

3.2. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВА ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ. АРХИТЕКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

3.2.1 Принципы технической реализации модели коллектива вычислителей

Каноническое описание модели коллектива вычислителей (см. 3.1), основополагающие принципы ее конструкции, а также состояние микроэлектроники и уровень развития (параллельной) вычислительной математики определяют принципы технической реализации модели или принципы построения вычислительных систем (ВС). Выделим “модульность” и “близкодействие” как главные принципы технической реализации модели коллектива вычислителей.

Модульность – принцип, предопределяющий формирование вычислительной системы из унифицированных элементов (называемых модулями), которые функционально и конструктивно закончены, имеют средства сопряжения с другими элементами и разнообразие которых составляет полный набор. Функциональные и конструктивные возможности модулей, разнообразие их типов определяются исходя из требований, предъявляемых к ВС, и, безусловно, из возможностей микроэлектронной базы.

Модульность вычислительной системы обеспечивает:

- 1) возможность использования любого модуля заданного типа для выполнения любого соответствующего ему задания пользователя;
- 2) простоту замены одного модуля на другой однотипный;
- 3) масштабируемость, т.е. возможность увеличения или уменьшения количества модулей без коренной реконфигурации связей между остальными модулями;
- 4) открытость системы для модернизации, исключаящую ее моральное старение.

Следует заметить, что принцип модульности распространим и на средства программного обеспечения вычислительных систем.

При конструировании ВС с массовым параллелизмом достаточно ограничиться единственным модулем–вычислителем, который бы обладал вычислительной и соединительной полнотой. Следовательно, модуль должен иметь средства автономного управления, располагать арифметико-логическим устройством и памятью и содержать локальный коммутатор – схему для связи с другими модулями. На практике принято такой модуль–вычислитель называть либо *элементарным процессором* (ЭП), либо *элементарной машиной* (ЭМ). При этом считается, что ЭП это композиция из процессора и локального коммутатора. Разрядность таких ЭП в различных вычислительных системах колеблется от 1 до 64. Под элементарной машиной понимается архитектурно более развитая композиция из ЭВМ и локального коммутатора.

Близкодействие – принцип построения ВС, обуславливающий такую организацию информационных взаимодействий между модулями–вычислителями, при которой каждый из них может непосредственно (без “посредников”) обмениваться информацией с весьма ограниченной частью модулей–вычислителей. Следовательно, структура ВС позволяет осуществлять информационные взаимодействия между удаленными вершинами–вычислителями лишь с помощью промежуточных вершин–вычислителей, передающих информацию от “точки к точке” (point-to-point). Удаленными считаются все те вершины в структуре ВС, расстояние между которыми более 1 (число ребер между которыми более единицы).

Принцип близкодействия допускает реализацию механизма управления ВС (организации функционирования коллектива вычислителей как единого целого), не зависящий от числа составляющих ее вычислителей. Данный принцип, в частности, выражается в том, что поведение каждого вычислителя $c_i \in C$ зависит от поведения только ограниченного подмножества $C^* \subset C$ других вычислителей системы.

Во взаимосвязи с принципом близкодействия говорят также о *локальности связей и взаимодействий между вычислителями*. Последнее означает, что состояние $E_i(t+1)$ вычислителя c_i , $i \in \{0, 2, \dots, N-1\}$, на очередном временном шаге $t+1$ зависит от состояний (на предшествующем шаге t) непосредственно с ним связанных вычислителей $c_j \in C^*$, т.е. оно является функцией:

$$E_i(t+1) = f(E_i(t), E_{i_1}(t), E_{i_2}(t), \dots, E_{i_M}(t));$$

здесь i_l , $l = \overline{1, M}$, – номера вычислителей, составляющих C^* , $M < N$. При этом вычислители подмножества

$$C^* = \{c_{i_1}, c_{i_2}, \dots, c_{i_M}\}$$

называются соседними по отношению к $c_i \in C$. Для достижения однородности структуры сети связей необходимо, чтобы каждый вычислитель был соединен с M другими вычислителями.

Вычислительные системы, основанные на принципах модульности и близкодействия, удовлетворяют также требованиям асинхронности, децентрализованности и распределенности.

Асинхронность функционирования ВС обеспечивается, если порядок срабатывания ее модулей определяется не с помощью вырабатываемых тем или иным образом отметок времени, а достижением заданных значений определенных (как правило, логических) функций. Использование асинхронных схем позволяет достичь в системе алгоритмически предельного быстродействия: модули ВС срабатывают немедленно после достижения соответствующего условия. Применение асинхронных схем обмена информацией между вычислителями позволяет не учитывать разброс в их тактовых частотах и колебания времени задержки сигналов в линиях связи.

Децентрализованность управления ВС достигается, если в системе нет выделенного модуля, который функционирует как единый для всей системы центр управления. Децентрализованное управление системой основано на совместной работе всех исправных модулей системы, направленной на принятие решений, доставляющих оптимум выбранной целевой функции. Выполняя свою часть работы по выработке согласованного решения об управлении системой, каждый модуль пользуется только локальной информацией о системе.

1) Децентрализованное управление системой (в достичь живучести ВС, т.е. способности ВС продолжать работу при отказах модулей (в том числе и тех, которые предназначены для принятия решений);

2) избежать очередей при обслуживании “заявок” на управление.

отличие от централизованного) позволяет:

Распределённость ресурсов ВС. Под ресурсами ВС понимаются все объекты, которые запрашиваются, используются и освобождаются в ходе выполнения вычислений. В качестве ресурсов ВС выступают процессоры или даже модули, входящие в их состав, модули оперативной памяти, внешние устройства, линии межмодульных связей, шины, файлы данных, компоненты программного обеспечения. Принято называть *распределенной ВС*, такую систему, в которой нет единого ресурса, используемого другими в режиме разделения времени. Вместе с этим каждый ресурс распределённой ВС рассматривается как общий, доступный любому потребителю.

3.2.2. Архитектурные свойства ВС

Основополагающие принципы (параллелизма, программируемости, однородности) и принципы модульности и близкодействия (см. 3.1.1 и 3.2.1) позволяют достичь полноты архитектурных свойств в вычислительных системах. Отметим важнейшие свойства архитектуры ВС. При этом сразу же заметим, что не все свойства и не в полной мере могут проявляться в той или иной реализации ВС.

Масштабируемость (Scalability) вычислительных систем

Под масштабируемостью ВС понимается их способность к наращиванию и сокращению ресурсов, возможность варьирования производительности. Сложность (трудоемкость) задач, решаемых на вычислительных средствах, постоянно растет. Для сохранения в течении длительного времени за вычислительной системой способности быть адекватным средством решения сложных задач необходимо, чтобы она обладала архитектурным свойством масштабируемости. Это означает, в частности, что производительность, достигнутую ВС на заданном количестве вычислителей, можно увеличить, добавив еще один или несколько вычислителей. Выполнение этого свойства ВС гарантируется принципами модульности, локальности, децентрализованности и распределённости.

Свойство наращиваемости производительности предоставляет потенциальную возможность решать задачи любой априори заданной сложности. Однако для практической реализации этой возможности требуется, чтобы алгоритм решения сложной задачи удовлетворял условию локальности, а межмодульные пересылки информации слабо влияли на время решения задачи. Это может быть достигнуто за счет крупноблочного распараллеливания сложных задач и (или) аппаратных средств, позволяющих совместить межмодульные обмены информацией с вычислениями.

Универсальность ВС. Вычислительные системы алгоритмически и структурно универсальны.

Принято считать, что ЭВМ (основанные на модели вычислителя) являются алгоритмически универсальными, если они обладают способностью (без изменения своих структур) реализовать алгоритм решения любой задачи. С другой стороны, ВС – это коллектив вычислителей, каждый из которых обладает алгоритмической универсальностью, следовательно, и система универсальна (в общепринятом смысле).

В вычислительных системах могут быть реализованы не только любые алгоритмы, доступные ЭВМ, но и параллельные алгоритмы решения сложных задач. Последнее следует из определений модели коллектива вычислителей (3.7) и, в частности, алгоритма функционирования ВС (3.3).

Структурная универсальность ВС – следствие воплощения архитектурных принципов коллектива вычислителей (см. 3.1.1), в частности, принципа программируемости структуры. Суть этого принципа – возможность автоматически (программно) порождать специализированные (проблемно-ориентированные) виртуальные конфигурации, которые адекватны структурам и параметрам решаемых задач.

Таким образом, вычислительные системы сочетают в себе достоинства цифровой техники, где процесс вычислений в основном задаётся алгоритмически (точнее: программно) и аналоговой техники, где процесс вычислений предопределяется структурными схемами.

Структурная универсальность позволяет говорить и о специализированности ВС: для каждой задачи допустима автоматическая настройка такой конфигурации из ресурсов ВС, которая наиболее адекватна алгоритму решения задачи. Итак, *вычислительная система – это средство, в котором диалектически сочетаются противоположные свойства универсальности и специализированности.*

Алгоритмическая и структурная универсальность проявляются также в возможности организации “виртуальных” конфигураций с произвольной архитектурой (на уровне потоков команд и данных) и реализации в системе известных режимов обработки информации.

Производительность (Performance) вычислительных систем

В отличие от ЭВМ, построенных на основе модели вычислителя, ВС не имеют принципиальных ограничений в наращивании производительности. Рост производительности в них достигается за счёт не только повышения физического быстродействия микроэлектронных элементов, а главным образом увеличения числа вычислителей. Следует подчеркнуть, что благодаря свойству однородности наращиваемость ВС осуществляется простым подключением дополнительных вычислений без конструктивных изменений первоначального состава системы. При этом достигается простота настройки программного обеспечения на заданное число вычислителей в системе. На основании последнего обеспечивается *совместимость* ВС различной производительности.

Полнота воплощения принципа параллелизма при выполнении операций позволяет достичь априори заданной производительности ВС как в монопрограммном режиме (при решении одной сложной задачи, т.е. задачи с большим числом операций), так и в мультипрограммных режимах (при обработке наборов и обслуживании потоков задач произвольной сложности). Задачи представляются параллельными программами, число ветвей в каждой из которых является, в частности, функцией от сложности задачи. Значения производительности, ёмкости памяти, скорости ввода-вывода информации для системы определяются числом вычислителей и их составом.

Реконфигурируемость (Programmability) вычислительных систем

Структурная и функциональная гибкости ВС вытекают из широких возможностей систем по статической и динамической реконфигурации. *Статическая реконфигурация ВС* обеспечивается: варьированием числа вычислителей, их структуры и состава; выбором для вычислителей числа полюсов для связи с другими вычислителями; возможностью построения структур в виде графов, относящихся к различным классам; допустимостью применения в качестве связей каналов различных типов, различной физической природы и различной протяжённости и т.п. Благодаря приспособленности ВС к статической реконфигурации достигается адаптация системы под область применения на этапе её формирования.

Динамическая реконфигурация ВС достигается возможностью образования в системах таких подсистем, структуры и функциональные организации которых адекватны входной мультипрограммной ситуации и структурам решаемых задач. Следовательно, способность ВС к динамической реконфигурации приводит к её высокой *универсальности*, при которой достигается заданный уровень производительности при решении широкого класса задач, реализуются известные в вычислительной технике режимы функционирования (коллективное пользование, пакетная обработка и др.), способы управления вычислительным процессом (централизованный, децентрализованный и др.), структурные схемы (изолированные вычислительные машины, системы из нескольких процессоров и одной ЭВМ, системы из одной ЭВМ и нескольких устройств памяти и т.п.) и способы обработки информации (конвейерный, матричный, распределённый и др.).

Способность ВС к динамической реконфигурации является следствием полноты воплощения принципов коллектива вычислителей и прежде всего принципа программируемости структуры. Такая способность ВС позволяет ей в процессе функционирования производить автоматическую перенастройку своей структуры для реализации обменов информацией между вычислителями, осуществлять “подстройку” состояний функциональных устройств и узлов в вычислителях с целью достижения адекватности между ВС и совокупностью совместно протекающих в ней процессов.

Надёжность и живучесть ВС

Данные два понятия семантически близки, оба призваны характеризовать архитектурные способности ВС по выполнению возглавляемых на них функций. Однако каждое из них отражает специфические особенности ВС по использованию исправных ресурсов при переработке информации.

Под надёжностью (Reliability) ВС понимается способность автоматической (программной) настройки таких структурных схем и организации их функционирования, которые в условиях отказов и восстановлений вычислителей обеспечивают при реализации параллельных программ решения сложных задач заданный уровень производительности или, говоря иначе, возможность использовать фиксированное число исправных вычислителей. Это понятие характеризует возможности ВС по переработке информации при наличии фиксированной структурной избыточности (представленной частью вычислителей) и при использовании параллельных программ с фиксированным числом ветвей.

При изучении надёжности ВС под *отказом* понимается событие, при котором система теряет способность выполнять функции, связанные с реализацией параллельной программы с заданным числом ветвей. Если ВС находится в состоянии отказа, то число неисправных вычислителей превосходит число вычислителей, составляющих структурную избыточность. Понятие надёжности ВС вкладывается в общепринятое понятие надёжности систем, а структурные схемы, порождаемые в пределах ВС для надёжной реализации параллельных программ с фиксированным числом ветвей, выступают как виртуальные системы и выказывают достаточную близость к системам с (нагруженным) резервом.

Под живучестью (Robustness) ВС понимается свойство программной настройки и организации функционирования таких структурных схем, которые в условиях отказов и восстановления вычислителей гарантируют при выполнении параллельной программы производительность в заданных пределах или возможность использования всех исправных вычислителей. Понятие живучести вычислительных систем характеризует их способности по организации отказоустойчивых вычислений или, говоря иначе, по реализации параллельных программ, допускающих варьирование числа ветвей в известных пределах.

При рассмотрении живучести ВС выделяют *полный и частичный отказы*. Под полным отказом ВС понимается событие, состоящее в том, что система теряет способность выполнять параллельную программу с переменным числом ветвей. Частичным отказом считают событие, при котором имеют место отказы вычислителей, однако сохраняется возможность реализации на ВС параллельной программы с переменным числом ветвей. Полный отказ делает производительность системы равной нулю, а частичный отказ приводит лишь к некоторому снижению производительности, т.е. к увеличению времени реализации параллельной программы с переменным числом ветвей. Понятия полного и частичного восстановления ВС очевидны.

В живучих ВС допустимо использование аппаратурной избыточности на уровне отдельных функциональных устройств и узлов вычислителей, однако эта избыточность играет лишь вспомогательную роль.

Следует подчеркнуть, что *в живучей ВС в любой момент функционирования используется суммарная производительность всех исправных вычислителей*. Из последнего следует, что программы решения задач должны обладать свойством адаптируемости (под число исправных вычислителей) и иметь информационную избыточность.

Ясно, что описанные выше (см. 3.2.1) принципы технической реализации вычислительных систем, как коллективов вычислителей, суть необходимые условия достижения ими свойства живучести.

Самоконтроль и самодиагностика (Self-testing and Self-diagnostics) ВС

Организация надёжного и живучего функционирования вычислительных систем связана с контролем правильности их работы и с локализацией неисправностей в них. В системах–коллективах вычислителей может быть применён нетрадиционный подход к контролю и диагностике:

1) в качестве контрольно-диагностического ядра ВС могут быть использованы любые исправные вычислители и в пределе ядро любого произвольно выбранного вычислителя,

2) выбор ядра системы и определение её исправности могут быть произведены автоматически (с помощью средств ВС).

Предлагаемый подход позволяет говорить о самоконтроле и самодиагностике ВС. Заключение об исправности или неисправности отдельных вычислителей системы принимается коллективно всеми вычислителями на основе сопоставления их индивидуальных заключений об исправности соседних с ними вычислителей.

Сказанное выше относительно надёжности, живучести, самоконтроля и самодиагностики ВС в равной степени относится и к отдельным частям систем, к их подсистемам. Следовательно, надёжность и живучесть ВС могут быть достигнуты и в случае мультипрограммной работы.

Технико-экономическая эффективность (Technical-economical Efficiency) ВС

Конструктивная однородность позволяет резко сократить сроки разработки и изготовления систем, приводит к высокой технологичности производства, упрощает и статическую, и динамическую реконфигурации ВС, облегчает их техническую эксплуатацию. Она существенно упрощает процесс организации взаимодействий между вычислителями ВС и облегчает создание программного обеспечения. Полнота воплощения трёх основных принципов модели коллектива вычислителей позволяет заметно ослабить зависимость между ростом производительности ВС и увеличением трудоёмкости их проектирования и изготовления, а также создания системного программного обеспечения. Они открывают возможность построения высокопроизводительных экономически приемлемых вычислительных систем при существующей физико-технологической базе. Более того, возможность неограниченно наращивать производительность позволяет применить для построения ВС микроэлектронные элементы с быстродействием, далеким от предельного, и следовательно, обладающие более высокой надёжностью и меньшим энергопотреблением. В свою очередь, последнее приводит к снижению расходов на установку искусственного климата и содержание эксплуатационного персонала ВС.