

Энергоэффективная система управления на кристалле

Д. В. Костыгов¹, А. М. Грузликов², Н. В. Колесов³, М. В. Толмачева⁴

ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Санкт-Петербург

¹ dkost92@mail.ru, ³ nvkolesov@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается подход к построению отказоустойчивой, энергоэффективной многоядерной системы реального времени на кристалле. Предполагается что многоядерная система имеет дополнительные ядра на кристалле для обработки информации. Подход основывается на правилах введении избыточности в целях снижения энергопотребления и повышении отказоустойчивости применяя принцип децентрализованного диагностического ядра.

Ключевые слова: системы реального времени; системы на кристалле; многоядерные системы; отказоустойчивые системы; энергоэффективные системы

I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка сложных систем управления всегда сопряжена с необходимостью удовлетворения целому набору технических требований и ограничений. Понятно, что в случае реализации этой системы на кристалле (СнК) уровень ограничений лишь возрастает. В настоящем докладе рассматривается проблема разработки главной компоненты подобных систем – вычислительной системы, а точнее, распределенной вычислительной отказоустойчивой и энергоэффективной системы реального времени на кристалле. Очевидно, что проблема носит существенно комплексный характер. Ее решения широко освещаются в современной литературе [1–3]. Этой проблеме в последние десятилетия уделяется особое внимание, в том числе и в связи с обсуждением ее в отношении СнК [4], когда снижение энергопотребления (рассеиваемой мощности) достигается за счет снижения тактовой частоты и напряжения питания. Заметим, что необходимым элементом отказоустойчивой системы являются средства диагностирования [5, 6]. По их сигналам принимается решение о появлении отказа в системе, указывается его место и запускается процедура восстановления. Как правило, средства диагностирования реализуются по централизованной схеме, когда выделяется некоторая часть аппаратуры, в отношении которой делается предположение об априорной исправности. В результате в системе возникает «узкое место», отказ которого является катастрофическим для системы. С целью исключения этого недостатка достаточно давно [7] был предложен подход «распределенного

диагностирования», основанный на взаимных проверках, осуществляемых подсистемами системы. В дальнейшем этот подход многократно уточнялся. Хорошие обзоры по этим работам приведены в [1]. В настоящей работе проводится анализ данного подхода.

II. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ НАЗНАЧЕНИЯ ЗАДАЧ НА ПРОЦЕССОРЫ

Известно [4], что мощность имеет две составляющие – P_d динамическую и P_s статическую. Выражения, описывающие эти составляющие без излишней для данного изложения детализации, имеют вид:

$$P_d = aNV^2f, P_s = bN, \quad (1)$$

где a, b – коэффициенты пропорциональности, зависящие от свойств кристалла, N – число процессоров (ядер) в системе, V – напряжение питания, f – тактовая частота. Поскольку вклад статической мощности в суммарную потребляемую мощность невелик, далее будем учитывать лишь динамическую составляющую. Для ее анализа полезна приближенная формула, определяющая задержку, вносимую схемой при напряжении питания V [4]:

$$D = cV, \quad (2)$$

где c – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств кристалла.

При снижении частоты тактовых импульсов в обратной пропорции возрастает их период, ограничивающий допустимое время для переходных процессов, возникающих в системе при каждом срабатывании. При исходном значении напряжения питания фактическое время переходных процессов будет мало по отношению к новому увеличенному значению периода, а, значит, возникает возможность пропорционально снизить напряжение питания с увеличением задержки в рамках периода тактовых импульсов в соответствии с (2). В результате выполнения этих двух шагов с одновременным введением в систему дополнительных ядер для сохранения на прежнем уровне времени решения задач может быть достигнуто существенное снижение потребляемой мощности (1). Описанный факт положен в основу предлагаемого подхода к определению архитектуры системы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-08-00052.

В докладе исследуется многоядерная гомогенная система на кристалле. Система включает совокупность одинаковых ядер, информационно взаимодействующих через общую память.

Безусловно, проектируя систему на кристалле, разработчик всегда ограничен не только по потребляемой мощности, но также по площади кристалла, отведенной для реализации вычислительной системы, по напряжению питания и частоте.

В общем случае, когда безызыточная реализация системы оказывается многоядерной, возникает вопрос о том, как наилучшим образом с точки зрения минимизации потребляемой мощности распорядиться дополнительными ядрами (запасом по площади) в рамках существующих ограничений. На этот вопрос отвечает предлагаемый алгоритм определения энергоэффективной архитектуры. Архитектуру системы представим вектором состава $A = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n)$, где a_i – число ядер в расщепленном множестве i -го ядра, и вектором средней потребляемой мощности $P_s = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$, где \bar{P}_i – средняя по расщепленному множеству i -го ядра потребляемая мощность. Итак, предлагается следующий простой алгоритм.

Алгоритм 1 (определение энергоэффективной архитектуры):

Шаг 1. Сделать начальные присвоения: $M = n_d$ (допустимое число дополнительных ядер), $A = (1 \ 1 \ \dots \ 1)$, $P_s = (\bar{P}_1 \ \bar{P}_2 \ \dots \ \bar{P}_n)$.

Шаг 2. Выбрать в P_s компоненту с максимальным значением \bar{P}_{\max} . Пусть ее номер равен l . Ввести дополнительное ядро в l -ю стадию. Произвести между ядрами l -й стадии приближенно сбалансированное перераспределение нагрузки. Пересчитать параметры алгоритма: $P_s, \ a_l := a_l + 1, M := M - 1$. Если $M \neq 0$, то повторить шаг 2, иначе конец.

III. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МНОГОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

Для построения отказоустойчивой системы предлагается воспользоваться скрытой избыточностью, описанной в предыдущем разделе. Действительно, при формировании архитектуры в состав системы вводились дополнительные ядра с последующим снижением тактовой частоты и напряжения питания. Для обеспечения отказоустойчивости предлагается при возникающих отказах организовать обратный процесс слияния ядер, а именно, задачи с отказавшего ядра переносить на ядро, в результате расщепления которого образовалось

отказавшее. Безусловно, этот процесс должен сопровождаться увеличением тактовой частоты и напряжения питания для ядра слияния.

Применим при разработке отказоустойчивой энергоэффективной системы РМС-модель [7] с распределенным принятием решения об отказе. Это позволит реализовать децентрализованную отказоустойчивую систему, лишенную «узких» мест. Обсудим реализацию РМС-модели, предварительно определив модель отказа ядра как утрату функции обработки информации при сохранении функции ее трансляции со входа ядра на выход. Процесс диагностирования можно разбить на три этапа – проверки, сбора диагностической информации и принятия решения об отказе. Второй этап, очевидно, должен отличаться наибольшей длительности, поскольку предполагает передачу результатов взаимных проверок и самодиагностирования от каждого ядра к каждому.

В докладе проанализированы требования, предъявляемые к коммуникационной системе. В докладе представлены результаты моделирования в среде YACSIM диагностических экспериментов для трех разных графов коммуникационной системы – решетка, тор, гиперкуб. Целевой характеристикой моделирования была длительность диагностического эксперимента, включающего взаимные межпроцессорные проверки и сбор всех результатов в каждом из процессоров. Было установлено, что наиболее эффективной коммуникационной системой с точки зрения времени принятия решений является схема типа «тор».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Jalote P. Fault Tolerance in Distributed Systems // New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1994. Лившиц М.Л., Шишялковский Б.И. Лакокрасочные материалы: Справ. пособие. 2-е изд. СПб.: Химия, 1996. 264 с.
 - [2] Pradhan D., Avresky D. Fault-Tolerant Parallel and Distributed Systems // California: Computer Society Press, 1995.
 - [3] Karavay M.F. Theory of symmetry and fault-tolerance // IEEE-IFAC Int. Symp. on Distributed Intelligence Systems, 13–15 August 1991, Arlington, VA, USA, pp. 305–311.
 - [4] Panda P.R., Shrivastava A., Silpa B.V.N., Gummidipudi K. Power-efficient System Design // Springer, New York, 2010, 260 p.
 - [5] Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование // СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2014, 185 с.
 - [6] Грузликов А.М., Колесов Н.В., Костыгов Д.В., Ошуев В.В. Энергоэффективное планирование в распределенных вычислительных системах реального времени // Известия РАН. Теория и системы управления, № 3, 2019, с. 66–76.
- Preparata F. P., Metze G., Chien R.T. On the connection assignment problem of diagnosable systems // IEEE Trans. Electron. Comput. Dec. 1967. V. EC-16, N 6. P. 848–854.