

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

А.Ф.Задорожный, М.С.Тарков

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск

О.В.Захаркин, А.М.Петров, А.Э.Петров, О.О.Сакаев

ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем», Новосибирск

Аннотация

В последнее десятилетие был отмечен существенных прогресс в области развития технических и программных средств, что, в свою очередь, влечет за собой изменение подходов к построению распределенных ВС. В статье рассматриваются методологические наработки, современные подходы к разработке и перспективы развития программного обеспечения распределенных ВС для управления энергетическими объектами.

Общие положения

Для широкого спектра задач управления электроэнергетическими объектами характерны: необходимость обеспечения живучего функционирования системы управления и высокого быстродействия. Одним из перспективных подходов заключается в использовании для решения задач данного класса вычислительных систем (ВС) с программируемой структурой (ПС) [1]. В связи с постоянным развитием архитектурных решений, используемых в микропроцессорных вычислительных системах, меняются и подходы используемые для построения вычислительных систем с программируемой структурой.

Под живучестью понимают способность ВС в любой момент функционирования использовать суммарную производительность всех исправных элементарных машин (ЭМ) для решения задач (под ЭМ будем понимать отдельное микропроцессорное устройство). Свойство живучести ВС достигается программной организацией ее структуры и функционального взаимодействия между ее компонентами. Очевидно, что в живучих ВС вычислительные ресурсы используются гораздо эффективнее, чем в ВС со структурной избыточностью (т.е. в ВС с резервированием или мажорированием).

Организация вычислений (в том числе и параллельных) в живучих ВС предполагает выполнение следующих операций для восстановления процесса вычислений в случае возникновения отказа:

- 1) обнаружение неисправных ЭМ;
- 2) реконфигурация ВС с целью адаптации ее к алгоритму решения задачи;
- 3) перераспределение программ и данных между исправными ЭМ ВС с целью обеспечения равномерной загрузки ЭМ вычислениями;

- 4) выполнение операций, начиная с точки возврата (восстановления), предшествующей отказу.

Особенность задач управления электроэнергетическими объектами заключается в необходимости выполнения вышеуказанных действий в реальном времени.

Отказы ЭМ приводят к снижению производительности ВС. В связи с этим в живучих ВС возможны два пути восстановления вычислений.

В первом случае, когда важно решить задачу в полном объеме и время ее решения не столь существенно, общая вычислительная нагрузка сохраняется. При этом, вычислительная нагрузка каждой работоспособной ЭМ возрастает и время решения задачи увеличивается, т.е. имеет место деградация ВС по производительности.

Во втором случае, когда необходимо решить задачу в течение заданного интервала времени, несмотря на снижение качества полученного решения, вычисления восстанавливаются частично. При этом происходит перераспределение вычислительных ресурсов в пользу более приоритетных задач. Именно к такому типу относятся задачи управления электроэнергетическими системами (ЭЭС). Адаптация этих задач при отказах ЭМ может быть осуществлена, например, путем увеличения количества процессорных циклов, выделяемых задачам, в порядке повышения приоритета задачи. Именно, при возникновении отказов с целью сохранения скорости решения задач наивысшего приоритета следует пожертвовать качеством решения задач более низких приоритетов путем увеличения допустимого времени их решения.

Распределенная операционная система

Для апробации теоретических результатов и продолжения исследований свойств и возможностей вычислительных систем с программируемой структурой была разработана специализированная распределенная операционная система [1-3] преследующая цель сочетания режима высокоэффективного параллельного решения задач с обеспечением услуг, предоставляемых сетями ЭВМ. Данная ВС предусматривала функционирование в режиме решения потока или набора заданий, каждое из которых представлено последовательной или параллельной программой. В первом случае программа исполнялась на одной машине ВС, во втором - на подсистеме с требуемым числом машин (вплоть до всех машин ВС). Для обеспечения указанного функционирования ВС работала в мультипрограммном режиме, что позволяло ей выступать в роли узла коммутации межмашинных обменов, осуществляющего доступ к удаленным файлам и другие функции распределенной обработки данных, и собственно вычислителя, исполняющего одну или несколько программ, каждая из которых либо последовательная программа, либо ветвь параллельной.

Для эффективного исполнения параллельных программ был разработан аппарат виртуальных подсистем (ВП), каждая из которых работала в монопрограммном режиме. Для эффективного исполнения параллельной программы пользователя при создании ВП использовалось "замораживание" в

ВП всех процессов кроме тех, что исполняют параллельную программу. Замораживание процесса состоит в удалении его из рассмотрения операционной системы на время существования ВП. При этом, межмашинные обмены выполнялись специализированными драйверами, обеспечивающими максимальную скорость передачи данных по линиям связи ВП. Каждая ВП создавалась на время исполнения параллельной программы и состояла из машин, в которых размещены ветви программы, и объединяющих эти машины линий связи. По окончании исполнения параллельной программы подсистема уничтожалась и машины подсистемы вновь переключались в мультипрограммный режим.

Наряду с ВП, исполняющими параллельные программы пользователей, в ВС с программируемой структурой постоянно присутствовали ВП, исполняющие служебные функции распределенной обработки данных, присущие сетям ЭВМ, в частности: реализацию доступа к удаленным файлам, диагностику неисправностей, передачу программ и массивов данных по межмашинной сети связи.

Ядром распределенной ОС выступала базовая операционная система (БОС), содержащая минимальные средства, необходимые для осуществления вышеперечисленных функций. Ограниченный объем оперативной памяти ЭМ (присущий на момент разработки ОС) не позволял одновременно расположить в ней все компоненты БОС. Требовалось выделить минимальную совокупность программ БОС, присутствие которых в оперативной памяти ЭМ являлось необходимым в произвольный момент времени. Эта совокупность программ была названа резидентной БОС (РОС). Системные программы, не вошедшие в резидентную БОС, располагались на внешних устройствах и загружались в оперативную память по мере необходимости.

Конфигурация специализированной резидентной ОС определялась конкретным применением ВС. В частности была разработана конфигурация РОС, предназначенная для поддержки исполнения параллельных программ для вычислительных комплексов противоаварийного управления электроэнергетическими системами [2, 3].

Разработанная ОС имела иерархическую структуру. Каждый уровень ОС строился на основе предыдущих.

Таблица 1. Иерархическая структура распределенной ОС

Уровень	Функции
7	Интерпретатор языка управления
6	Средства восстановления вычислений
5	Средства динамического управления
4	Средства загрузки параллельных программ
3	Средства маршрутизации сообщений
2	Средства построения и реконфигурации подсистем
1	Средства контроля и самодиагностики
0	Средства инициализации ВС

Средства обеспечения отказоустойчивости

Для оценки текущего состояния ВС была разработана системная функция $\text{sys}(E, p)$ (реализация данной функции основывалась на средствах децентрализованной распределенной ОС [2, 3]), определяющая номер E данной ЭМ в подсистеме и число p машин в подсистеме. Используя параметры E и p , ветвь параллельной программы могла выделить соответствующий номеру E фрагмент обрабатываемого программой массива данных. Фрагмент выделялся путем вычисления граничных значений индексов цикла, в котором происходит обработка массива, через размер массива и значения параметров E и p . Другими словами, программа настраивалась на число p машин подсистемы, т.е. была инвариантна к p .

Обнаружение отказа (соседней ЭМ или линии связи с ней) происходило при попытке передать пакет сообщения. Если подтверждение о приеме пакета не было получено за заданный интервал времени, линия связи считалась неисправной. Отслеживание времени передачи пакета осуществлялось специальным ("сторожевым") процессом. Любой отказ приводил к инициации процесса реконфигурации подсистем. На время реконфигурации процессы обработки и маршрутизации сообщений блокировались. По окончании реконфигурации блокировка указанных процессов снималась и каждая ветвь параллельной программы настраивалась на номер E содержащей ее ЭМ и число p ЭМ в реконфигурированной подсистеме.

Современные подходы к использованию распределенных вычислительных систем для решения задач управления электроэнергетическими объектами

За последние 10 лет средства вычислительной техники, доступные для решения задач промышленной автоматизации, претерпели коренные изменения, которые прежде всего коснулись:

- надежности элементной базы и готовых микропроцессорных устройств;
- производительности микропроцессорных устройств и средств ее обеспечения;
- пропускной способности интерфейсов, используемых для обмена информацией между устройствами;
- стоимости изделий.

С точки зрения распределенных вычислительных систем важными моментами являются:

- появление доступных многопроцессорных микропроцессорных устройств. Причем существует несколько вариантов архитектуры построения таких систем:
- использование специализированных системных плат, позволяющих установить, как правило, от 1 до 4 процессоров;
- объединение в одно устройство нескольких процессорных кристаллов;
- совмещение на одном кристалле нескольких процессорных ядер.

Последний архитектурный подход представляет интерес еще и тем, что обеспечивает максимальную пропускную способность при обмене данными между ядрами, что позволяет более эффективно решать параллельные задачи за счет снижения накладных расходов на обмен информацией между

параллельными процессами. Необходимо отметить, что последние несколько лет активно развивается направление привлечения к организации вычислений графических процессоров, которые могут объединять на одном кристалле до нескольких сотен процессорных ядер, причем при разработке данной архитектуры во главу угла ставились задачи организации параллельной обработки больших массивов данных;

– увеличение скорости сетевых адаптеров до 1000 МБит/с, что позволяет сократить время обмена информацией между устройствами.

Рассмотренные выше моменты позволяют отметить следующее:

1. Задача обеспечения заданной производительности за счет распределения решения по нескольким микропроцессорным устройствам теряет свою актуальность из-за значительного и постоянного роста производительности данных устройств, который обеспечивается как постоянным увеличением тактовых частот, так и эволюционированием архитектурных решений: использование конвейеров, алгоритмов предсказания ветвлений и операций, промежуточной быстрой памяти, роста количества микропроцессорных ядер;
2. Остается актуальным вопрос распараллеливания решения прикладных задач на одном микропроцессорном устройстве (при этом обеспечиваются минимальные накладные расходы на обмен информацией между параллельными процессами). Особый интерес представляет изучение возможности использования графических процессоров для решения электроэнергетических задач;
3. Несмотря на возросшую надежность технических средств, остается актуальной и задача обеспечения надежности ВС как за счет свойств живучести (перераспределение задач по микропроцессорным устройствам ВС), так и структурной избыточности (резервирование микропроцессорных устройств, отвечающих за взаимодействие с объектом управления).

В соответствии с вышеизложенным, многие существующие наработки по распределенным вычислительным системам для решения задач управления требовали пересмотра как с точки зрения технических средств, так и операционной системы. Выбираемые подходы должны были обеспечить, с одной стороны, определенную преемственность с методологической точки зрения, с другой стороны — позволить создать систему, достаточно легко переносимую на различные микропроцессорные архитектуры.

При этом определяющим фактором выступала сфера применения системы, а именно управление электроэнергетическими объектами, которая выдвигает очень жесткие требования по надежности, и при этом требует функционирования в реальном времени. Реализация обоих требований является достаточно сложной задачей, решение которой усугубляется разнообразием архитектур микропроцессорных устройств, их постоянным развитием, а также постоянным развитием периферийного оборудования. В этих условиях разработка полноценной операционной системы реального времени (ОСРВ) с «нуля» выглядит ресурсоемкой и малоперспективной задачей. Более

перспективным подходом представляется разработка «надстройки», обеспечивающей необходимые технологические функции для одной из существующих ОСРВ.

В качестве базовой ОСРВ была выбрана операционная система QNX. С учетом того, что данная ОС разрабатывалась как распределенная (т.е. в ней уже реализованы многие механизмы межпроцессных и межмашинных взаимодействий), возникает дилемма: либо максимально использовать все средства, предоставляемые ОС, либо ориентироваться на средства, предусмотренные стандартом POSIX. Второй подход представляется более перспективным как с точки зрения переносимости разработок при смене версий ОС, так и возможностей портирования разработок на другие POSIX-совместимые ОС.

В настоящее время ведется разработка распределенной ВС для управления энергетическими объектами с использованием вышеупомянутого подхода. В основу разработки, исходя из условий целесообразности, были положены следующие принципы.

В части технических средств — ориентация на линейку процессоров фирмы Intel и соответствующих им комплектующих в промышленном исполнении, как наиболее распространенных на рынке, а также ориентация на архитектуру сети Ethernet, обеспечивающую необходимое быстродействие, для организации межмашинных взаимодействий на физическом уровне.

В части программных средств — распараллеливание вычислительных задач производится в пределах одной ЭМ, при этом для реализации межпроцессных взаимодействий используются примитивы, определенные стандартом POSIX, а для реализации межмашинных взаимодействий используются семейства протоколов TCP и UDP.

Для обеспечения живучести ВС используется распределение выполняемых задач по ЭМ, а для обеспечения бесперебойного выполнения функций управления, в части взаимодействия с управляемым объектом, используется структурная избыточность (дублирование или мажорирование средств ввода-вывода информации)

Разрабатываемая ВС имеет следующую иерархическую структуру (во многом аналогичную классической структуре, приведенной в таблице 1):

Таблица 2. Структура разрабатываемой ВС для управления энергообъектами

Уровень	Функции уровня	Функции ВС	Модуль ВС
7	Интерпретатор языка управления	Определение исходной конфигурации ВС	Модуль настройки ВС
6	Средства восстановления вычислений	Перераспределение выполняемых задач на другие ЭМ в соответствии с конфигурацией ВС	Менеджер процессов
5	Средства динамического управления		
4	Средства загрузки параллельных программ		

Уровень	Функции уровня	Функции ВС	Модуль ВС
3	Средства маршрутизации сообщений	Обмен сообщениями между ЭМ в пределах ВС	Модуль обмена информацией
2	Средства построения и реконфигурации подсистем	Формирование слова состояния ВС	Менеджер процессов
1	Средства контроля и самодиагностики	Формирование слова состояния ЭМ	
0	Средства инициализации ВС	Загрузка задач, выполняемых каждой ЭМ в соответствии с конфигурацией ВС	Менеджер процессов, менеджер общей памяти

Очевидно, что наибольшая нагрузка в представленной ВС возлагается на менеджер процессов, который должен функционировать на каждой ЭМ и по сути является ядром ВС.

Заключение

Существенный прогресс в области развития технических и программных средств повлек за собой изменение подходов к построению распределенных ВС. Изменения прежде всего коснулись состава задач, возлагаемых на распределенную ВС, и их приоритетности:

1. Задача обеспечения заданной производительности за счет распределения решения по нескольким микропроцессорным устройствам постепенно теряет свою актуальность из-за значительного и постоянного роста производительности данных устройств;
2. С учетом появления доступных многопроцессорных микропроцессорных устройств остается актуальной задача распараллеливания решения прикладных задач на одном микропроцессорном устройстве (при этом обеспечиваются минимальные накладные расходы на обмен информацией между параллельными процессами);
3. Несмотря на возросшую надежность технических средств, остается актуальной задача обеспечения надежности ВС как за счет свойств живучести (перераспределения выполняемых функций), так и структурной избыточности.

Перспективными областями применения распределенной ВС для управления энергообъектами, разрабатываемой с использованием современных подходов, прежде всего являются центры противоаварийного управления различных уровней иерархии, системы ПА энергообъектов, а также сбор и передача информации, АСДУ, АСУТП.

Литература

1. Корнеев В.В., Монахов О.Г., Тарков М.С. Ядро операционной системы ЭМ вычислительной системы с программируемой структурой// Однородные вычислительные системы (Вычислительные системы, Вып.90), ИМ СО АН СССР, Новосибирск, 1981 г., с.22-42.
2. Задорожный А.Ф., Корнеев В.В., Тарков М.С. Об организации коммуникаций между процессами в вычислительной системе

- МИКРОС// Распределенная обработка информации (Вычислительные системы, вып. 105), ИМ СО АН СССР, Новосибирск, 1984 г., С.70-84.
3. Корнеев В.В., Тарков М.С. Операц. система микромашиной вычисл. системы с программируемой структурой МИКРОС// Микропроцессорные средства и системы, 1988, №4, С.41-44.
 4. Захаркин О.В., Петров А.М. Алгоритмы управления послеаварийными режимами ЭЭС для комплекса на базе микропроцессорных систем с распределенной обработкой информации// Труды Пятого Международного семинара «Распределенная обработка информации» (РОИ-95).- Новосибирск, 1995.- С.248-253.
 5. Ландман А.К., Нестеренко Н.Г. Параллельный алгоритм выбора управляющих воздействий для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы// Труды Шестого Международного семинара «Распределенная обработка информации» (РОИ-98).- Новосибирск, 1998. – С.523-527.

Об авторах

Задорожный А.Ф., Институт физики полупроводников СО РАН.

Тарков М.С., Институт физики полупроводников СО РАН.

Захаркин О.В., ЗАО «ИАЭС», заведующий лабораторией, к.т.н. Тел. (383) 3630265, e-mail: iaes@iaes.ru

Петров А.М., ЗАО «ИАЭС», генеральный директор, к.т.н. Тел. (383) 3630264, e-mail: petrov@iaes.ru

Петров А.Э., ЗАО «ИАЭС», технический директор. Тел. (383) 3630265, e-mail: alexey@iaes.ru

Сакаев О.О., ЗАО «ИАЭС», главный специалист отдела ТС и ПО. Тел. (383) 3630265, e-mail: oskar@iaes.ru