраиваемых процессорных модулей

Александр Локотков

ВВЕДЕНИЕ

В современных встраиваемых вычислительных системах на базе процессоров i486 имеется подсистема управления энергопотреблением, предназначенная для выполнения следующих функций:

1. Периодическое снижение тактовой частоты процессора для уменьшения потребляемой мощности на основе анализа интенсивности выполняемых операций обмена по системной магистрали с последующим восстановлением быстродействия по одному или нескольким предварительно заданным событиям. Данный режим носит название режима замедления (DOZE) и управляется как на уровне аппаратных, так и на уровне программных средств путем обработки прерывания SMI.

2. Периодическое уменьшение тактовой частоты процессора для автоматического снижения тепловой нагрузки с последующим восстановлением.

3. Периодическое отключение устройств, присутствующих на системной магистрали, с последующим восстановлением по одному или нескольким предварительно заданным событиям. К устройствам относятся коммуникационные и параллельные порты, дисковые накопители и др. Данный режим носит название режима приостановки (IDLE) и управляется как на уровне аппаратных, так и на уровне программных средств посредством обработки прерывания SMI. Существует возможность остановки системного тактового генератора и отключения всех устройств на локальной магистрали (режим SUSPEND). Данный режим может быть инициирован только под управлением системного программного обеспечения, выполненного в соответствии с требованиями спецификации Advanced Power Management 1.0.

4. Сохранение на диске системного контекста при возникновении события, связанного с нарушением работоспособности источника первичного питания, с последующим восстановлением. Использование данной функции во встраиваемых системах видится не всегда целесообразным, поскольку восстановление работоспособности и перезапуск системы может потребовать участия обслуживающего персонала. Кроме того, при управлении реальным объектом восстановление старого контекста через неопределенный промежуток времени может привести к непредсказуемым последствиям.

Следует отметить, что если встраиваемый процессорный модуль на базе процессора 486-DX4 или 586-133 не оснащен подсистемой управления энергопотреблением, то при максимальном быстродействии в силу ряда причин, основной из которых является высокое тепловое сопротивление между кристаллом и радиатором для корпуса SQFP 208, верхняя рабочая температура системы без использования принудительного охлаждения не должна быть выше 55°C. Так как процессорный модуль 5066 фирмы Octagon Systems достаточно широко используется для встраивания в различные системы, дальнейшее изложение будет основано на примере именно этого модуля.

ПОДСИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ МОДУЛЯ ЦП 5066 OCTAGON SYSTEMS

Подсистема управления энергопотреблением (далее — ПУЭ) модуля 5066 выполнена на основе однокристалльного устройства управления памятью и периферией типа 82C465MVA фирмы Orti. Детальное описание ПУЭ модуля 5066 приведено в документации «Модуль центрального процессора 5066. Руководство пользователя». Для получения более подробной информации по применению 82C465MVA следует обратиться к «82C465MV/MVA/MVB. Single-Chip Mixed Voltage Notebook Solution. Data Book». В модуле 5066 реализована поддержка всех перечисленных функций подсистемы управления энергопотреблением. Настройка ПУЭ 5066 выполняется с помощью программ SETUP и PMISSETUP, находящихся на твердотельных дисках модуля.

В данной статье приводится более подробное, чем в руководстве пользователя, описание механизма охлаждения делением тактовой частоты процессора (Cool Down Clocking) и режима DOZE (замедление), поскольку сведений руководства пользователя недостаточно для понимания принципов функционирования системы.

Описание режимов подсистемы управления энергопотреблением 5066

Режим полной производительности

В указанном режиме центральный процессор и устройства, находящиеся на локальной системной магистрали, функционируют при максимальном значении тактовой частоты (33 МГц на магистрали, 133 МГц — тактовая частота процессора). При этом процессор находится в состоянии повышенной тепловой нагрузки.



Модуль ЦП 5066 Octagon Systems

При чтении последующего материала следует учитывать, что внутренняя тактовая частота микропроцессора 5x86/133 всегда равна учетверенной частоте системной магистрали. Поэтому понижение тактовой частоты системной магистрали автоматически приводит к соответствующему уменьшению тактовой частоты самого микропроцессора.

Режим замедления (DOZE)

Данный режим предназначен для снижения потребляемой мощности на короткие интервалы времени при отсутствии активности на системной магистрали в течение коротких интервалов времени.

Перевод системы в указанный режим осуществляется под управлением встроенных аппаратных средств 82C465. В состав 82C465 входят так называемые DOZE-таймеры, содержимое одного из которых устанавливается при инициализации системы и определяет интервал времени, по истечении которого при отсутствии предварительно заданных событий происходит деление тактовой частоты системной магистрали на предварительно заданный коэффициент (на 4 в 5066) либо полная остановка тактового генератора. Под событием подразумевается прерывание по одной или нескольким линиям:

IRQ0, IRQ3, IRQ4, IRQ5, IRQ7, IRQ8, IRQ12, IRQ13.

Интервал первого DOZE-таймера может принимать значение 0, 2 или 8 с, причем нулевое значение соответствует блокированию таймера.

Режим замедления настраивается с помощью программ SETUP и PMISSETUP следующим образом.

1. Запустив программу SETUP, установить следующие параметры:

```
Power Management: ENABLED
DOZE Clock (Slow, Stop): SLOW
Time Updated After Suspend: DISABLED
```

2. С помощью программы PMISSETUP сохранить на одном из дисков 5066 текущие значения параметров подсистемы управления энергопотреблением:

```
PMISSETUP /SHOWALL > drive:\CURRENT.PMI
```

3. Выгрузить на диск ПЭВМ файл CURRENT.PMI в соответствии с указаниями руководства пользователя на 5066.

4. С помощью любого текстового редактора изменить содержимое файла CURRENT.PMI следующим образом:

- удалить начальное сообщение программы PMISSETUP, находящееся в начале файла, до строки «pmi-enable = Y»
- если в системе необходимо обеспечить минимальный интервал для DOZE-таймера, по истечении которого произойдет переключение в режим DOZE, следует присвоить параметру doze-delay значение 2. При этом после сохранения измененной конфигурации в случае отсутствия событий, информация о которых приведена далее, будет происходить деление тактовой частоты системной магистрали на 4 (до 8 МГц). Максимальный интервал для DOZE-таймера составляет 8 с. **Если присвоить параметру doze-delay значение 0, то это приведет к блокированию первого DOZE-таймера и перевод системы в режим замедления станет невозможным;**
- установить события, возникновение которых будет приводить к перезагрузке DOZE-таймера (в таймер будет записываться начальное значение, и система продолжит работу в режиме полной производительности). Указанные события описываются следующими параметрами:

```
IRQ0-reset-doze
IRQ3-reset-doze
IRQ4-reset-doze
IRQ5-reset-doze
IRQ7-reset-doze
```

```
IRQ8-reset-doze
IRQ12-reset-doze
IRQ13-reset-doze
```

В случае, если какой-либо из перечисленных параметров имеет значение Y, то прерывание по соответствующей линии будет приводить к перезагрузке первого DOZE-таймера, после чего система продолжит работу в режиме полной производительности.

5. Загрузить модифицированный файл CURRENT.PMI на один из дисков 5066 в соответствии с указаниями руководства пользователя на 5066.

6. Для сохранения параметров подсистемы управления энергопотреблением в ППЗУ с последовательным доступом 5066 следует запустить программу PMISSETUP следующим образом:

```
PMISSETUP.EXE CURRENT.PMI
```

7. Для того чтобы новые значения параметров вступили в силу, следует выполнить повторную загрузку системы.

Второй DOZE-таймер предназначен для генерации периодических прерываний в случае, если параметр SETUP DOZE Clock (Slow, Stop) имеет значение STOP и необходимо обновлять системное время 5066. Тогда после установки параметра Time Updated After Suspend: ENABLED при остановке тактового генератора по прерыванию от второго DOZE-таймера будет происходить переход в режим полной производительности для обновления часов. Следует отметить, что данная функция должна применяться только при работе под управлением операционных систем, в которых не используются часы/календарь (IRQ8).

Режим автоматического охлаждения делением тактовой частоты

Интеллектуальное устройство управления памятью и периферией 82C465MVA фирмы Opti позволяет реализовать функцию автоматического охлаждения центрального процессора (далее — ЦП) путем деления тактовой частоты. Данная функция может выполняться как путем непосредственного измерения температуры вблизи кристалла с помощью твердотельного полупроводникового датчика, так и при отсутствии оно. В модуле 5066 датчик отсутствует, поэтому далее будет описан алгоритм интегро-дифференциальной косвенной оценки, используемый в 5066. Предполагается, что температура кристалла прямо пропорциональна времени работы при полной тактовой частоте. Таким образом, для качественного измерения степени нагрева кристалла ЦП 82C465 считает количество периодов тактовой частоты системной магистрали через заданные интервалы времени. Для оценки используются 3 уровня, характеризующих степень нагрева.

1. **Нормальный тепловой режим (Idle Condition)** — корпус процессора при касании кажется холодным. Процессор функционирует при максимальном значении тактовой частоты. Никакого вмешательства подсистемы управления энергопотреблением (далее — ПУЭ) не требуется.

2. **Промежуточный тепловой режим (Equilibrium Condition)** — корпус процессора теплый на ощупь. Процессор функционирует при максимальном значении тактовой частоты, но время от времени переводится в режим Doze (замедление) в интервалы отсутствия активности на системной магистрали либо в программно управляемый режим приостановки (Suspend). Промежуточному тепловому режиму ставится в соответствие некое значение EQL6:0 (6:0 — биты с нулевого по шестой регистра SYSCFG с адресом A5H 82C465). Данное значение зависит от типа применяемого ЦП.

3. **Экстремальный тепловой режим (Thermal Runaway Condition)** — корпус процессора горячий при касании.

Процессор не успевает отводить выделяемое тепло даже при периодическом переходе в режимы замедления и приостановки. Экстремальному тепловому режиму ставится в соответствие значение OTL7:0 (SYSCFG A6H).

Оценка активности ЦП

В составе 82C465 имеется 24-разрядный счетчик активности ЦП (CNT), к содержимому которого на каждом такте добавляется приращение уровня мощности, определяемое по нескольким критериям.

Критерий 1 — зависимость от текущего режима управления энергопотреблением в соответствии с табл. 1.

Критерий 2 — зависимость от типа ЦП (наличие/отсутствие умножения частоты магистрали при вводе в ЦП). Дан-

Таблица 1. Зависимость от текущего режима управления энергопотреблением

Текущий режим ЦП	Приращение
Полная тактовая частота магистрали	+2
Деление тактовой частоты магистрали на 2 или 3 (Doze)	+1
Деление тактовой частоты магистрали на 4	0
Деление тактовой частоты магистрали на 8	-1
Деление тактовой частоты магистрали на 16 и более	-2
Останов тактового генератора (Suspend)	-2

ную зависимость отражают два старших разряда регистра SYSCFG A7H (CPUE7:6) следующим образом: при работе с утроением или учетверением тактовой частоты биты эффективности ЦП задают дополнительное увеличение приращения CNT на 3, если приращение в текущем режиме управления энергопотреблением больше нуля.

Встроенные аппаратные средства 82C465 измеряют активность ЦП на интервалах 31, 61, 122 или 244 мкс. Один раз в течение одного из указанных интервалов происходит добавление к текущему значению CNT приращений в соответствии с критерием 1 и критерием 2. Анализ содержимого CNT производится один раз в 32, 64, 128 или 256 с. Интервалы инкремента CNT и анализа его содержимого однозначно связаны в указанном порядке. Выбор интервалов задается при загрузке системы путем записи соответствующего значения в регистр SYSCFG с адресом A7H в соответствии с табл. 2.

Алгоритм определения текущего температурного режима

Один раз на интервале инкремента производится добавление к текущему значению CNT приращений в соответствии с критериями 1 и 2. Анализ содержимого CNT производится один раз в 32, 64, 128 или 256 с. Если в результате анализа (сравнения) старший байт содержимого CNT превышает уровень OTL, выполняется деление тактовой частоты магистрали на CDCR1:0, что и означает перевод системы в режим принудительного охлаждения. Тактовая частота восстанавливается по истечении интервала CDT01:0 со сбросом в 0 счетчика CNT. Если в результате анализа (сравнения) старший байт содержимого CNT превышает уровень EQL, но не превышает OTL, то из старшего байта CNT вычитается значение EQL и разность записывается в старший байт CNT, после чего цикл возобновляется. Если в результате анализа (сравнения) старший байт содержимого CNT не превышает уровень EQL, то содержимое CNT сбрасывается в 0 и цикл оценки возобновляется.

Рассмотрим описанный механизм на примере модуля 5066.

Предположим, что в системе не используется программно управляемый режим SUSPEND

(приостановка), но используется режим аппаратного замедления DOZE, при переходе в который тактовая частота системной магистрали (33 МГц) делится на 4 (до 8 МГц).

При полной тактовой частоте приращение счетчика составляет +2. Значения в регистрах:

```
CPUE1:0 = 11 (+3)
CNH01:0 = 00 (32 с, 31 мкс)
CDCR1:0 = 00 (делим на 2 при охлаждении)
CDT01:0 = 00 (2•32=64 с)
EQL6:0 = 1001010 (4АН)
OTL7:0 = 10001111 (8FH)
```

Пусть настройка ПУЭ выполнена таким образом, что прерывания и операции доступа процессора к внешним устройствам и памяти успевают перезагрузить DOZE-таймер до обнуления его содержимого, что не позволяет системе перейти в режим замедления. Тогда на первом интервале анализа CNT будет увеличен от 0 до

```
32 (с) • (+3+2) • 1/31 (мкс) = 160 • 32258 = 5161280 = 04EC140H
4АН < Старший байт = 4EH < 8FH => 4EH - 4АН = 4H
Возвращаем в CNT 04C140H
интервал (прошло 64 с)
CNT = 4C140H + 4EC140H = 538280H
4АН < Старший байт = 53H < 8FH => 53H - 4АН = 9H
Возвращаем в CNT 098280H
интервал (прошло 96 с)
CNT = 98280H + 4EC140H = 5843C0H
4АН < Старший байт = 58H < 8FH => 58H - 4АН = 0EH
Возвращаем в CNT 0E43C0H
интервал (прошло 128 с)
CNT = 0E43C0H + 4EC140H = 5D0500H
...
...
...
14-й интервал (прошло 448 с = 7,5 мин)
CNT = 8F...H
```

Уровень OTL достигнут, и тактовая частота системной магистрали будет снижена с 33 до 16,5 МГц. Данное состояние будет удерживаться в течение 1 минуты, после чего счетчик активности CNT будет сброшен, а работа магистрали при полной тактовой частоте будет продолжена.

Таблица 2. Значения регистра SYSCFG

Регистр SYSCFG A7H			
Биты	Назначение		
D7-D6 (CPUE)	Активность процессора		
	00		
	01		
	11 — AMD 5x86-133, Intel DX4-100		
D5-D4 (CDH01:0)	Значение	Интервал анализа	Интервал инкремента
	00 (5066 CPU Card)	32 с	31 мкс
	01	64 с	61 мкс
	10	128 с	122 мкс
	11	256 с	244 мкс
D3-D2 (CDCR1:0)	Значение	Делитель тактовой частоты системной (локальной) магистрали при переходе в режим охлаждения	
	00 (5066 CPU Card)	2	
	01	3	
	10	4	
	11	8	
D1-D0 (CDT01:0)	Значение	Интервал нахождения в режиме охлаждения	
	00 (5066 CPU Card)	2×Интервал анализа	
	01	3×Интервал анализа	
	10	4×Интервал анализа	
	11	5×Интервал анализа	

Предположим, что в течение 2 с на каждом интервале анализа (32 с) система будет переводиться в режим замедления (DOZE 8 МГц). Тогда приращение счетчика CNT на каждом интервале анализа будет составлять:

$$30(c) \cdot (+3+2) \cdot 1/31(\text{мкс}) + 2(c) \cdot (0) \cdot 1/31(\text{мкс}) = 4838709 = 49\text{D}535\text{H}$$

Из этого следует, что тепловой режим процессора будет оцениваться как нормальный (49H < EQL(4AH)).

Предположим, что в течение 500 мс на каждом интервале анализа (32 с) система будет переводиться в режим замедления (DOZE 8 МГц). Приращение счетчика CNT на каждом интервале анализа будет составлять:

$$31,5(c) \cdot (+3+2) \cdot 1/31(\text{мкс}) + 0,5(c) \cdot (0) \cdot 1/31(\text{мкс}) = 5080645 = 4\text{D}8645\text{H}$$

Тогда переход в режим охлаждения произойдет примерно через 29-30 интервалов анализа, что составляет 928-960 с (15,5-16,0 мин).

Программа просмотра/настройки параметров ПУЭ PMISSETUP имеет недокументированный ключ запуска, который позволяет вывести/установить параметры режима охлаждения:

```
PMISSETUP /SHOWALL /R > CDCPMI.TXT
```

```
.. ..
thermal-management = Y
cool-down-to = 2x
cool-down-clock = 2/
cool-down-holdoff = 32
cool-down-cpu-speed = VERY-HIGH
equilibrium-level = 64
overtemp-limit = 127
.. ..
```

Это говорит о том, что описанные здесь параметры подсистемы охлаждения делением тактовой частоты 82C465 реально имеют следующие значения:

```
CPUE1:0 = 11 (+3)
CHN01:0 = 00 (32с, 31мкс)
CDCR1:0 = 00 (делим на 2 при охлаждении)
CDT01:0 = 00 (2•32=64 с)
EQL6:0 = 40H
OTL7:0 = 7FH
```

Таким образом, имеется возможность поднять уровни EQL и OTL, что приведет к увеличению соотношения работы в режимах полной и половинной тактовой частоты.

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ СИСТЕМ С ПУЭ

При разработке программного обеспечения необходимо учитывать, что при включенной ПУЭ быстродействие системы не является постоянным. Поэтому при формировании или измерении интервалов времени программным способом необходимо использовать адаптивные алгоритмы, подстраивающиеся под текущее значение тактовой частоты процессора. В системах жесткого реального времени, где необходимо завершить определенный объем вычислений за фиксированный промежуток времени (например каждые 2 мкс), необходимо проводить отладку программного обеспечения для «наихудшего случая», когда тактовая частота в системе минимальна.

В модуле 5066 реализован механизм охлаждения делением тактовой частоты, а также режим замедления, при переходе в который частота системной магистрали делится на 2. Необходимо учитывать тот факт, что даже при блокировании DOZE-таймера (doze-delay = 0) частота системной магистрали делится на 2 один раз в 128 с. Данный режим будет удерживаться в течение 64 с. Работоспособность модуля 5066 в заяв-

ленном диапазоне рабочих температур гарантируется только при включенном механизме автоматического охлаждения (thermal-management = Y) либо при выключенной ПУЭ, но при уменьшенной тактовой частоте микропроцессора (Limit CPU to HALF speed: YES).

ВЫВОДЫ

1. Если необходимо обеспечить максимально возможное быстродействие системы, следует полностью блокировать систему ПУЭС с помощью программы PMISSETUP:

```
thermal management = N
pmi-enable = N
doze-delay = 0
```

и установить максимальную тактовую частоту микропроцессора программой SETUP

```
Limit CPU to HALF speed: No
```

При этом без принудительного воздушного охлаждения максимальная рабочая температура окружающего воздуха, при которой не происходит ухудшение MTBF микропроцессора, составляет 55°C.

2. В случае, если требуется достичь минимального потребления мощности при отсутствии в прикладной программе подсистемы программного управления ПУЭ в соответствии с АРМ 1.1, следует выполнить настройку параметров ПУЭ следующим образом:

```
pmi-enable = Y
doze-delay = 2
irq0-reset-doze = N
```

Однако при этом должен быть предусмотрен способ вывода системы из режима замедления путем использования какого-либо события (прерывания).

3. В случае, если необходимо обеспечить работу системы с максимальной производительностью и с предсказуемым замедлением тактовой частоты процессора, следует установить следующие параметры ПУЭ:

```
pmi-enable = Y
doze-delay = 0
```

При этом система будет 1 раз в 128 с переходить в режим охлаждения делением тактовой частоты на 2. Данный режим будет удерживаться в течение 64 с.

4. В случае, если требуется обеспечить максимальное соотношение интервалов времени, в течение которых процессор функционирует при максимальной и пониженной тактовой частоте, следует установить следующие параметры ПУЭ:

```
pmi-enable = Y
doze-delay = 0
equilibrium-level = от 70 до 120 (максимум - 127)
overtemp-limit = от 130 до 250 (максимум - 255)
```

5. Если требуется обеспечить работу системы при одном и том же фиксированном значении тактовой частоты, следует задать следующие параметры.

● С помощью программы PMISSETUP установить:

```
pmi-enable = Y
doze-delay = 0
```

● С помощью программы SETUP установить:

```
Limit CPU to HALF speed: YES
```

В результате процессор будет всегда функционировать в режиме половинного энергопотребления при тактовой частоте 66 МГц без замедления. ●