

7.1. ПОНЯТИЕ О ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ

В главах 4-6 было показано, что в конвейерных, матричных и мультипроцессорных ВС принципы модели коллектива вычислителей воплощены не достаточно полно. Пожалуй самым главным недостатком архитектуры таких ВС является наличие единого ресурса (устройства управления, управляющей ЭВМ, коммутатора и т.п.). Отказ единого ресурса приводит к отказу ВС в целом, что не приемлемо даже с позиций надежности и живучести. Единый ресурс не позволяет организовать мультипрограммную работу, при которой на различных подсистемах – связанных подмножествах технических ресурсов (элементарных процессорах) – будут выполняться одновременно различные программы.

Значительный прогресс в практической реализации принципов модели коллектива вычислителей обеспечивается вычислительными системами с распределенными средствами управления. В отечественных научно-технических работах к названным системам, как уже отмечалось, относят ВС с программируемой структурой.

В вычислительных системах с программируемой структурой диалектически сочетаются (см. 3.2.2) архитектурные свойства универсальных и специализированных средств обработки информации. Рассматриваемые ВС – это универсальные параллельные компьютеры, которые способны программно настраиваться под структуру и параметры решаемых задач. Оценка отмеченных архитектурных свойств ВС с программируемой структурой сделана в докладе математика и механика Н.Н. Яненко (1921–84; академик АН СССР с 1970 г.). на Конференции по проблеме "ЭВМ. Перспективы и гипотезы", посвященной дню Советской науки (Новосибирск, СО АН СССР, 17 апреля 1981 г.). В частности, академик Н.Н. Яненко сказал: "Чем шире класс задач, охватываемой специализированной машиной, тем сложнее её структура и как наиболее совершенную форму ЭВМ следует рассматривать ЭВМ с перестраиваемой структурой" [4].

Ниже будут даны описания сосредоточенных и распределенных ВС, составляющих класс систем с программируемой структурой.

7.1.1. Определение ВС

При построении ВС с программируемой структурой доминирующими являются следующие три принципа:

- 1) *массовый параллелизм* (параллельность выполнения большого числа операций);
- 2) *программируемость* (автоматическая перестраиваемость или реконфигурируемость) структуры;
- 3) *конструктивная однородность*.

Следует подчеркнуть, что принцип программируемости структуры ВС является таким же важным, каким в свое время было предложение Дж. фон Неймана относительно организации в ЭВМ автоматической модификации программ. (Он предложил хранить программу в памяти машины вместе с данными, что позволило модифицировать программу с помощью самой ЭВМ.) *Принцип программируемости структуры требует, чтобы в ВС была реализована возможность "хранения" программного описания функциональной структуры и программной ее модификации (перенастройки) с целью достижения адекватности структурам и параметрам решаемых задач.*

Под ВС с программируемой структурой понимается совокупность элементарных машин, функциональное взаимодействие между которыми осуществляется через программно настраиваемую сеть связи. Элементарная машина (ЭМ) – это композиция из вычислительного модуля и системного устройства. Вычислительный модуль (ВМ) служит как для переработки и хранения информации, так и для выполнения функций по управлению системой в целом. Системное устройство (СУ) – это та аппаратная часть ЭМ, которая предназначена только для обеспечения взаимодействия данной ЭМ с ближайшими соседними машинами, (точнее, с системными устройствами, с которыми

имеется непосредственная связь). Фрагмент возможной структуры ВС рассматриваемого класса был уже показан на рис. 3.7 и 6.8.

Под ВМ в общем случае понимается аппаратно-программный комплекс, структура и состав которого допускают варьирование в широких пределах. Здесь под ВМ будем понимать лишь аппаратную часть этого комплекса. Минимальный состав ВМ представляется (элементарным или локальным) процессором с (локальной) оперативной памятью; промежуточный – ЭВМ с каналами (например, прямого доступа к памяти, селекторными, мультиплексными), внешними запоминающими устройствами, устройствами ввода-вывода информации, терминалами и т.п.; максимальный – вычислительной системой (или средством, основанным на модели коллектива вычислителей). Вычислительные модули могут быть произвольного состава, но для компоновки каждого из них в пределах одной ВС, как правило, используется один и тот же тип процессора. При более широкой трактовке класса ВС с программируемой структурой можно ограничиться лишь требованием программной совместимости вычислительных модулей.

Простейшие и развитые конфигурации СУ – это локальный коммутатор и коммуникационный процессор. Простейшая конфигурация – это элементарный процессор, т.е. композиция локального процессора (арифметико-логического устройства и локальной памяти) и предельно простого локального коммутатора (рис. 3.7).

Системы с программируемой структурой предназначаются для решения задач произвольной сложности (с произвольным объемом вычислений) как в моно-, так и в мультипрограммным режимах, они могут использоваться как вычислительные средства общего назначения либо как проблемно-ориентированные, могут эксплуатироваться автономно либо в составе сложной системы.

7.1.2. Сосредоточенные и распределенные ВС

Из 7.1.1 следует, что вычислительные системы с программируемой структурой являются распределенными средствами и в архитектурном, и в функциональном планах. В самом деле, в них любые ресурсы (процессоры, память и устройства управления и системные) представляются множествами соответствующих модулей. Тем не менее в классе вычислительных систем с программируемой структурой выделяют (пространственно) сосредоточенные и распределенные ВС. Характерной особенностью сосредоточенных ВС является компактное пространственное размещение средств обработки и хранения информации, при котором нет необходимости использовать телекоммуникационные сети (существующие абонентские или специально разработанные сети передач данных). В сосредоточенных системах нет линий связи, вносящих существенную задержку в работу ВС, нет жестких ограничений на топологию сети связи, на возможность параллельной передачи информации между функциональными модулями (процессорами, модулями памяти, ЭВМ и др.). В таких ВС среднее время передачи слова между функциональными модулями соизмеримо со средним временем выполнения одной операции в процессоре.

К распределенным ВС относят макросистемы – системы сложной конфигурации, в которых в качестве функциональных элементов выступают пространственно рассредоточенные вычислительные средства, основанные на моделях вычислителя и коллектива вычислителей, и сети связи, обеспечивающие взаимный теледоступ между средствами обработки информации. *Распределенная ВС – это объединение пространственно удаленных друг от друга сосредоточенных ВС, основанное на принципах:*

1) *параллельности* функционирования сосредоточенных ВС (т.е. способности нескольких или всех сосредоточенных систем совместно и одновременно решать одну сложную задачу, представленную параллельной программой);

2) *программируемости структуры* (т.е. возможности автоматически настраивать сеть связи между сосредоточенными ВС);

3) *гомогенности состава* (т.е. программной совместимости различных сосредоточенных ВС и однотипности элементарных машин в каждой из них).

Распределенные ВС в общем случае предназначены для реализации параллельных программ решения задач (произвольной сложности или с произвольным объемом вычислений, в монопрограммном и мультипрограммном режимах) на рассредоточенных в пространстве вычислительных ресурсах. Они должны быть приспособленными и для выполнения функций, присущих вычислительным сетям, для реализации последовательных программ. В распределенных ВС допустимо централизованное и децентрализованное управление вычислительными процессами. Использование “длинных” каналов связи приводит в общем случае к необходимости учета запаздывания сигналов при передаче по ним информации.

Любое функциональное взаимодействие между сосредоточенными ВС, составляющими распределенную систему, производится через сеть связи. В сеть связи включаются каналы и СУ, распределенные по сосредоточенным ВС. В распределенных ВС нет принципиальных ограничений на физическую природу каналов; в них могут быть использованы двухпроводные, коаксиальные и радиорелейные линии связи, средства коммуникации на основе волоконной оптики, микроволновой и спутниковой связи и др. На СУ возлагается выполнение функций, свойственных системным устройствам для сосредоточенных ВС и устройствам связи для вычислительных сетей. Среди элементарных функций любого СУ есть осуществление обмена информацией между сосредоточенной ВС и каналом, а также может быть обеспечение транзитной передачи информации. Для мощных распределенных ВС системное устройство может быть реализовано как параллельный сервер.

Предельным по простоте вариантом сосредоточенной ВС является ЭМ, следовательно, простейшим вариантом распределенной ВС будет совокупность однотипных и регулярно соединенных ЭМ, использующая “длинные” программно-коммутируемые каналы межмашинной связи. В этом случае в состав ЭМ входят однотипные СУ.

Более развитым вариантом распределенных ВС являются системы, структура сети связи которых в целом является нерегулярной и которые komponуются из программно-совместимых ЭВМ. В данном случае сеть связи организуется посредством программно-совместимых системных устройств. В топологическом плане такие ВС классифицируются как централизованные, децентрализованные, кольцевые и радиально-кольцевые системы. Топологическое изображение названных систем аналогично схемам, общепринятым для вычислительных сетей.

Распределенные системы, в которых выполняется условие программной совместимости ЭВМ, будем относить к гомогенным ВС. В теоретическом плане можно рассматривать и гетерогенные распределенные ВС, состоящие из программно-несовместимых ЭВМ и сосредоточенных ВС и имеющие сеть связи с нерегулярной структурой. Однако реализация гетерогенных систем наталкивается на большие трудности, связанные прежде всего с организацией их эффективного функционирования.

В подкласс распределенных ВС входят вычислительные сети. Несмотря на внешнюю схожесть распределенных систем и сетей, имеется принципиальное отличие в их функционировании. Вычислительные сети производят обработку потоков задач, как правило, представленных последовательными программами. Параллельные программы могут иметь место, если в сети имеются сосредоточенные ВС (например, в сети ARPA такой системой была ILLIAC-IV; в глобальной сети Internet функционирует большое разнообразие конвейерных, матричных, кластерных и мультипроцессорных ВС). Далее, решение каждой задачи выполняется на отдельной ЭВМ или сосредоточенной ВС, совместное использование нескольких ЭВМ и (или) ВС для решения одной задачи не

допускается. При обслуживании потоков задач в вычислительных сетях осуществляются распределение нагрузки на ресурсы, передача информации, распределение программ и данных, дистанционная обработка и т.п. В сетях основным режимом является диалоговый, при котором взаимодействие происходит между двумя абонентами (пользователь–ЭВМ или ВС, пользователь–пользователь). Естественно, в сетях одновременно может происходить большое число диалогов. Работа вычислительной сети в этом отношении напоминает функционирование телефонной (проводной или сотовой) сети.

В распределенных ВС наряду с режимом работы, характерным для вычислительных сетей, реализуется также режим решения общей сложной задачи. Задача представляется параллельной программой, каждая макроветвь (или ветвь), которой реализуется на своей сосредоточенной ВС (или ЭВМ). Для распределенных ВС при решении одной сложной задачи характерен режим группового обмена информацией между абонентами (машины–машины, машины–пользователь).

Таким образом, *распределенные системы относятся к более общему классу средств обработки информации по сравнению с вычислительными сетями и качественно от них отличаются возможностью решения одной сложной задачи на распределенных вычислительных ресурсах.*

На производительность распределенных ВС (при реализации параллельных программ сложных задач) сильно влияют скорость передачи информации в каналах и запаздывание сигналов при передаче информации из одной сосредоточенной ВС (в простейшем варианте системы из одной ЭМ) в другую. В качестве мер снижения этого влияния могут служить совмещение счета с обменом информацией и применение в полной мере методики крупноблочного распараллеливания сложных задач (см. 3.3).

При распараллеливании процесса вычислений (разбиении задачи на параллельные ветви – информационно связанные подзадачи – и размещении их в элементарных машинах системы) нужно стремиться к укрупнению частей задачи, решаемых автономно каждой ЭМ, и к уменьшению количества информации, передаваемой по каналам между машинами. Практика распараллеливания сложных задач показывает, что по мере укрупнения “автономных” частей задачи имеет место уменьшение количества информации, передаваемой при межмашинных взаимодействиях. Поэтому даже при относительно малой скорости передачи информации по межмашинным каналам имеется реальная возможность эффективно решать задачу не только на сосредоточенных, но и на распределенных ВС (если эта задача может быть разбита на такие крупные подзадачи, время параллельного счета, для которых будет больше времени, расходуемого на обмен информацией между машинами, реализующими подзадачи).

При построении распределённых ВС большое значение приобретают экономические факторы. Так, стоимость распределённой ВС (в сравнении с сосредоточенной системой) в существенной мере определяется стоимостью достаточно дорогих физических каналов связи между рассредоточенными в пространстве вычислительными ресурсами (сосредоточенными системами или в простейшем случае – элементарными машинами). Следовательно, для снижения стоимости системы в целом приходится при построении ВС использовать минимальное число каналов связи между ЭМ. В простейших приложениях достаточно ограничиться топологией сети межмашинных связей, обеспечивающей непосредственную связь любой ЭМ с двумя ЭМ (достаточно использовать одномерные или кольцевые структуры), а также применить способ межмашинной передачи информации в последовательной форме.

Появившиеся в конце 20 столетия так называемые кластерные ВС или вычислительные кластеры суть варианты сосредоточенных и распределенных систем. Кластеры подразделяются на физические и логические. Первые кластеры являются специально сконфигурированными вычислительными системами из серийных аппаратурно-программных средств ЭВМ. Логические (или виртуальные) кластеры

организуются в аппаратно-программной среде вычислительных сетей. Для такой организации используются дополнительные системные средства, (как правило, программные), которые превращают вычислительную сеть в средство для реализации параллельных вычислений.

Материал, изложенный в последующих разделах книги, будет относиться в основном к сосредоточенным ВС. Здесь мы ограничимся ссылкой на книгу [3], в которой описана первая распределенная ВС с программируемой структурой АСТРА. Эта система была создана Институтом математики СО АН СССР и Новосибирским электротехническим институтом МВ и ССО РСФСР; работы по проектированию ВС были начаты в 1970 г., а первая модель была сдана в эксплуатацию в 1972 г. Было построено семейство моделей АСТРА, среди которых были городские и междугородные конфигурации (Новосибирск, Москва). Модели формировались из ЭВМ “Минск-32” и использовали телефонные каналы связи. Были выполнены проекты распределённых ВС и на базе машин третьего поколения семейства ЕС ЭВМ [3].

Целесообразно подчеркнуть, что современное информационное пространство – это локальные и распределённые корпоративные вычислительные сети и глобальная сеть Internet. Дальнейшим шагом в развитии архитектуры сетей должны стать распределенные вычислительные системы, способные реализовать параллельные алгоритм решения сложной задачи на рассредоточенных ЭВМ и ВС. По-видимому, наиболее перспективны распределённые ВС, основанные на принципах программируемости межмашинных связей и конструктивной однородности.

Опыт 70-х годов 20 столетия в создании и эксплуатации распределённых ВС убеждает в том, что такие системы суть эффективный инструмент решения сложных задач. Установлено, что при реализации параллельных программ сложных задач на n машинах распределённой ВС достигается производительность $A_n \cdot n \cdot \omega$, где коэффициент $A_n \geq 1$; ω – быстродействие одной ЭВМ. В распределённых вычислительных системах эффективно реализуются все режимы работы, характерные для вычислительных сетей.

Создание распределённых ВС из серийно выпускаемых ЭВМ и ВС не вызывает существенных инженерных и математических трудностей. Как правило, требуются незначительные доработки базового программного обеспечения, связанные с реализацией системных операций в виде подпрограмм и с введением системного диспетчера в операционную систему. Это же самое можно сказать и относительно организации (логических) вычислительных кластеров на базе существующих вычислительных систем.

Таким образом, распределённые вычислительные системы в сравнении с сетями являются более общим классом средств переработки информации.