

А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин

## ЧАСТОТА МОДУЛЯЦИИ ТАКТОВОГО СИГНАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЖИМА ТРОТТЛИНГА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРОЦЕССОРА ОТ ПЕРЕГРЕВА

*Аннотация.* Выполнен расчет частоты модуляции  $f_m$  тактового сигнала процессора при использовании критического терморезистора на основе диоксида ванадия для реализации режима троттлинга. Показано, что  $f_m$  линейно увеличивается с ростом средней затраты энергии на выполнение машинной команды и линейно уменьшается с ростом температуры окружающей среды  $Q$ , когда  $Q \ll T_t - \Delta t/2$ . Частота модуляции стремится к нулю, когда  $Q$  стремится к температуре фазового перехода металл-полупроводник  $T_t = 68$  °С.  
*Ключевые слова:* защита процессора от перегрева, режим троттлинга, V02, критические терморезисторы.

**Введение.** Эффективным средством защиты процессора от перегрева является режим троттлинга. В этом режиме, при нагреве процессора выше предельно допустимой температуры, включается режим модуляции частоты тактового сигнала [1]. Как следствие, появляются пустые такты, в течение которых процессор не выполняет машинные команды. Энергопотребление снижается и процессор остывает. При достижении определенной температуры режим модуляции частоты выключается, и процессор начинает работать с прежней производительностью. Если вновь возникает перегрев, процессор опять переходит в режим троттлинга. Так продолжается пока не будет выполнен участок программы, требующий энергоемких ресурсов аппаратуры процессора. Характерной особенностью режима троттлинга является то, что температура процессора совершает колебания, частота которых совпадает с частотой модуляции тактового сигнала.

Ранее для защиты процессора от перегрева был предложен простой способ аппаратной реализации режима троттлинга, который основан на использовании диоксиднованадиевых критических терморезисторов [2]. В работе [3], в рамках этого способа, выполнен анализ

зависимости производительности процессора в режиме троттлинга от средней энергии, затрачиваемой на выполнение машинной команды  $E_{in}$ . Представляет интерес так же анализ зависимости частоты модуляции тактового сигнала от величины  $E_{in}$ .

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является установление связи между частотой модуляции тактового сигнала в режиме троттлинга и средней энергией, затрачиваемой на выполнение машинной команды  $E_{in}$ .

**Основная часть.** Характерной особенностью критических терморезисторов на основе VO<sub>2</sub> является скачок электрического сопротивления, более двух порядков, возникающий при фазовом переходе металл-полупроводник (рис. 1). Температура фазового перехода  $T_t=68^\circ\text{C}$  близка к температуре  $90^\circ\text{C}$ , при которой, согласно техническим нормам, должны включаться аппаратные и программные средства защиты процессора от перегрева [1]. Заметим также, что для температурной зависимости сопротивления критических терморезисторов на основе VO<sub>2</sub> характерен гистерезис, связанный с физикой фазового перехода металл-полупроводник (ФПМП). Гистерезис проявляется в том, что при нагревании скачок сопротивления происходит при температуре  $T_t + \delta t/2$ , а при охлаждении – при температуре  $T_t - \delta t/2$  (рис. 1). Ширина петли температурного гистерезиса  $\delta t$  зависит от чистоты и стехиометрии диоксида ванадия и может составлять от 2 до  $10^\circ\text{C}$  [4].

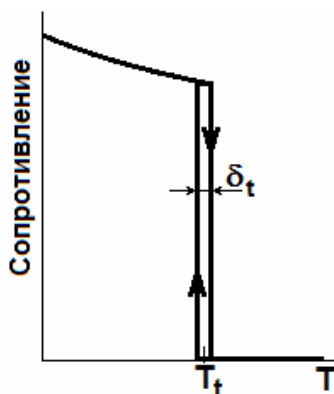


Рисунок 1 – Температурная зависимость электрического сопротивления критического терморезистора на основе VO<sub>2</sub>

С учетом температурного гистерезиса, критический терморезистор в режиме троттлинга, при его хорошем тепловом контакте с чипом процессора, должен включать модуляцию тактового сигнала, ко-

гда температура процессора достигнет значения  $T_t + \delta t/2$  и выключать при остывании процессора до температуры  $T_t - \delta t/2$ . Поэтому в режиме троттлинга, реализованного с помощью схемы, предложенной в [2], температура процессора испытывает колебания в интервале  $T_t - \delta t/2 \leq T \leq T_t + \delta t/2$ . Частота этих колебаний совпадает с частотой модуляции тактового сигнала  $f_m$ . Эту частоту можно оценить, если найти интервал времени  $t_w$ , соответствующий нагреву процессора, и интервал времени  $t_c$ , соответствующий его охлаждению в указанном выше интервале температур. Частота модуляции  $f_m$  может быть определена через эти интервалы времени как

$$f_m = 1/(t_w + t_c). \quad (1)$$

Выполним анализ  $f_m$  с учетом того, что тактовая частота процессора  $f$ , количество команд выполняемых за один такт  $n$ , а средние затраты энергии на выполнение машинной команды  $E_{in}$  превышают минимальную энергию  $E_{in \min}$ , при которой процессор переходит в режим троттлинга [3]. Учтем также, что токи через терморезистор для контроля температуры процессора, невелики и не вызывают его разогрев. Для упрощения анализа примем, что температура TCU одинакова во всех точках процессорного чипа и совпадает с температурой критического терморезистора. Тогда уравнение теплового баланса, описывающее изменение температуры процессора и критического терморезистора при нагревании, имеет вид:

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

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

Из уравнения (2) вытекает, что в стационарном режиме, когда  $d\Delta T/dt = 0$ , температура перегрева процессора равна

$$\Delta T = \frac{n f E_{in}}{K_{CU}}. \quad (3)$$

Эта температура растет при увеличении тактовой частоты  $f$ , количества команд, выполняемых за один такт  $n$ , и средней энергии, затрачиваемой на выполнение машинной команды  $E_{in}$ . При фиксированных значениях  $f$  и  $n$  увеличение температуры процессора проис-

ходит за счет выполнения блоков программ, требующих привлечения энергоемких аппаратных ресурсов процессора, когда  $E_{in}$  возрастает. Поскольку процессор переходит в режим троттлинга при температуре перегрева  $\Delta T_t + \delta t/2$ , из уравнения (3) можно получить выражение для минимальной средней энергии  $E_{in \min}$ , затрачиваемой на выполнение машинной команды, при которой обеспечивается режим троттлинга:

$$E_{in \min} = \frac{K_{CU}}{nf} \left( \Delta T_t + \frac{\delta_t}{2} \right), \quad (4)$$

Решение (2) при начальных условиях  $t=0$ ,  $\Delta T = \Delta T_t - \delta t/2$  имеет вид:

$$\Delta T = \frac{nfE_{in}}{K_{CU}} - \left( \frac{nfE_{in}}{K_{CU}} - \left( \Delta T_t - \frac{\delta_t}{2} \right) \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{CU}}\right), \quad (5)$$

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

С учетом (4) уравнение (5) можно преобразовать к виду:

$$\Delta T = \frac{E_{in}}{E_{in \min}} \left( \Delta T_t + \frac{\delta_t}{2} \right) - \left( \frac{E_{in}}{E_{in \min}} \left( \Delta T_t + \frac{\delta_t}{2} \right) - \left( \Delta T_t - \frac{\delta_t}{2} \right) \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{CU}}\right). \quad (6)$$

Интервал времени  $t_w$ , в течение которого процессор в режиме троттлинга нагревается от температуры  $T_t - \delta t/2$  до температуры  $T_t + \delta t/2$ , можно найти, подставив в (6)  $\Delta T = \Delta T_t + \delta t/2$  и  $t = t_w$ :

$$t_w = \tau_{CU} \ln \left( 1 + \frac{\delta_t}{\left( \frac{E_{in}}{E_{in \min}} - 1 \right) \left( \Delta T_t + \frac{\delta_t}{2} \right)} \right). \quad (7)$$

В интервале времени  $t_c$ , когда процессор охлаждается от температуры  $T_t + \delta t/2$  до температуры  $T_t - \delta t/2$  и не выполняет машинных команд  $E_{in}=0$ . Поэтому уравнение теплового баланса (2) принимает вид:

$$\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{\Delta T}{\tau_{CU}} = 0. \quad (8)$$

Решение этого уравнения при начальных условиях  $t=0$ ,  $\Delta T = \Delta T_t + \delta t/2$  описывает кинетику охлаждения процессора в режиме троттлинга:

$$\Delta T = \left( \Delta T_t + \frac{\delta_t}{2} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{CU}}\right). \quad (9)$$

Интервал времени  $t_c$  найдем, подставив в (9)  $t = t_c$ ,  $\Delta T = \Delta T t_c - \delta t / 2$

$$t_c = \tau_{CU} \ln \left( \frac{\Delta T_t + \frac{\delta_t}{2}}{\Delta T_t - \frac{\delta_t}{2}} \right). \quad (10)$$

С учетом соотношений (1), (7) и (10) частота модуляции тактового сигнала  $f_m$  в режиме троттлинга описывается следующей формулой:

$$f_m = \frac{1}{\tau_{CU}} \ln \left( \frac{T_t - Q + \frac{\delta_t}{2}}{T_t - Q - \frac{\delta_t}{2}} + \frac{\delta_t}{\left( \frac{E_{in}}{E_{in \min}} - 1 \right) \left( T_t - Q - \frac{\delta_t}{2} \right)} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Как видно из (11) частота модуляции  $f_m$  определяется тепловой постоянной времени процессора  $\tau_{CU}$ . Она стремится к нулю, когда средняя энергия, затрачиваемая на выполнение машинной команды  $E_{in}$ , стремится к значению  $E_{in \min}$ . При неограниченном увеличении  $E_{in}$ , частота модуляции стремится к максимальному значению, определяемому соотношением:

$$f_{m \max} = \frac{1}{\tau_{CU}} \ln \left( \frac{T_t - Q + \frac{\delta_t}{2}}{T_t - Q - \frac{\delta_t}{2}} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Из (11), (12) следует, что частота модуляции тактового сигнала в режиме троттлинга зависит от температуры окружающей среды  $Q$ . При фиксированном отношении  $E_{in}/E_{in \min} > 1$ , когда реализуется режим троттлинга, частота модуляции уменьшается с ростом температуры окружающей среды. Когда  $Q$  стремится к значению  $T_t - \delta t / 2$ , частота модуляции стремится к нулю. Критический терморезистор на основе VO2 не имеет возможности перейти в состояние с высоким сопротивлением при  $Q \geq T_t - \delta t / 2$ . Поэтому подача тактовых импульсов в процессор блокирована, и программа не выполняется.

В интервале температур окружающей среды, когда выполняется условие  $T_t - Q \gg \delta t / 2$ , логарифмическую функцию в (11) можно разложить в ряд, ограничившись первым членом разложения. Это приводит к более простому выражению для частоты модуляции:

$$f_m = \frac{1}{\tau_{cu}} \frac{T_t - Q}{\delta_t} \left( \frac{E_{in}}{E_{in \min}} - 1 \right), \quad (13)$$

Из (13) следует, что частота модуляции тактового сигнала в режиме троттлинга линейно увеличивается с ростом средней затраты энергии на машинную команду  $E_{in}$  и линейно убывает с ростом температуры окружающей среды.

**Выводы.** В области температур окружающей среды  $Q \ll T_t - \delta t/2$ , частота модуляции тактового сигнала процессора в режиме троттлинга линейно растет при увеличении средней затраты энергии на машинную команду  $E_{in}$  и линейно уменьшается с ростом  $Q$ . Когда температура окружающей среды  $Q$  стремится к температуре фазового перехода металл-полупроводник  $T_t = 68^\circ\text{C}$  в  $\text{VO}_2$ , частота модуляции стремится к нулю.

#### 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. 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.
3. Ивон А.И. Производительность центрального процессора в режиме троттлинга [Текст] / А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин // // Системні технології: сб. наукових праць. – Дніпропетровськ, 2013. – В. 1 (84). – С. 31 – 36.
4. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 183 с.