

Блок мониторинга СБИС микропроцессора

Б.Ю. Рогаткин, Ю.Б. Рогаткин

Учреждение Российской академии наук

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,

rogatkin@cs.niisi.ras.ru

Аннотация — Представлен многоканальный сложно-функциональный блок сбора и обработки информации о температуре, напряжении питания и помехам по цепи питания в отдельных частях СБИС, описана методика интеграции и использования блока мониторинга в СБИС микропроцессора.

Ключевые слова — надежность СБИС, помехи по цепи питания, АЦП, микропроцессор.

I. ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей при разработке СБИС является повышение надежности ее работы в различных условиях эксплуатации. Одними из основных показателей условий работы микросхемы является температура и напряжение питания в конкретной точке кристалла микросхемы. За рубежом проблеме мониторинга температуры в различных точках кристалла микросхемы уделяют большое внимание, эта проблема широко отражена в литературе, например [1, 2]. Локальный перегрев приводит к снижению надежности работы СБИС, происходит ухудшение электрических характеристик СБИС, прежде всего снижение быстродействия, увеличивается вероятность функционального отказа. Увеличение температуры приводит к увеличению энергопотребления, что негативно сказывается на времени работы от автономного источника питания. Упрощенный вариант обсуждаемого ниже блока мониторинга был использован в микросхеме 1890ВМ6Я. Экспериментальные измерения температуры в разных точках кристалла СБИС показали возможность относительного перегрева до 20 градусов.

Данная работа посвящена задаче разработки простой и эффективной многоканальной системы мониторинга температуры и напряжения питания в различных наиболее тепловыделяющих точках СБИС.

Второй важной задачей, которая решается с помощью описываемого блока, является анализ относительно быстрых помех по сетке питания ядра микропроцессора. Фиксация импульсных помех по цепи питания помогает оценить помехоустойчивость конкретной части ядра микропроцессора, а также

предусмотреть меры при катастрофическом уменьшении напряжения питания, например при возникновении триггерного эффекта. Аспекты этого вопроса отражены в работах [3-5].

В адресном пространстве СБИС микропроцессора блок мониторинга имеет управляющие регистры, предназначенные для записи конфигурации блока и чтения измеряемых параметров температуры, напряжения и регистрации помех питания.

II. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА БЛОКА МОНИТОРИНГА

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема блока мониторинга. Блок мониторинга содержит многоканальную схему нормализации, на вход которой поступают сигналы с датчиков температуры, напряжение питания в конкретной части СБИС, а также сигналы регистрации быстрых помех по цепи питания. Схема нормализации может работать в двух режимах: режиме измерения температуры и режиме измерения напряжения питания. Назначение схемы нормализации состоит в масштабировании входных сигналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) к его полной шкале, а также обеспечении линейной зависимости сигналов напряжения с датчиков температуры от температуры.



Рис. 1. Структурная схема блока мониторинга

Таким образом, схема нормализации обеспечивает максимально возможное, с учетом используемого АЦП, и сходное, то есть по возможности одинаковое, качество сигналов по каждому из каналов. Качество аналогового сигнала с наложенными на него шумами

определяется отношением сигнал/шум на входе системы сбора данных и напрямую связано с разрядностью АЦП. Фиксация быстрых помех происходит постоянно в асинхронном режиме.

В качестве аналого-цифрового преобразователя используется 10-разрядный АЦП поразрядного уравнивания [6]. В качестве датчиков температуры – р-п переход при постоянном токе смещения. Упрощенно конструкция датчика приведена на рис. 2. Датчик подключен к блоку мониторинга с помощью четырех шин, три из которых используются для передачи напряжения питания макроблока СБИС, сигнала помехи по шинам питания, сигнала напряжения, пропорционального температуре р-п перехода (диода), соответственно, а четвертая — для задания постоянного тока смещения р-п перехода.



Рис. 2. Конструкция датчика

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 представлены результаты моделирования схемы нормализации. Моделирование проводилось для объемной КМОП технологии с нормами 65 нм. Показана зависимость приведенной ко входу АЦП нелинейности датчика температуры вдоль шкалы преобразования от температуры в диапазоне от +20 С° до +140 С°. Рассчитанная нелинейность не превышает 20% от шага квантования h .

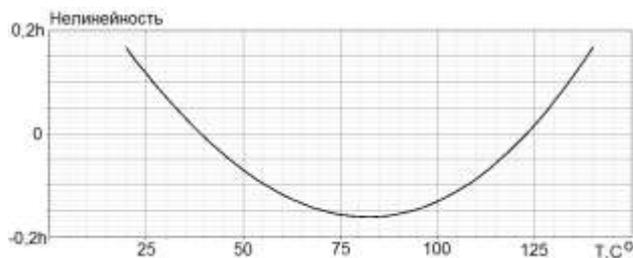


Рис. 3. Нелинейность датчика температуры

Топологически блок выполнен в виде собственно блока и нескольких датчиков, расположенных по площади СБИС. Связь с датчиками для отдельных сигналов осуществляется по двухпроводной линии связи, что позволяет минимизировать синфазную помеху при обеспечении дифференциального входа у схемы нормализации. При моделировании линия связи с датчиками реализована в виде двухполосковой линии металла шириной 1 мкм и длиной 15 мм с сопротивлением около 1 кОм.

Пример сигналов блока мониторинга в процессе его работы приведен на рис. 4. В интервале времени до

102 мкс, который на рис. 4 не показан, происходит установление режима измерения. Выбранный режим измерения соответствует режиму измерения температуры датчика с произвольным адресом. Выходной сигнал схемы нормализации составляет примерно 520 мВ. Видно, как в процессе цикла преобразования происходит выравнивание выходного сигнала ЦАП в обратной связи АЦП, что характерно для АЦП подобного типа. Для выработки цифрового сигнала АЦП требуется 11 периодов частоты синхронизации (F_{clk}). Частота синхронизации выбирается из условия обеспечения допустимой динамической погрешности, учитывая, что схема выборки и хранения на входе АЦП отсутствует, а сигнал изменяется достаточно медленно. Для оценки величины частоты выработки цифрового сигнала ($F_s = F_{clk}/11$) можно воспользоваться известной формулой [7]:

$$h \leq \Delta X_{дин} = \max \left\{ \frac{dV_{ex}}{dt} \right\} \frac{11}{F_{clk}} \quad (1)$$

где h – значение младшего значащего разряда, $\Delta X_{дин}$ – динамическая погрешность второго рода, а $\max \{dV_{ex}/dt\}$ – максимальная скорость изменения входного сигнала АЦП.

Сигналом окончания преобразования служит сигнал “clrn”. В момент времени $t=102$ мкс изменяется режим работы (сигнал “Mode” переключается из состояния 0 в состояние 1). Далее происходит измерение напряжения питания ядра (VDD) в районе расположения датчика с выбранным адресом. Следует учесть, что изменение выходного сигнала схемы нормализации происходит медленно с постоянной времени около 10 мкс. Постоянная времени определяется параметрами фильтра нижних частот в составе схемы нормализации. В момент времени $t=104$ мкс по цепи питания в районе расположения датчика с выбранным адресом проходит импульсная помеха длительностью около 200 нс.

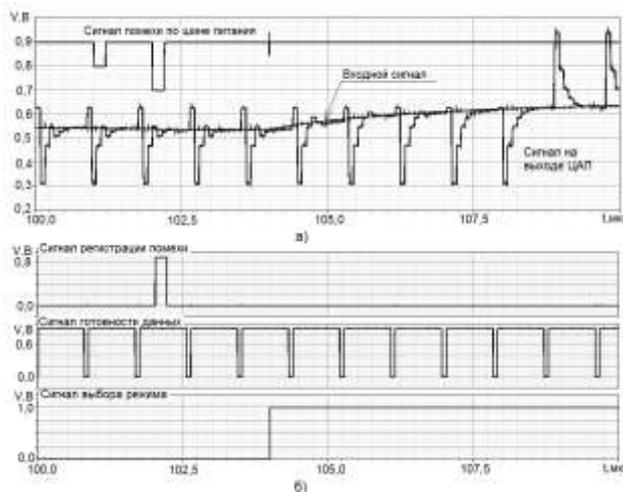


Рис. 4. Аналоговые (а) и цифровые (б) сигналы блока мониторинга

Данная помеха регистрируется блоком в виде отрицательного импульса на соответствующем выходе. Длительность импульса соответствует длительности помехи.

При указанных выше параметрах линии связи задержка появления сигнала регистрации помехи по цепи питания не превышает 20 нс. Блок реагирует на одновременные импульсные помехи по шинам питания VDD и VSS величиной более 16% от величины напряжения питания и длительностью не менее 150 нс. Порог фиксации импульсной помехи по цепи питания задается аппаратно, но легко может быть сделан, при необходимости, программно-управляемым. Измерение температуры (напряжения питания) и регистрация помехи по выбранному адресу происходят независимо.

IV. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Температура измеряется с помощью 10-разрядного АЦП поразрядного уравнивания. Для измерения температуры необходимо предварительно провести калибровку, для чего используется датчик, расположенный непосредственно на площади блока мониторинга. Поскольку блок мониторинга рекомендуется располагать на периферии кристалла СБИС, предполагается, что он имеет температуру весьма близкую к температуре корпуса. При калибровке измеряется (оцифровывается) температура в двух точках $T_{нач}$ и $T_{кон}$. Рекомендуемые значения $T_{нач} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{кон} = +120\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые находятся в средней части шкалы АЦП. Соответственно будет получено два значения кода: $N_{нач}$ ($T_{нач}$) и $N_{кон}$ ($T_{кон}$). Измеренное значение температуры ($T_{изм}$) одного из рабочих датчиков определяется по формуле:

$$T_{изм} = \frac{Q_{нач} - Q_{изм}}{Q_{нач} - Q_{кон}} (T_{кон} - T_{нач}) + T_{нач} \quad (2)$$

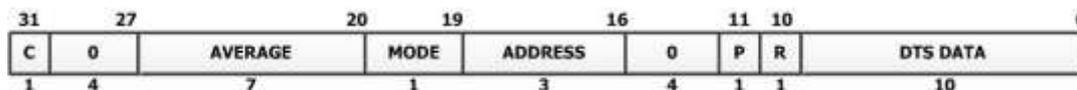


Рис. 5. Управляющий регистр 1

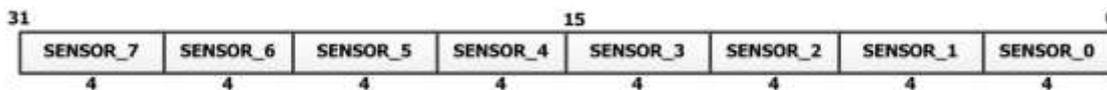


Рис. 6. Управляющий регистр 2

где $N_{изм}$ – измеренное значение выходного кода АЦП при измерении температуры одного из рабочих датчиков в рабочем режиме, а Q_i – вес соответствующего кода, определяется по формуле:

$$Q_i = \sum_{j=0}^9 a_j 2^j \quad (3)$$

где a_j значение разряда соответствующего выходного кода АЦП. Значение a_j равно либо 1, либо 0. Младший разряд – a_0 . Например, $N_{изм} = 1011100010$, тогда:

$$Q_i = 1 \times 2^9 + 0 \times 2^8 + 1 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = 738$$

Измеренное значение напряжения определяется по формуле:

$$V_{изм} = 1,25 \frac{Q_{изм}}{1023} \quad (4)$$

Величина коэффициента 1,25 определяется выбранным значением полной шкалы АЦП по напряжению. В данном примере температура полной шкалы АЦП соответствует примерно $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V. КОНТРОЛЛЕР БЛОКА МОНИТОРИНГА

Контроллер блока мониторинга состоит из управляющих регистров. Конфигурационный регистр номер 1 расположен по отдельному адресу системной шины, старшая половина регистра предназначена для записи конфигурации блока мониторинга, младшая для чтения измеряемых параметров температуры или напряжения, регистр содержит в себе информацию, представленную на рис. 5.

Рассмотрим поля управляющего регистра 1. Поле «С» – флаг режима калибровки блока мониторинга, для чего используется датчик с адресом 111, расположенной непосредственно на площади блока мониторинга, 1 – режим калибровки, 0 – режим измерений. Поле «MODE» – режим измерения температуры (значение 0) или режим измерения напряжения (значение 1). Поле «AVERAGE» – режим усреднения измерений с округлением до младшего разряда, возможные значения: 0 – режим без усреднения, 2, 4, 8, 16, 32, 64 – усреднение по нескольким точкам, соответственно. Поле «ADDRESS» – адрес одного из 8 датчиков. Поле «DTS_DATA» – значение измеренного кода АЦП, соответствующее режиму «MODE». Поле «P» – флаг наличия помех по цепи питания на одном из 8 датчиков. Поле «R» – флаг достоверности данных «DTS_DATA» с АЦП. Флаг сбрасывается после изменения конфигурационных полей. Остальные разряды не используются. Регистр номер 2 (рис. 6) регистрации импульсных помех питания расположен по отдельному адресу системной шины, предназначен только для чтения и содержит в себе счетчики регистрации импульсных помех одновременно по цепям питания восьми датчиков. При регистрации помехи значение соответствующего поля увеличивается на 1, после регистрации 15 помех значение поля не изменяется. После чтения регистра значение счетчиков сбрасывается.

Для синхронизации асинхронных сигналов конца преобразования и сигналов помех с датчиков блока мониторинга используется внутренний триггер флага состояния, который разрешает синхронную запись значений с соответствующих датчиков.

Программное преобразование кода АЦП в значение температуры или напряжения происходит на основе калибровочных значений, полученных при аттестации микросхемы. Калибровочные значения $Q_{нач}$ и $Q_{кон}$ хранятся во внешней постоянной памяти системы как константы. В режиме калибровки нужный адрес датчика и режим измерений задаются автоматически. В режиме измерений после чтения регистра 1 анализируются поля R и P. Если цикл преобразования АЦП завершен и данные достоверны ($R=1$), используя формулы (1-3) и значение поля DTS_DATA вычисляется значение температуры или напряжения на датчике с адресом ADDRESS. Для анализа помех по цепям питания проверяется флаг P, если он установлен, чтением регистра 2 определяется количество возникших помех на одном из датчиков. На основе полученных значений выбирается режим работы СБИС. Например, в случае перегрева возможно понижение частоты работы макроблока микросхемы, а в случае регистрации помех по цепям питания функциональных блоков в целях сохранения работоспособности СБИС отключение питания макроблока микросхемы или микросхемы целиком. Также, с целью повышения отказоустойчивости СБИС возможно динамическое конфигурирование СБИС в реальном времени с учетом аппаратного дублирования

сбойных функциональных блоков или корректировки программного алгоритма текущей вычислительной задачи.

Размещение датчиков по поверхности кристалла целесообразно проводить с учетом наиболее потребляющих и быстродействующих узлов микропроцессорной системы на кристалле, таких как область ядра (узлы вычислительной арифметики), кэш-памяти, системного контроллера, графического контроллера. Для мониторинга средней температуры СБИС целесообразно разместить датчики также по краям кристалла.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты проектирования многоканального сложно-функционального блока сбора и обработки информации о температуре, напряжении питания и помехам по цепи питания в отдельных частях СБИС позволяют сделать вывод о целесообразности применения данного блока для определения перегрева в отдельных частях кристалла СБИС, выявлении недопустимых статических «просадок» напряжения в сетке питания СБИС, влияющих на ее помехозащищенность и, следовательно, надежность работы, а также для фиксации превышающих допустимый порог относительно быстрых помех по цепи питания. Представленный многоканальный сложно-функциональный блок использован в проекте суперскалярного высокопроизводительного 64-разрядного микропроцессора со встроенными высокоскоростными последовательными каналами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Leng Y., Zhao G., Li Q., Sun C. and Liu S. A High Accuracy Signal Conditioning Method and Sensor Calibration System for Wireless Sensor in Automotive Tire Pressure Monitoring System // Proc. WiCOM. Sept., 2007. P. 1833–1837.
- [2] Verma N., Chandrakasan A. A 256 kb 65 nm 8T Subthreshold SRAM Employing Sense-Amplifier Redundancy // IEEE J. Solid-State Circuits. Jan., 2008. Vol. 43. № 1. P. 141–149.
- [3] Saleh R., Hussain S.Z., Rochel S., Overhauser D. Clock skew verification in the presence of IR-Drop in the power distribution network // IEEE Trans. on Computer-Aided Design. 2000. Vol. 19. № 6. P. 635–644.
- [4] Iwabuchi M., Sakamoto N., Sekine Y., Omachi T. A methodology to analyze power, voltage drop and their effects on clock skew/delay in early stages of design // Proc. of Int'l Symposium on Physical Design. 1999. P. 9–15.
- [5] Alexandre Simionovski, Gilson Inacio Wirth A Bulk Built-in Current Sensor for SET detection with dynamic memory cell // Conference: IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems – LASCAS. 2012. P. 1-4.
- [6] Уолт Кестер Аналого-цифровое преобразование. М.: Технофера, 2007.
- [7] Стенин В.Я. Аналого-цифровые системы. [Учебное пособие]; МИФИ, 1990.