



Секретариат



## **Использование отказоустойчивых распределенных вычислительных систем для управления электроэнергетическими системами**

**А.К. ЛАНДМАН, А.М. ПЕТРОВ, А.Э. ПЕТРОВ, О.О. САКАЕВ**

**ЗАО «Институт автоматизации энергетических систем»**

**А.Ф. ЗАДОРОЖНЫЙ, М.С. ТАРКОВ**

**Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова**

**Россия**

**iaes@iaes.ru**

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

Распределенные вычисления, управление электроэнергетическими объектами, отказоустойчивость.

### **1 ВВЕДЕНИЕ**

В последнее десятилетие был отмечен существенный прогресс в области развития технических и программных средств, что, в свою очередь, влечет за собой изменение подходов к построению систем управления электроэнергетическими объектами.

Необходимо отметить, что в настоящее время системы управления энергетическими объектами, в том числе цифровые подстанции, как правило, строятся без учета возможности распределения вычислений, уделяя внимание в большей степени задаче сбора информации. Кроме того, традиционные способы обеспечения надежности связей между элементами системы имеют ряд особенностей, которые при массовом переходе на цифровые подстанции оборачиваются недостатками.

Рассмотрим методологические наработки, современные подходы к разработке и перспективы использования распределенных ВС для построения систем управления энергетическими объектами.

## **2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЪЕКТАМИ**

### **2.1 Общие положения**

Для широкого спектра задач управления электроэнергетическими объектами характерны: необходимость обеспечения бесперебойного 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) [1-5].

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). 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, а 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.

Исследования в данном направлении проводятся в течение долгого времени. Так, в середине 80-х годов прошлого века была разработана специализированная распределенная операционная система МИКРОС [1-3], преследующая цель сочетания режима высокоэффективного параллельного решения задач с обеспечением услуг, предоставляемых сетями ЭВМ.

В связи с постоянным развитием архитектурных решений, используемых в микропроцессорных вычислительных системах, меняются и подходы, используемые для построения вычислительных систем с программируемой структурой.

## *2.2 Современные подходы к построению распределенных вычислительных систем*

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 важным моментом, прежде всего, является появление доступных многопроцессорных микропроцессорных устройств.

Существует несколько вариантов архитектуры построения многопроцессорных систем:

- использование специализированных материнских 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.

Не менее важными моментами также являются:

- увеличение скорости сетевых адаптеров до 1000 МБит/с, что позволяет сократить время обмена информацией между устройствами.
- увеличение количества сетевых адаптеров, встраиваемых непосредственно в материнские платы.

В связи с этим, можно 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).

С учетом вышеизложенного, в [4] определены подходы к разработке программного обеспечения отказоустойчивых ВС для управления электроэнергетическими системами. Рассмотрим далее подходы к организации надежной связи между элементами такой ВС.

### *2.3 Подходы к организации сетей связи между элементами распределенной ВС*

Для современных систем управления электроэнергетическими объектами, с массовым внедрением микропроцессорных устройств, характерен переход от использования отдельно стоящих устройств, связанных между собой косвенно, по управляемому объекту или по принципу действия (например, шкафы РЗ и ПА, устанавливаемые на одно присоединение некоторой подстанции), к их интеграции в единую сеть, с целью сбора информации и управления. При этом связь между устройствами на физическом уровне строится, как правило, на базе шинной архитектуры, в последнее время все большее распространение в данной области приобретает Industrial Ethernet.

Появились тенденции перехода на полностью цифровые подстанции, в этом случае через цифровую сеть связи должны в реальном времени передаваться как измеряемые величины, так и команды на исполнительные устройства. Фактически, сеть связи на цифровой подстанции является активным элементом контура управления, что обуславливает возрастающие требования по надежности и быстродействию. В частности, к активному сетевому оборудованию на цифровой подстанции должны предъявляться требования по надежности, аналогичные таковым к устройствам РЗ и ПА.

Надежность на физическом уровне обеспечивается, как правило, дублированием шины либо организацией резервированных колец. Однако традиционные подходы обеспечения надежности сети связи имеют ряд очевидных недостатков:

1. Наличие большого числа дополнительного активного оборудования в контуре управления, используемого только для организации сети связи.

2. Значительное усложнение эксплуатации системы за счет необходимости обслуживания сетевой инфраструктуры.

3. Необходимость привлечения ИТ-специалистов для обслуживания устройств, работающих в контуре управления.

Более перспективным представляется подход, при котором сеть связи (и объединенные ею микропроцессорные устройства) является частью распределенной ВС с программируемой структурой. Данный подход обладает, по сравнению с традиционными, следующими преимуществами:

1. Исключается или минимизируется, в зависимости от выбранной топологии, использование дополнительного активного сетевого оборудования.

2. Линии связи прокладываются непосредственно между микропроцессорными устройствами, согласно выбранной топологии сети.

3. Функцию коммутации пакетов информации выполняет само микропроцессорное устройство как одну из технологических функций, что сводит к минимуму вероятность

нештатного поведения сети связи. На физическом уровне данная возможность обеспечивается за счет оснащения устройства необходимым количеством сетевых адаптеров (см п. 2.2).

4. Для обслуживания сети связи не требуется высококвалифицированный IT-персонал, поскольку работы по обслуживанию сводятся к проверке кабельных связей между устройствами.

Существуют определенные методики выбора структуры сети связи, обеспечивающей заданную надежность ВС. Рассмотрим их подробнее.

Под структурой распределенной ВС по определению понимается граф  $G$ , вершинам которого сопоставлены элементарные машины (в нашем случае – микропроцессорные устройства управления энергообъектом), а ребрам – линии связи между ними [5]. При формировании структуры ВС должны быть учтены следующие требования:

1. Обеспечение эффективного межмашинного обмена информацией при большом числе устройств в условиях невозможности реализации связей по полному графу (каждый-с-каждым), поскольку полносвязный граф крайне трудно реализуем технически и в силу этого экономически нецелесообразен.

2. Обеспечение простоты наращивания и сокращения числа устройств.

3. Обеспечение однородности структуры и однотипности устройств.

В качестве структур, удовлетворяющих данным требованиям, можно выделить  $L(N, v, g)$ -графы. Это неориентированный однородный граф с числом и степенями вершин соответственно  $N$  и  $v$  и значением обхвата (длиной кратчайшего простого цикла)  $g$ . В  $L(N, v, g)$ -графах каждая вершина при  $v \geq 3$  входит в  $v$  кратчайших простых циклов длиной  $g$ . При  $v=2$   $L$ -граф является простым циклом с  $N$  вершинами, что соответствует кольцевой структуре ВС.  $L$ -графы, в которых достигается минимум диаметра  $d$  и, следовательно, минимум задержек информации при передаче, называют оптимальными. На рис. 1 приведены примеры оптимальных  $L(8, 3, 4)$  и  $L(8, 4, 4)$ -графов.

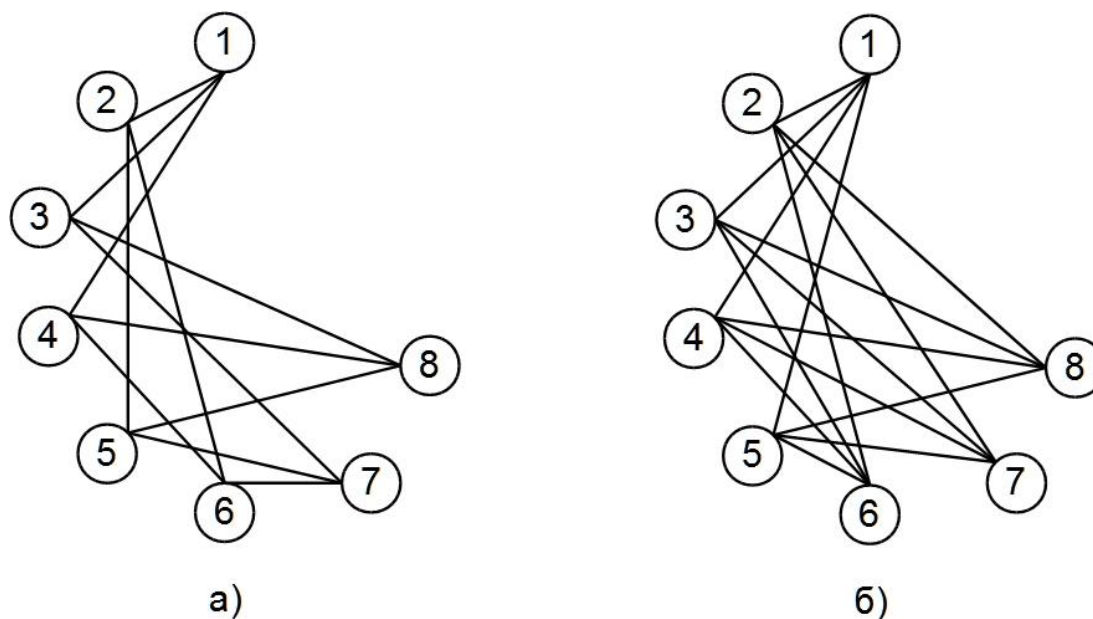


Рис. 1: Примеры оптимальных  $L$ -графов: а –  $L(8, 3, 4)$ -граф, б –  $L(8, 4, 4)$ -граф

В ходе работ по изучению зависимости структурной живучести ВС от числа полюсов  $v$  в каждой машине, проведенных в рамках проекта МИКРОС в СО АН СССР, а затем продолженных в СО РАН, было установлено, что высокие значения вероятности связности исправных устройств в системе при их отказе и при отказе линий связи достигаются уже при  $v=4$  [5]. Таким образом, для построения распределенной ВС, обеспечивающей надежность связи между ее элементами, достаточно ограничиться двух-, трех- или четырехполюсными элементарными машинами.

В рамках задачи управления энергообъектом при выборе структуры распределенной ВС необходимо учитывать возможно одновременного вывода из работы нескольких устройств (при производстве регламентных работ, при отказе оборудования и т.п.). В связи с этим,  $L(N, 2, g)$ -графы и соответствующие им кольцевые схемы целесообразно исключить из рассмотрения, поскольку вывод любых двух устройств в такой схеме необратимо нарушает ее связность. Необходимо учитывать также, что связность графа может нарушиться при одновременном выводе из работы устройств, смежных с данным. Так, при выводе любых трех соседних устройств необратимо нарушается связность графа на рис. 1а, а при выводе четырех соседних устройств нарушается связность графа на рис. 1б. Поэтому при выборе структуры ВС представляется целесообразным использовать  $L(N, 4, g)$ -графы. При большом количестве устройств в системе можно признать допустимым использование схем на базе  $L(N, 3, g)$ -графов, с тем, чтобы минимизировать количество кабельных связей.

### 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом коренных изменений, произошедших за последние 10 лет на рынке вычислительных средств для промышленной автоматизации, изменились и подходы к созданию систем управления электроэнергетическими объектами. Особое внимание при этом должно быть уделено задаче организации надежной связи между микропроцессорными устройствами, входящими в систему управления.

Наиболее перспективным, по сравнению с традиционными способами решения данной задачи, представляется подход, при котором сеть связи (и объединенные ею микропроцессорные устройства) является частью распределенной вычислительной системы с программируемой структурой. В рамках данного подхода существуют методики выбора структуры сети связи, обеспечивающей как оптимальную надежность, так и оптимальное быстродействие. С этой точки зрения, целесообразно построение структуры сети на базе  $L(N, 4, g)$ -графов.

При построении системы управления энергообъектом на базе распределенной вычислительной системы с программируемой структурой, появляется возможность не просто обеспечить надежность обмена информацией между микропроцессорными управляющими устройствами, но и значительно повысить надежность системы управления за счет перераспределения задач между ними.

### 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. Операционная система микромашинной вычислительной системы с программируемой структурой МИКРОС// Микропроцессорные средства и системы, 1988, №4, С.41-44.
- [4] Задорожный А.Ф., Тарков М.С., Захаркин О.В., Петров А.М., Петров А.Э., Сакаев О.О. Программное обеспечение отказоустойчивых распределенных вычислительных систем для управления электроэнергетическими системами. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – Спецвыпуск. – №1. – С.155-160.
- [5] Корнеев В.В. Архитектура вычислительных систем с программируемой структурой. – Новосибирск: Наука, 1985. – 166 с.