

А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ „ХОЛОСТЫХ” ТАКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЖИМА ТРОТТЛИНГА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРОЦЕССОРА ОТ ПЕРЕГРЕВА

Аннотация. Предложена простая аппаратная реализация режима троттлинга процессора. Выполнен расчет длительности „холостых” тактов процессора в режиме троттлинга. При перегреве, когда процессор выполняет энергоемкие участки программы, троттлинг обеспечивает ограничение температуры на уровне 68 °С.

Ключевые слова: режим троттлинга процессора, критический терморезистор, защита процессора от перегрева.

Введение. Сущность режима троттлинга (throttling) заключается в модуляции тактового сигнала процессора для управления энергопотреблением [1]. В режиме троттлинга уменьшается количество „полезных” тактов, в которых процессор выполняет код машинных команд и увеличивается число „холостых” тактов, в которых он простаивает. Такой режим уменьшает загрузку процессора, как следствие энергопотребление снижается. В работе [2] описана простая аппаратная реализация режима троттлинга, позволяющая обеспечить эффективную защиту центрального процессора компьютера от перегрева. Эта реализации использует критические терморезисторы на основе диоксида ванадия (VO_2), которые сочетают свойства датчика температуры и термического реле, переключающегося при температуре $T_t \sim 68^\circ\text{C}$, близкой к граничным рабочим температурам процессоров $\sim 80 - 90^\circ\text{C}$ [1,3]. Пленочный критический терморезистор на основе VO_2 , включенный в цепь управления энергопотреблением, может размещаться непосредственно на кристалле процессора для контроля его температуры.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является анализ кинетики температуры пленочного критического терморезистора на основе VO_2 , включенного в цепь управления энергопотреблением

процессора, для определения длительности „холостых” тактов режима троттлинга.

Основная часть. На рис. 1а показана схема защиты процессора от перегрева, путем его перевода в режим троттлинга. Пленочный критический терморезистор на основе диоксида ванадия R_t , совместно с резистором R образует делитель напряжения, формирующий сигнал для логического вентиля DD1, управляющего подачей импульсов тактового генератора ГТИ в схему процессора.

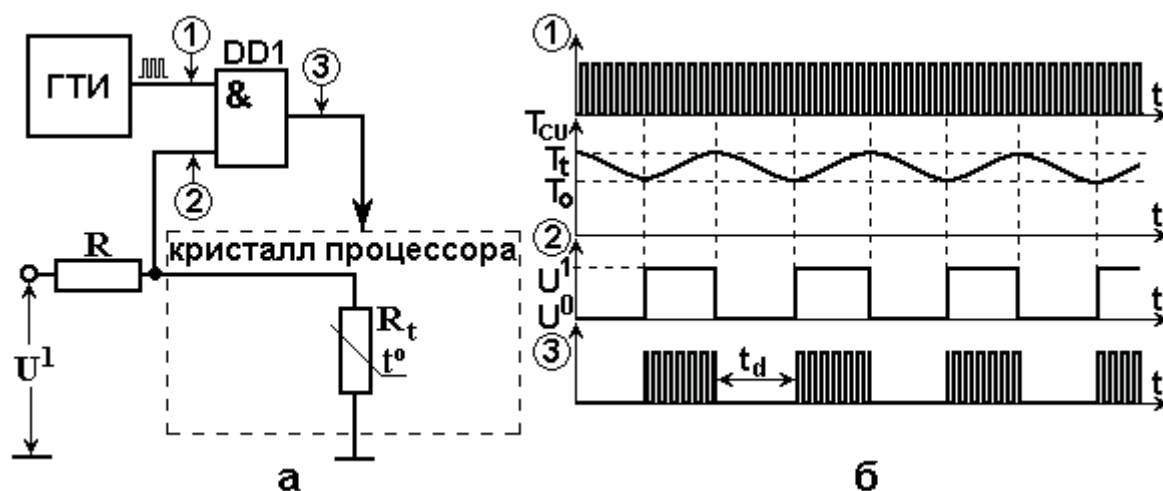


Рисунок 1 - Схема защиты процессора от перегрева (а) и временные диаграммы, поясняющие ее работу (б)

Принцип работы схемы основан на свойстве критических терморезисторов на основе VO_2 , при переходе через температуру $T_t \sim 68$ °С, скачком изменять величину сопротивления R_t от значения $R_t = R_{off}$, (при $T < T_t$) до значения $R_t = R_{on}$ (при $T > T_t$). Отношение сопротивлений R_{off}/R_{on} обычно близко или превышает 100. Как показано в [2], необходимый для управления элементом DD1 перепад напряжения между логическими уровнями U^1 и U^0 обеспечивается при выборе значения сопротивления R по формуле:

$$R = \sqrt{R_{off} R_{on}}. \quad (1)$$

Временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы, приведенной на рис. 1а, показаны на рис. 1б. Когда при выполнении программы процессор нагревается до температуры $T_{CU} = T_t \sim 68$ °С, критический терморезистор переключается из состояния с высоким сопротивлением $R_t = R_{off}$ в состояние с низким сопротивлением $R_t = R_{on}$. Напряжение на выходе делителя скачком уменьшается от высоко уровня U^1 к низкому уровню U^0 (рис. 1б, временная диаграмма 2). Логический элемент „2И” DD1 блокирует подачу тактовых импульсов

в схему ядра процессора (рис. 1б, временная диаграмма 3) и он перестает выполнять программный код. Такой режим работы процессора называют режимом „холостых” тактов [1]. Энергопотребление процессора при выполнении „холостых” тактов резко снижается, и он начинает остывать. Когда через интервал времени t_d температура процессора снижается до значения $T_{CU} = T_o$, критический терморезистор переключается в состояние с высоким сопротивлением $R_t = R_{off}$. На выходе делителя напряжения появляется уровень логической единицы U^1 , деблокирующий подачу тактовых импульсов через логический элемент DD1 в схему ядра процессора. Процессор вновь начинает выполнять программный код. Таким образом, простая схема, приведенная на рис. 1а, предотвращает перегрев процессора при выполнении программы.

Рассчитаем длительность „холостых” тактов t_d и температуру T_o , до которой охлаждается процессор в режиме троттлинга, описанном выше. Используем упрощенную модель, не учитывающую распределение температуры и предполагающую, что температурный режим критического терморезистора целиком определяется теплообменом между ним и процессором. Тогда, если коэффициент теплообмена K_T , температура критического терморезистора T , а температура процессора изменяется во времени по закону $T_{CU}(t)$, то тепловая мощность, рассеиваемая терморезистором в любой момент времени t равна $K_T(T - T_{CU}(t))$. При $T_{CU}(t) > T$ рассеиваемая мощность отрицательна. Это означает, что тепло передается от процессора к терморезистору, и он нагревается. Такому случаю соответствуют интервалы на временных диаграммах (рис. 1б), когда на процессор поступают тактовые импульсы, и он выполняет программу.

Когда критический терморезистор нагревается до температуры T_t и переключается в состояние с малым сопротивлением R_{on} , энергопотребление процессора резко снижается, и он остывает. Начинает выполняться условие $T_{CU}(t) < T$, при котором рассеиваемая терморезистором мощность положительна. Это означает, что тепло передается от терморезистора к процессору, и терморезистор должен остывать. Однако, для того, чтобы температура критического терморезистора стала меньше температуры T_t и он переключился в состояние с высоким сопротивлением R_{off} , должна рассеяться теплота фазового перехода металл-полупроводник, накопленная ранее в рабочем теле тер-

морезистора. Поэтому интервал времени t_d (рис. 1б), определяющий длительность „холостых” тактов, фактически является временем необходимым для отвода из рабочего тела терморезистора скрытой теплоты фазового перехода металл-полупроводник. В течение времени t_d температура терморезистора не изменяется и остается равной T_t , а мощность, которую он рассеивает, равна $K_T (T_t - T_{CU}(t))$. Проинтегрировав эту мощность по интервалу времени $0 \leq t \leq t_d$ можно найти скрытую теплоту фазового перехода металл-полупроводник W_t накопленную в рабочем теле критического терморезистора:

$$W_t = \int_0^{t_d} K_T (T_t - T_{CU}(t)) dt. \quad (2)$$

Пусть пленочный терморезистор на основе VO_2 имеет толщину d и площадь S . Тогда теплота фазового перехода, накопленная в рабочем теле терморезистора, равна $W_t = H_t d S \rho_v$ (здесь H_t – удельная энтальпия фазового перехода металл-полупроводник, ρ_v – плотность диоксида ванадия). Приравняв это значение W_t значению теплоты, определенному соотношением (2), и введя удельный коэффициент теплообмена $k_T = K_T/S$, можно получить уравнение для длительности „холостых” тактов t_d :

$$H_t d \rho_v = \int_0^{t_d} k_T (T_t - T_{CU}(t)) dt \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет найти величину t_d , если известна зависимость температуры процессора от времени в режиме „холостых” тактов. Такую зависимость найдем, приняв, что в режиме „холостых” тактов можно пренебречь энергией потребляемой процессором от источника питания, а в силу малости размеров терморезистора по сравнению с размерами кристалла процессора – пренебречь влиянием терморезистора на тепловой режим процессора.

В этом случае уравнение теплового баланса процессора имеет вид:

$$\frac{dT_{CU}}{dt} + \frac{T_{CU} - Q}{\tau} = 0, \quad (4)$$

где τ – тепловая постоянная времени процессора; Q – температура окружающей среды.

Решение дифференциального уравнения (4) при начальных условиях $t = 0$, $T_{CU}(0) = T_t$ имеет вид:

$$T_{CU}(t) = Q + (T_t - Q) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (5)$$

Подставив (5) в (3) и выполнив интегрирование можно получить следующее уравнение для длительности „холостых” тактов t_d :

$$\frac{H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)} = \frac{t_d}{\tau} + \exp\left(-\frac{t_d}{\tau}\right) - 1. \quad (6)$$

Уравнение (6) трансцендентное и допускает решение только в численном виде. Его можно упростить, если учесть, что $t_d/\tau \ll 1$. Разложив экспоненту в ряд и, ограничившись тремя членами разложения, получим:

$$\frac{H_t d \rho_v}{k_T (T_t - Q)} = \frac{t_d^2}{2\tau}. \quad (7)$$

Откуда вытекает формула для длительности „холостых” тактов при использовании режима троттлинга для защиты процессора компьютера от перегрева:

$$t_d = \sqrt{\frac{2\tau H_t d \rho_v}{k_T (T_t - Q)}}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (5) можно найти температуру T_o (см. рис. 1б), до которой будет охлаждаться кристалл процессора за время „холостых” тактов:

$$T_o = Q + (T_t - Q) \exp\left(-\sqrt{\frac{2 H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)}}\right). \quad (9)$$

Из (9) вытекает, что относительное уменьшение температуры кристалла процессора $\gamma = \frac{(T_t - T_o)}{(T_t - Q)} 100\%$ за время t_d , равно:

$$\gamma = \left(1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{2 H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)}}\right)\right) \times 100\%. \quad (10)$$

Из соотношения (8) видно, что длительностью „холостых” тактов t_d можно управлять, изменяя толщину d пленки критического терморезистора на основе VO_2 , тепловую постоянную времени процессора τ и температуру окружающей среды Q . Тепловую постоянную времени процессора τ можно варьировать, с помощью радиаторов и кулеров. Остальные величины, входящие в формулу (8) являются физическими константами.

Оценим длительность „холостых” тактов t_d и относительное уменьшение температуры кристалла процессора γ за время t_d . Известно [4], что для диоксида ванадия $H_t = 51,7 \text{ Дж}\cdot\text{г}^{-1}$; $\rho_v = 4,4 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, $T_t = 68 \text{ }^\circ\text{C}$. Если пленочный критический терморезистор на основе VO_2 имеет толщину $d = 1 \text{ мкм}$, при $\tau = 60 \text{ с}$, $Q = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $k_T = 10^{-1} \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$, получим $t_d = 0,75 \text{ с}$, $\gamma = 1,25 \text{ \%}$. Выполнив при тех же параметрах расчет для случая $d = 10 \text{ мкм}$ найдем $t_d = 2,38 \text{ с}$, $\gamma = 3,9 \text{ \%}$.

Таким образом, при обработке энергоемких участков программы, в случае перегрева, температура процессора в режиме троттлинга, рассмотренном выше, будет испытывать небольшие колебания вблизи температуры $T_t = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ фазового перехода металл-полупроводник в VO_2 , не превышая эту температуру. За счет простоя процессора в интервалы времени t_d производительность обработки информации снизится, однако, опасный перегрев процессора, связанный с интенсивным выполнением машинных команд будет предотвращен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Функции управления производительностью и энергопотреблением процессоров Intel Pentium 4 и Intel Xeon. Часть 2: новые процессоры, новые технологии [Электронный ресурс] / Д. Беседин // iXBT – 2004 – Режим доступа: <http://www.dvgu.ru/meteo/PC/IntelThermal-2.html>.
2. А.И. Ивон, А.А. Андреев, Л.А. Можаровский, Использование критических терморезисторов для аппаратной реализации режима троттлинга центрального процессора // Системные технологии: сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2009. – В. 1 (60). – С. 87 – 92.
3. Защита процессоров AMD от перегрева (Обзор) [Электронный ресурс] / А. Карабуто // FERRA.RU – 2002 – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/system/s19535/>
4. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов: [Справочник] / Г.В.Самсонов, А.Л.Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с