

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ МИКРОС

Ю.К.Димитриев, В.В.Корнеев, В.Г.Хорошевский

1. Введение

Выбор путей развития вычислительной техники, утилизирующих достоинства больших интегральных схем (БИС) и преодолевающих их недостатки, является актуальной задачей. Главными из достоинств БИС являются большое число электронных компонентов на кристалле, массовость производства кристаллов и их надежность. К недостаткам можно отнести ограничения по числу типов схем и числу выводов с кристалла.

В данной статье рассматривается использование микро-ЭВМ и микропроцессоров для построения вычислительных систем с программируемой структурой. Описывается архитектура и структура микромашиной вычислительной Системы (МИКРОС), реализованной на базе серийных отечественных микро-ЭВМ.

2. Вычислительные системы с программируемой структурой - реализация модели коллектива вычислителей

Вычислительные системы (ВС) с программируемой структурой - одно из магистральных направлений развития вычислительной техники. Опираясь на преимущества технологии производства микроселектронных устройств, они позволяют достичь высокого быстродействия, характерного для специализированных ЭВМ при сохранении многофункциональности универсальных ЭВМ.

Концептуальную основу построения ВС составляет модель коллектива вычислителей, предложенная и развитая в работах [1-3]. Под коллективом вычислителей понимается совокупность взаимосвязанных и одновременно функционирующих аппаратурно-программных вычисли-

тельных модулей, которая способна настраиваться на решение общей задачи. Общая задача, в частности, может состоять в организации решения на ВС нескольких несвязанных между собой задач. В этом случае часть машин ВС, занятая решением каждой такой задачи, в свою очередь является коллективом вычислителей, настраивающимся на решение возложенной на него задачи.

Основу модели коллектива вычислителей составляют три принципа:

- 1) параллельность (одновременность) выполнения операций,
- 2) программируемость (переменность) структуры,
- 3) конструктивная однородность.

Параллельность выполнения операций основана на возможности создать для решения сложной задачи, задачи с большим объемом вычислений и (или) исходных данных, параллельную программу. Под параллельной программой мы понимаем совокупность связанных ветвей-программ, которые допускают одновременное выполнение на разных модулях коллектива. Модули работают над выделенными им данными и взаимодействуют друг с другом. В результате систематического анализа сложных задач различных классов установлено, что параллельные программы могут быть построены для широкого класса практически важных задач.

Программируемость структуры коллектива вычислителей достигается использованием такого набора аппаратурно-программных средств, который дает возможность программно устанавливать связи между модулями-вычислителями. Это позволяет на протяжении всей реализации параллельной программы сохранять адекватность структуры коллектива (графа связей вычислителей) структуре (графу информационных связей) решаемой задачи. При этом, в частности, оказывается возможным настраивать параллельную программу на число вычислителей как на параметр. Параллельная программа может выполняться на любом выделенном количестве вычислителей или перестраиваться при отказах или восстановлении вычислителей.

Конструктивная однородность заключается в представлении коллектива в виде совокупности одинаковых модулей-вычислителей, регулярно соединенных между собой. Однотипность конструктивного исполнения позволяет в полной мере использовать массовый характер производства интегральных схем, дает возможность увеличить серийность и, следовательно, снизить стоимость выпускаемых схем.

Разработанные к настоящему времени многочисленные ЭВМ основаны на имитации деятельности одного человека-вычислителя при решении задачи. Для решения задачи вычислитель должен иметь исходные данные D , программу вычислений P и алгоритм A функционирования вычислителя (универсальный алгоритм используемой для вычислений алгоритмической системы). Итогом работы вычислителя являются результаты решения поставленной задачи. Процесс проектирования ЭВМ, которая представляет собой техническую реализацию модели вычислителя, сводится к разработке аппаратурно-программных средств, реализующих алгоритм A функционирования вычислителя.

Для организации функционирования коллектива из N вычислителей каждому вычислителю C_i с номером i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, требуются не только индивидуальные данные D_i , программа P_i и алгоритм A_i функционирования, но и информация о работе вычислителя C_j , $j \neq i$, или результаты его работы D'_j , программа P'_j задания взаимодействий вычислителей, а также алгоритм A'_i выполнения взаимодействий вычислителя с другими. Алгоритм A'_i обеспечивает установление связей вычислителя с другими вычислителями и реализацию взаимодействий между ними при заданной структуре S сети связи.

Многообразие известных подходов при техническом воплощении модели коллектива вычислителей (мультипроцессорные системы с общей памятью, многомашинные системы, вычислительные сети и др.) является следствием различия в способах реализации алгоритма A , задания программы P и данных D , а также выбора структуры. Технические средства, с помощью которых реализуется совокупность алгоритмов $\{A'_i\}$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, и которые составляют среду для осуществления взаимодействий между вычислителями коллектива, называют коммутатором. Способ реализации коммутатора является одним из основных факторов, определяющих эффективность вычислительной системы в целом. Коммутатор настолько же необходим при создании ВС, насколько необходимы процессоры и оперативная память для ЭВМ.

Вычислительные системы с программируемой структурой представляют собой реализацию модели коллектива вычислителей, характеризующуюся следующими свойствами.

При техническом воплощении модели коллектива вычислителей индивидуальные вычислители реализуются на основе серийных ЭВМ или специально разработанных машин и называются элементарными машинами (ЭМ).

Функциональное взаимодействие ЭМ осуществляется на основе использования децентрализованных алгоритмов управления процессами

через программно настраиваемую сеть связи. Последняя составляет общий ресурс, разделяемый во времени и пространстве для осуществления необходимых взаимодействий между ЭМ системы.

Сеть связи включает в себя одинаковые в функциональном отношении модули - системные устройства, работающие по принципу близкодействия: взаимодействие между несмежными ЭМ реализуется как совокупность взаимодействий между соседними ЭМ некоторого подмножества машин, которому принадлежат рассматриваемые взаимодействующие машины. Взаимодействие между соседними ЭМ состоит в пересылке информации, дифференцированной в функциональном отношении (данные, адреса, команды, логические переменные и т.п.). Каждая ЭМ системы предназначается для выполнения не только функций хранения и переработки информации, но и функций управления системными процессами (децентрализация управления).

Одним из основных следствий использования принципа близкодействия является возможность неограниченного наращивания системы. Это позволяет строить вычислительные системы с заданными показателями быстродействия, надежности и живучести.

В общем случае при построении ВС с программируемой структурой не накладываются ограничения на класс вычислительных средств, используемых для компоновки ЭМ. Если основу ЭМ составляет ЭВМ, то ее состав может быть варьирован в широких пределах: от минимальной конфигурации, состоящей из процессора с памятью, до максимальной конфигурации, включающей в себя внешние запоминающие устройства, терминалы, устройства ввода/вывода и т.п.

В зависимости от расстояния между машинами ВС подразделяются на сосредоточенные и распределенные. Сосредоточенные имеют компактное пространственное размещение ЭМ. Распределенные ВС состоят из машин, удаленных друг от друга на значительные расстояния. В общем случае распределенная система - совокупность сосредоточенных ВС, соединенных "длинными" каналами связи, задержки при передаче информации по которым существенны по сравнению с временем обращения к памяти в пределах одной машины.

3. Структура системы МИКРОС

Вычислительная система МИКРОС является пятой системой вслед за "Минск-222", управляющей линейной однородной ВС, МИНИМАКС, СУММА [2], логические проекты которых разработаны в Институте математики СО АН СССР.

Основными целями начальной (первой) очереди работ по системе МИКРОС являются:

- практическая проверка эффективности алгоритмов децентрализованного управления загрузкой системы и взаимодействиями между процессами, реализуемыми в разных ЭМ, и децентрализованных алгоритмов автоматического контроля и диагностики системы;

- обеспечение простоты управления системой со стороны оператора, в частности, в аварийных ситуациях и при включении/выключении питания;

- практическое расширение вычислительных возможностей персональной микро-ЭВМ;

- отработка параллельных алгоритмов и оценка их эффективности для ряда практически важных задач.

В качестве базовой для системы используется микро-ЭВМ "Электроника-60М". Выбор этой машины проиктован следующими соображениями:

- 1) массовостью производства и дешевой микро-ЭВМ,
- 2) интересом к сосредоточенным и распределенным вычислительным системам, построенным на базе данной микро-ЭВМ,
- 3) возможностью сравнения подхода к построению вычислительных систем, предложенного в [4] для системы S_n^* , с подходом, развиваемым нами,
- 4) перспективой, определенной долгосрочной программой развития промышленности, предусматривающей выпуск мини- и микро-ЭВМ совместимых с микро-ЭВМ "Электроника-60М".

Отличительная особенность системы МИКРОС в структурном отношении состоит в возможности наращивать ВС не только по числу ЭМ, но и по связям с соседними ЭМ. Наращиваемость по числу ЭМ не ограничена. Она достигается соблюдением рассмотренного выше принципа близкодействия при реализации взаимодействий между произвольными машинами системы. Наращиваемость по числу связей с соседними ЭМ ограничена. Она может изменяться от единицы (каждая ЭМ связана с одной соседней машиной) до шести (каждая ЭМ связана с шестью соседними машинами). Выбранная верхняя граница числа связей является компромиссом между стремлением сохранить возможность подключения внешних устройств к каналу ввода/вывода любой базовой ЭВМ (канал ввода/вывода, к которому подключаются системные устройства, имеет ограниченные пропускную и нагрузочную способности) и желанием уменьшить диаметр структуры системы (чем меньше диаметр

структуры, тем выше ее живучесть, причем диаметр структуры ВС понимается в графотеоретическом смысле). Так, для систем, содержащих до 256 машин, диаметр оптимальной (в отношении характеристик живучести) структуры при числе связей четыре равен II, а при числе связей шесть - 4.

Наращиваемость по числу связей ЭМ достигается модульностью построения системного устройства. Каждый из модулей системного устройства связывает ЭМ с двумя соседними машинами дуплексными каналами связи. Модульность системного устройства позволяет строить сеть связи на основе произвольных регулярных или нерегулярных графов и экспериментально изучать влияние структуры на эффективность функционирования ВС. Модульность позволяет также для связи между ЭМ использовать разнотипные каналы. Тем самым создается возможность применения единого модуля системного устройства для формирования как сосредоточенных, так и распределенных звеньев ВС, что важно для достижения утилитарных целей создания системы.

В силу специфики любое внешнее устройство, подключенное хотя бы к одной элементарной машине, рассматривается как обобществленное. Любая ЭМ может получить доступ к любому устройству. В системе МИКРОС непосредственное управление каждым внешним устройством осуществляется той ЭМ, к каналу ввода/вывода которой оно подключено. Остальные ЭМ получают доступ к этому внешнему устройству, используя в качестве посредников операционную систему и оперативную память данной машины.

Подключение внешних устройств к ВС должно осуществляться так, чтобы обеспечить равномерность загрузки системы и минимизировать время обращения к устройствам заданного типа. Для этого машины, к которым подключаются внешние устройства заданного типа, должны быть распределены по системе равномерно.

ВС представляет собой человеко-машинную систему, эффективность эксплуатации которой зависит от объема ручных операций, связанных с осуществлением включения и отключения устройств системы (в том числе с отключением неисправных ЭМ, переводом машин в режим плановой профилактики и с включением отремонтированных или резервных ЭМ), а также с начальной загрузкой и инициацией работы ЭМ. Общение человека с ВС осуществляется с помощью пультовых устройств, рассматриваемых как особый тип внешних устройств. Такой взгляд согласуется с идеологией, принятой для связи оператора или пользователя с микро-ЭВМ. Например, микро-ЭВМ "Электроника-60М" не

имеет пульты управления, при помощи которого оператор мог бы выполнять различные функции управления машиной (занесение адреса, считывание данных, запись данных и другие). Все эти функции выполняются устройствами, способными передавать в процессор микро-ЭВМ буквенно-цифровые символы, которые интерпретируются процессором как команды управления, и получать от процессора буквенно-цифровые символы, интерпретируемые как результаты выполнения соответствующих команд управления. Подобное устройство называется пультовым терминалом. Общее число пультовых терминалов системы определяется из условия, что при заданной кратности неисправностей системы среди исправных ЭМ должна быть по крайней мере одна машина с пультовым терминалом.

Включение питания, начальная загрузка и инициация работы системы могут быть осуществлены из любой ЭМ системы, имеющей пультовый терминал. Управление машинами, которые не имеют пультового терминала, осуществляется по межмашинным связям от соседних ЭМ. Для обеспечения эффективности ВС при ее наращивании по числу ЭМ выдвигается требование константности управления: объем ручных операций по включению, инициации и начальной загрузке системы не должен увеличиваться при увеличении числа ЭМ системы. Указанное требование ВС обеспечивается:

- аппаратурными средствами, позволяющими инициировать работу ВС из любой ЭМ, имеющей пультовый терминал;
- аппаратурными средствами, позволяющими программно включать и выключать питание выбранной соседней ЭМ;
- аппаратурными средствами, позволяющими программно перевести выбранную соседнюю ЭМ из состояния выполнения программы в состояние работы с пультовым терминалом и обратно;
- программными средствами имитации работы оператора за пультовым терминалом;
- программными средствами вывода информации о состоянии системы на пультовом терминале.

Соединение модулей системного устройства соседних ЭМ осуществляется либо по радиочастотному кабелю (если расстояние между ЭМ не превышает 300 м), либо по коммутируемому или выделенному телефонным каналам связи (с использованием аппаратуры передачи данных независимо от расстояния между ЭМ). Чтобы обеспечить использование системных устройств с указанными линиями связи и не усложнять их схемы, каждое направление модуля системного устройства

имеет выход на стандартное сопряжение С2 (цепи серии 100). Набор сигналов сопряжения С2 устанавливается в соответствии с Рекомендацией V.23 МККТТ. Для первой очереди системы МИКРОС предполагается использование сигналов, рекомендуемых для односторонней передачи по коммутируемому телефонному каналу общего пользования со скоростью 600-2400 бод.

Возможности технических средств, используемых для реализации системы МИКРОС, иллюстрируются рисунком. Показанная на нем ВС - один из возможных структурных вариантов системы МИКРОС. ВС состоит из двух сосредоточенных звеньев А и С и распределенного звена В. Сосредоточенные звенья А и С состоят соответственно из 24 и 13 машин; распределенное звено В содержит 6 машин. Звенья А, С и В связаны между собой, так что А и С можно рассматривать как элементы распределенной системы. Связь звеньев А и С со звеном В и друг с другом осуществляется через ЭМ с дополнительными модулями системного устройства. Сосредоточенные звенья имеют оптимальную структуру для числа связей четыре. Средние диаметры этих структур равны 2,21 и 1,54 для звеньев А и С соответственно. Машина 6 звена В служит для связи системы МИКРОС с терминальной сетью, реализуемой в Институте математики СО АН СССР на базе микро-ЭВМ "Электроника-60М". Терминальная сеть используется для обеспечения удаленного доступа пользователей к ЭВМ БЭСМ-6 Главного производственного вычислительного центра СО АН СССР. Машина 12 звена С - "Электроника-100-25", через которую ВС получает доступ к ЕС ЭВМ вычислительного центра ИМ СО АН СССР. Сопряжение мини-ЭВМ "Электроника-100-25" с микро-ЭВМ "Электроника-60М" разработано в рамках проекта системы МИКРОС. Это устройство сопряжения обеспечивает связь с одной микро-ЭВМ "Электроника-60М" и обладает всеми функциями системного устройства, используемого для связи между микро-ЭВМ "Электроника-60М". К машинам звена А подключены шесть накопителей на магнитных дисках (МД) и девять пультовых терминалов; к машинам звена С подключены три МД и пять терминалов (ПТ). Узлы подключения МД и ПТ на рисунке показаны стрелками. Число терминалов выбрано исходя из заданной наибольшей кратности неисправностей, которая для звена А составляет восемь ЭМ, а для звена С - четыре ЭМ.

4. Архитектура системы МИКРОС

Задания пользователей поступают в вычислительную систему с программируемой структурой через распределенные по машинам системы устройства ввода. Каждое задание представляет собой в общем

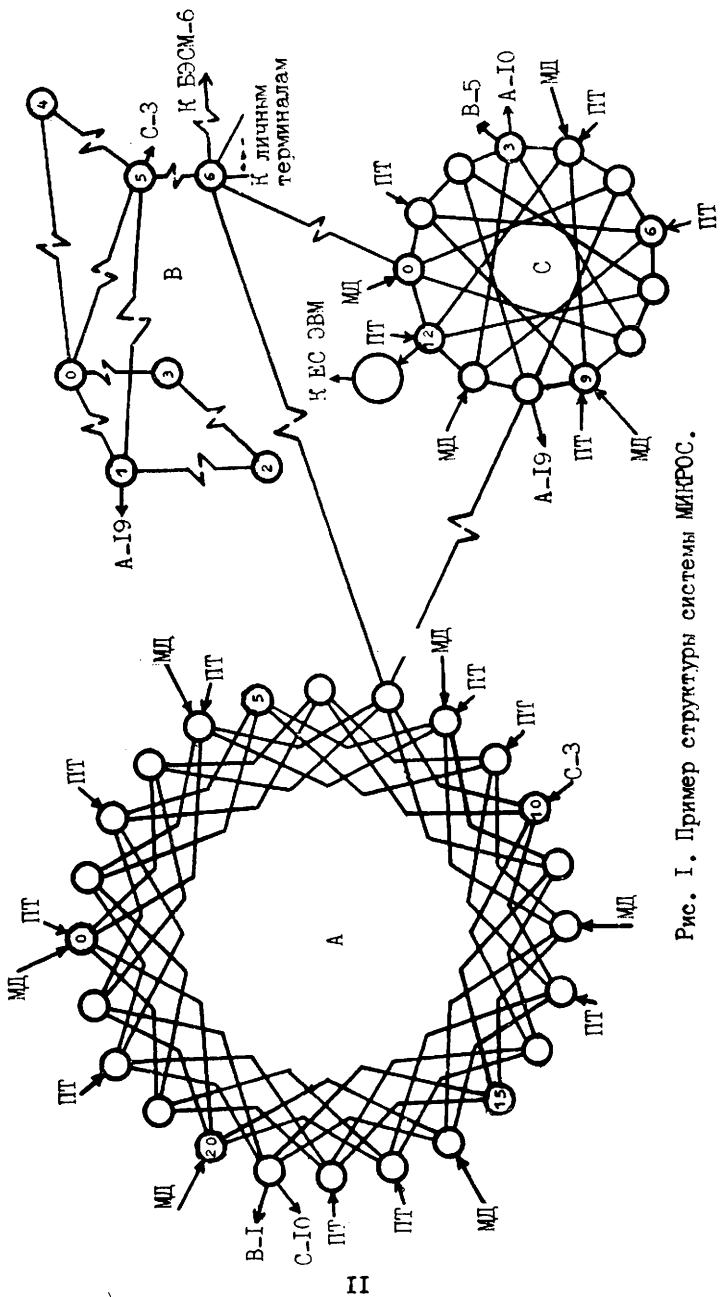


Рис. 1. Пример структуры системы МИНРОС.

случае параллельную программу, для выполнения которой операционная система ВС должна сформировать подсистему с соответствующим числом машин. Для частного случая, когда задание представлено последовательной программой, формируется подсистема, состоящая из одной машины.

В системе МИПРОС используется алгоритм децентрализованного выделения подсистем. Он основан на согласованном функционировании машин системы, направленном на такое перераспределение заданий между машинами, чтобы достигалось экстремальное значение целевой функции – показателя эффективности функционирования ВС. Выбор децентрализованного алгоритма выделения подсистем объясняется тем, что этот алгоритм позволяет уменьшить ошибки планирования при выделении подсистем, вызванные изменением ситуации в системе за время, необходимое для сбора информации об исполняющихся и вновь поступивших заданиях, принятия на основе этой информации решения о выделении подсистем и передачи заданий в выделенные для них подсистемы.

Граф межмашинных связей подсистемы является связным подграфом графа межмашинных связей системы. Межмашинные взаимодействия, обусловленные алгоритмом исполняемой на подсистеме задачи, происходят только между машинами подсистемы и только по линиям связи, которым соответствуют ребра графа межмашинных связей подсистемы. Для определения путей передачи данных, ведущих из передающей в принимающие машины подсистемы, используются децентрализованные маршрутные процедуры, входящие в состав операционной системы или написанные пользователем специально для его задачи.

С точки зрения реализуемой на ней программы подсистема является специализированной под эту программу вычислительной системой. Специализация выражается в выборе числа машин в подсистеме, в способе распределения программ и данных между машинами подсистемы, а также в определяемой задачей графе межмашинных связей подсистемы. Иными словами, при предлагаемой организации функционирования ВС каждая программа исполняется на адекватной ей подсистеме. При этом пользователь избавлен от необходимости учета влияния других задач, исполняемых ВС одновременно с его задачей.

Подсистемы могут состоять из виртуальных машин и линий, разделяющих во времени физические машины и линии соответственно, либо из физических машин, связанных физическими линиями. Замена произвольной совокупности виртуальных машин и линий на физические ма-

шины и линии, и наоборот, не влечет за собой каких-либо преобразований архитектуры ВС или исполняемых программ, а только изменяет значения показателей производительности, надежности и живучести ВС.

В каждой элементарной машине системы порождается заранее известное число виртуальных машин, входящих в подсистемы, исполняющие программы пользователей или программы системного управления. Последние обеспечивают выделение подсистем, планирование использования ресурсов ВС, функционирование ЭМ как узла сети связи и как элемента системы самодиагностики и самовосстановления. Координация между программами, исполняемыми ЭМ в мультипрограммном режиме, осуществляется посредством синхронизирующих примитивов. Это позволяет при программировании взаимодействующих друг с другом программ исключать из рассмотрения временные соотношения, определяемые длительностями выполнения отдельных операторов. При этом исполнение каждой программы образует вычислительный процесс. Операции управления процессами такие, как порождение, уничтожение и взаимодействие (синхронизация и коммуникация между процессами) выделяются в ядро операционной системы ЭМ. Каждая ЭМ обладает собственным ядром операционной системы, содержащим: 1) средства, интерпретирующие операции управления процессами, и 2) средства связи между ядрами соседних ЭМ. Первые организуют мультипрограммирование в ЭМ, вторые обеспечивают передачу данных и команд управления между соседними машинами. При этом линии межмашинного обмена осуществляют асинхронную передачу данных и команд между соседними ЭМ (по наличию на передающем конце линии заполненного выходного буфера и при существовании на приемном конце линии свободного входного буфера).

Контроль состояния исправности и выявление неисправных элементов ВС осуществляются с помощью децентрализованных алгоритмов взаимопроверки ЭМ и сопоставления результатов такой взаимопроверки. Сопоставление результатов взаимопроверки машин системы, являющихся неделимыми субъектами и объектами контроля и диагностики, позволяет автоматически определить неисправные ЭМ для последующих ремонта и ввода их в действие. Алгоритмы контроля и диагностики работают в предположении о том, что общее число неисправных ЭМ не превышает некоторого предельного числа R , а значение кратности R неисправностей ВС может быть задано программно в соответствии с требуемым уровнем надежности ВС и исходя из условия, что $R < N/2$, где N — общее число машин системы.

Программирование структуры МИКРОС основано на том, что каждый ресурс ЭМ (совокупность входных и выходных буферов, линий межмашинного обмена, процессор ЭМ, память ЭМ, адрес ЭМ в системе, выделенная совокупность ЭМ-подсистема и др.) программно доступен и может быть настроен на желаемый режим функционирования. В частности, создание подсистемы с заданным числом машин и связями между ними обеспечивается возможностью запрограммировать перенос данных из входного буфера одной линии в выходные буферы других линий. Тем самым для каждой задачи может быть программно создана адекватная ей структура вычислительного средства.

Операционная система системы МИКРОС строится на основе преемственности со штатными операционными системами машин СМ-3 и СМ-4. Программист, не использующий возможностей системы по параллельной обработке данных, взаимодействует с операционной системой ВС посредством директив штатной операционной системы, составляющих подмножество директив операционной системы ВС. Пользователю доступно с любого пультового терминала все многообразие сервисных средств, предоставляемых штатными операционными системами. С точки зрения пользователей ВС МИКРОС выглядит как вычислительная сеть DECnet с развитыми возможностями параллельной обработки.

Языки параллельного программирования первой очереди системы МИКРОС строятся на основе преемственности с языками последовательного программирования штатной операционной системой. Последние расширяются за счет включения в них языковых средств управления процессами. В первой очереди МИКРОС предполагается использовать операционную систему РАФОС с языками параллельного программирования Р-МАКРОАССЕМБЛЕР, Р-ПАСКАЛЬ, Р-ФОРТРАН, Р-БЕЙЗИК.

5. Заключение

Для достижения поставленных целей по экспериментальной проверке алгоритмов децентрализованных операционных систем и способов построения ВС система МИКРОС разрабатывается как открытая к изменениям. Развитие системы представляет собой итерационный процесс. Каждая итерация состоит из двух этапов: из этапа экспериментальной эксплуатации, в ходе которой осуществляется набор статистической информации об эффективности используемых аппаратурно-программных средств, и из этапа модернизации системы с учетом полученных оценок ее эффективности. В результате описанного итерационного процесса осуществляется постепенный перенос функций сис-

темного программного обеспечения на аппаратную реализацию. Модернизация системы включает в себя переход от использования базовых ЭВМ на основе интегральных схем малой степени интеграции к совместимым ЭВМ на базе интегральных схем с повышенной степенью интеграции. Росту уровня интеграции схем ЭВМ должен сопутствовать соответствующий рост степени интеграции элементной базы разрабатываемых средств межмашинной связи. В целом развитие системы должно осуществляться так, чтобы обеспечивалось монотонное увеличение эффективности системы.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. - Новосибирск: Наука, 1966. - 308 с.
2. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Однородные вычислительные системы. - Новосибирск: Наука, 1978. - 319 с.
3. ЕВРЕЙНОВ Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды. - М.: Радио и связь, 1981. - 208 с.
4. SWAN R.J., FULLER S.H., SIEWIOREK D.P. Cm* - a modular multimicroprocessor. - In: Proc. AFIP Conf., AFIPS Press, Montvale, N.Y., 1976, v.46, p.637-644.
5. ДИМИТРИЕВ Ю.К., ЗАДОРЖНЫЙ А.Ф., КОРНЕЕВ В.В. Элементарная машина вычислительной системы. - Настоящий сборник, с.108-124.

Поступила в ред.-изд.отд.
9 сентября 1982 года