

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА В РЕЖИМЕ ТРОТТЛИНГА

Аннотация. Выполнен анализ производительности процессора в режиме троттлинга при его аппаратной реализации, с помощью критических терморезисторов на основе VO_2 . Показано, что если средняя затрата энергии на одну машинную команду E_{in} не превышает минимальную энергию $E_{in\ min}$ вызывающую режим троттлинга, процессор работает с производительностью, отвечающей нормальному тепловому режиму. При $E_{in} \geq E_{in\ min}$ производительность процессора уменьшается обратно пропорционально значению E_{in} .

Ключевые слова: производительность процессора, режим троттлинга, защита процессора от перегрева.

Введение. Для современной вычислительной техники характерна тенденция роста степени интеграции микросхем и увеличения количества команд, выполняемых за один такт. В связи с этим актуальной проблемой является обеспечение нормального теплового режима процессора [1, 2]. При выполнении блоков программы, требующих энергоемких аппаратных ресурсов, возникает перегрев, следствием которого может стать выход из строя СБИС процессора. Эффективным средством борьбы с перегревом, в таком случае, является перевод процессора в режим троттлинга [1]. В этом режиме уменьшается количество „полезных” тактов, в которых процессор выполняет машинные команды и увеличивается число „холостых” тактов, в которых он простаивает. Как следствие энергопотребление снижается и процессор остывает.

Простой способ аппаратной реализации режима троттлинга для защиты процессора от перегрева предложен в работах [3,4]. Этот способ использует критический терморезистор на основе пленки диоксида ванадия, который в области температуры $T_t = 68^\circ\text{C}$ скачком изменяет электрическое сопротивление не менее чем в 100 раз. Такой терморезистор создается непосредственно на кристалле процессора, и

переключается в состояние с низким сопротивлением, когда температура процессорного чипа достигнет 68 °С.

При реализации режима троттлинга возникает вопрос о том, насколько будет снижена производительность процессора по сравнению с нормальным тепловым режимом его работы.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является анализ производительности процессора в режиме троттлинга при его аппаратной реализации, использующей критический терморезистор на основе VO_2 .

Основная часть. При анализе производительности процессора будем исходить из тактовой частоты f и количества машинных команд n , выполняемых за один такт. Тогда, в нормальном тепловом режиме, производительность равна:

$$PT_0 = nf. \quad (1)$$

Если при обработке блока программы средняя энергия, затрачиваемая на выполнение одной машинной команды E_{in} , то в процессоре выделяется мощность nfE_{in} . Для упрощения анализа примем, что температура T_{CU} одинакова во всех точках процессорного чипа, а температура окружающей среды равна Q . Тогда уравнением теплового баланса процессора имеет вид:

$$C_{CU} \frac{d\Delta T}{dt} + K_{CU} \Delta T = nfE_{in}, \quad (2)$$

где C_{CU} – теплоемкость процессорного чипа; t – время; $\Delta T = T_{CU} - Q$; K_{CU} – коэффициент теплообмена процессора с окружающей средой.

Решение (2) при начальном условии $t = 0, \Delta T = 0$ имеет вид:

$$T_{CU} = Q + \frac{nfE_{in}}{K_{CU}} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{CU}}\right) \right), \quad (3)$$

где $\tau_{CU} = C_{CU}/K_{CU}$ – тепловая постоянная времени процессора.

Как вытекает из (3), при отсутствии энергозатрат на выполнение машинных команд ($E_{in} = 0$), температура процессора не изменяется во времени и равна температуре окружающей среды Q . Если $E_{in} \neq 0$, то при выполнении блока команд, температура процессора возрастает, стремясь к постоянному значению T_{CUmax} . Это значение, согласно (3) равно:

$$T_{CUmax} = Q + \frac{nfE_{in}}{K_{CU}}, \quad (4)$$

При аппаратной реализации режима троттлинга, использующей терморезистор с критической температурой T_t [3, 4], возможны два случая.

В первом случае максимальная температура нагрева процессора T_{CUmax} не превышает значение T_t . Поэтому режим модуляции тактовой частоты f не включается и процессор работает с производительностью PT_0 , определяемой (1).

Во втором случае $T_{CUmax} \geq T_t$ критический терморезистор, переключается в состояние с низким сопротивлением и запускает режим модуляции частоты. Процессор переходит в режим троттлинга. В этом режиме температура T_{CU} испытывает колебания в интервале $T_0 \leq T \leq T_t$ (рисунок 1), что исключает перегрев процессора. Для терморезисторов на основе диоксида ванадия VO_2 значение $T_t = 68^\circ C$ ниже предельной температуры перегрева процессора $90^\circ C$ [2], что обеспечивает его надежную защиту при выполнении энергоемких участков программы.

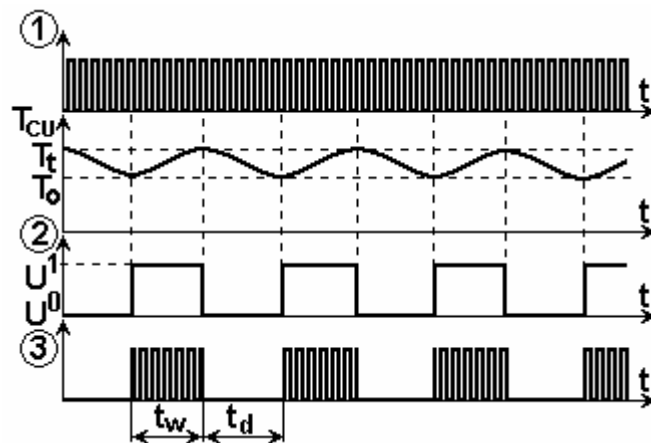


Рисунок 1 – Временные диаграммы для режима троттлинга.

1 – тактовые импульсы; T_{CU} – температура процессора,

2 – модулирующий сигнал;

3 – тактовые импульсы после модуляции

Приравняв в (4) температуру T_{CUmax} значению критической температуры терморезистора T_t , можно найти энергию $E_{in\ min}$. Это минимальная энергия, затрачиваемая на выполнение одной машинной команды, при которой процессор переходит в режим троттлинга:

$$E_{in\ min} = \frac{K_{CU}}{nf} (T_t - Q) = \frac{K_{CU}}{PT_0} (T_t - Q). \quad (5)$$

Процессор работает с производительностью $PT_0 = nf$, если средняя энергия E_{in} , на одну машинную команду удовлетворяет усло-

вию $E_{in} < E_{in \min}$. При условии $E_{in} \geq E_{in \min}$ электронный узел, схема которого представлена в [3, 4], переводит процессор в режим троттлинга. Для этого режима характерна последовательность “холостых” тактов длительностью t_d (рисунок 1), когда процессор не выполняет команды программы. Энергопотребление снижается и процессор остывает до температуры T_o , при которой терморезистор переключается в состояние с высоким сопротивлением. Подача тактовых импульсов возобновляется. Процессор выполняет программу, пока не нагреется до температуры T_t , при которой вновь переходит в режим холостых тактов. Описанные процессы периодически повторяются до завершения выполнения блока команд с $E_{in} \geq E_{in \min}$. Поскольку в режиме троттлинга не все такты используются для выполнения команд, производительность процессора $PT < PT_0 = nf$.

Таким образом, в интервале времени t_w процессор выполняет команды программы, а в интервале t_d простаивает (рисунок 1). Кинетика температуры процессора $T_{CU}(t)$ в интервале времени t_w описывается уравнением (2) с начальным условием $t = 0$, $T_{CU}(0) = T_o$, а в интервале t_d , когда $E_{in} = 0$ – уравнением

$$\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{\Delta T}{\tau_{CU}} = 0, \quad (6)$$

с начальным условием $t = 0$, $T_{CU}(0) = T_t$.

За время t_w процессор выполнит $t_w fn$ команд. Поэтому его производительность PT в режиме троттлинга описывается соотношением:

$$PT = \frac{t_w fn}{t_w + t_d} = \frac{PT_0}{1 + t_d/t_w}. \quad (7)$$

Решая уравнения (2) и (6) при указанных выше начальных условиях получим уравнения для интервалов времени t_d и t_w :

$$T_o = Q + (T_t - Q) \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_{CU}}\right), \quad (8)$$

$$T_t - Q - \frac{nfE_{in}}{K_{CU}} = (T_o - Q - \frac{nfE_{in}}{K_{CU}}) \exp\left(-\frac{t_w}{\tau_{CU}}\right). \quad (9)$$

Из (8) и (9) вытекает следующая связь между значениями t_d и t_w :

$$t_w = \tau_{CU} \ln \left(\frac{\frac{nfE_{in}}{K_{CU}} - (T_t - Q) \exp\left(-\frac{t_d}{\tau_{CU}}\right)}{\frac{nfE_{in}}{K_{CU}} - T_t + Q} \right). \quad (10)$$

Как показано в [4], длительность “холостых” тактов t_d много меньше тепловой постоянной времени процессора τ_{CU} ($t_d \ll \tau_{CU}$). Это позволяет в (10), разложить в ряд Тейлора экспоненциальную и логарифмическую функции, ограничившись двумя членами разложения. В результате, с учетом (5) получим выражение для отношения длительностей “холостых” t_d и рабочих тактов t_w :

$$\frac{t_d}{t_w} = \frac{E_{in}}{E_{in\min}} - 1. \quad (11)$$

Подстановка (11) в (7) позволяет найти зависимость производительности процессора в режиме троттлинга от E_{in} . Обобщая результат для $E_{in} < E_{in\min}$, получим следующее выражение для производительности процессора:

$$PT = \begin{cases} PT_0 = fn, & \text{если } E_{in} < E_{in\min} \\ PT_0 \frac{E_{in\min}}{E_{in}}, & \text{если } E_{in} \geq E_{in\min} \end{cases}. \quad (12)$$

График зависимости (12) показан на рисунке 2.

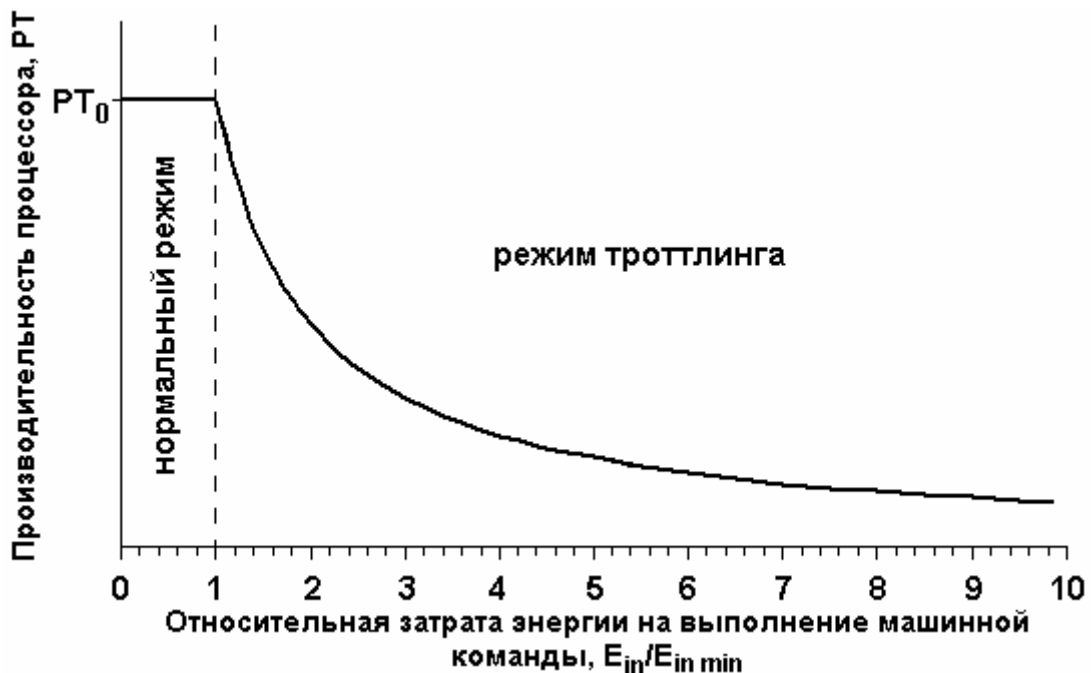


Рисунок 2 – Зависимость производительности процессора от относительной затраты энергии на одну машинную команду

Выводы. Нагрев процессора не превышает 68 °С и его производительность отвечает нормальному тепловому режиму, если средняя энергия, затрачиваемая на выполнение одной машинной команды E_{in} , меньше значения $E_{in \min}$, определяемого соотношением (5). При $E_{in} \geq E_{in \min}$ критический терморезистор на основе VO_2 , переводит процессор в режим троттлинга. В этом режиме производительность процессора уменьшается обратно-пропорционально значению E_{in} .

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>. – Загл. с экрана.
2. Защита процессоров AMD от перегрева (Обзор) [Электронный ресурс] / А. Карабуто // FERRA.RU – 2002 – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/system/s19535/> – Загл. с экрана.
3. Ивон, А.И. Использование критических терморезисторов для аппаратной реализации режима троттлинга центрального процессора [Текст] / А.И. Ивон, А.А. Андреев, Л.А. Можаровский. // Системні технології: сб. наукових праць. – Дніпропетровськ, 2009. – В. 1 (60). – С. 87 – 92.
4. Ивон, А.И. Расчет длительности „холостых” тактов при использовании режима троттлинга для защиты процессора от перегрева [Текст] / А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин // Системні технології: сб. наукових праць. – Дніпропетровськ, 2012. – В. 1 (78). – С. 41 – 46.

.