

проверка работоспособности процессора осуществляется на комплексном тесте. С этой целью написана программа, которая в режиме диалога с оператором выполняет двумерное преобразование Фурье над заданным массивом данных в памяти СП-8 с выводом результатов вычислений на экран цветного графического дисплея. Интерпретируя полученные данные, можно судить о работоспособности процессора в целом. Данная программа использует около 15 библиотечных функций и проверяет динамику работы основных функциональных узлов процессора.

Ниже приведены некоторые технические параметры сигнального процессора СП-8: тактовая частота процессора 5 МГц; представление чисел — фиксированная запятая, 16 разрядов; максимальное быстродействие 10 млн. сложений (умножений) в секунду; время выполнения быстрого преобразования Фурье на комплексном векторе длиной 1024 точки 13,5 мс; объем оперативной памяти данных 128 Кслов; объем табличной памяти 4 Кслов; объем постоянной памяти микроинструкций 2048 слов; потребляемая мощность 50 Вт; элементная база — ТТЛШ с малым потреблением энергии; аппаратные средства отладки программ — ROM-симулятор на линии с ЭВМ «Электроника 100/25»; программатор ППЗУ; масса 0,8 кг.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бродский И. И., Козлачков В. А., Коршевер И. И. и др. Высокопроизводительный периферийный векторный процессор А-12. — Автометрия, 1984, № 4.
2. Лайнбек Дж. Р. Перспективы рынка цифровых процессоров сигналов. — Электроника, 1985, № 4.
3. Березовский А. В., Козлачков В. А., Коршевер И. И., Павлов С. А. Сигнальный процессор СП-8. — В кн.: Тез. докл. XIX Всесоюз. школы «Автоматизация научных исследований». Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1985.
4. Березенко А. И., Корягин Л. Н., Назарьян А. Р. Микропроцессорные комплексы повышенного быстродействия. — М.: Радио и связь, 1981.
5. Мик Дж., Брик Дж. Проектирование микропроцессорных устройств с разрядно-модульной организацией. Кн. 1 и 2. — М.: Мир, 1984.

*Поступила в редакцию 14 февраля 1986 г.*

УДК 681.3

Г. С. ПИСКУНОВ, С. В. ТАРАРЫШКИН

(Новосибирск)

### ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХРАЗЯДНАЯ ЭВМ В СТАНДАРТЕ КАМАК

**Введение.** Начиная с 1971 г. в Институте ядерной физики СО АН СССР для управления большими экспериментальными физическими установками широко используются 24-разрядные ЭВМ серии «Одра-1300» (производство ПНР), являющиеся функциональными аналогами английских машин серии ICL-1900. Эти машины относятся к классу универсальных ЭВМ, оснащены развитым программным обеспечением, а по своим функциональным возможностям (большое адресное пространство, средства поддержки мультипрограммирования, повышенная точность) превосходят ряд широко распространенных мини-ЭВМ. В использовании ЭВМ «Одра-1300» в ИЯФ СО АН СССР накоплен большой опыт, создано обширное системное и прикладное программное обеспечение, имеется значительный контингент специалистов, знакомых с особенностями работы на них.

Развитие систем на базе ЭВМ серии «Одра-1300» идет по пути децентрализации за счет введения периферийных автономных контроллеров крейтов КАМАК [1], позволяющих решить известную проблему со-

пряжения аппаратуры КАМАК (требующей высокой интерактивности взаимодействия) с универсальной ЭВМ. Однако ограниченные функциональные возможности микропроцессоров, традиционно применяемых в таких автономных контроллерах, препятствуют широкому использованию распространенных языков высокого уровня для их программирования, что, в свою очередь, ограничивает круг потенциальных пользователей.

Вследствие этого в 1981 г. было принято решение о разработке автономного контроллера крейта КАМАК, совместимого на уровне пользовательских программ с ЭВМ серии «Одра-1300» и получившего условное название «Одренок».

«Одренок» выполнен в КАМАК-модуле шириной 2М на 130 схемах большой и средней степени интеграции, включая процессорные секции K1804BC1; он имеет встроенную память (64 К 24-разрядных слов) и реализует полную систему команд машин «Одра-1300». Производительность на операциях с фиксированной запятой составляет около 300 000 операций в секунду, на операциях с плавающей запятой — около половины производительности ЭВМ «Одра-1305» (старшей модели семейства).

Связь «Одренка» с ЭВМ верхнего уровня или файловой машиной сети осуществляется с помощью отдельного интерфейсного КАМАК-модуля, реализующего прямой доступ к памяти и регистрам контроллера и содержащего средства для дистанционной диагностики и отладки.

В семействе «Одра-1300» последовательно проводится принцип виртуальной машины. Так, каждая пользовательская программа работает в собственном виртуальном адресном пространстве, а уровни операционной системы (ОС) и пользователя различаются аппаратно. В системе команд пользователя отсутствуют низкоуровневые операции ввода-вывода; вместо них применяются высокоуровневые команды обмена, исполнение которых влечет вызов соответствующих примитивов ОС (экстракоды ввода-вывода). Благодаря этому обстоятельству удалось достаточно просто, переписав машинно-зависимое ядро ОС, реализовать сетевую операционную систему, обеспечивающую возможность работы любых программ, ранее работавших в ЭВМ «Одра». В «Одренке» реализована полная система команд пользовательского уровня. По составу привилегированных команд, которые обычно сильно зависят от структуры подсистемы ввода-вывода, «Одренок» значительно отличается от процессоров серии «Одра-1300».

Одна из основных целей создания рассматриваемого контроллера — повышение эффективности взаимодействия с аппаратурой КАМАК. Для достижения этой цели исходная система команд расширена (за счет использования резервных кодов команд) введением операций для работы с магистралью КАМАК.

**Особенности архитектуры.** Основная адресуемая единица информации — 24-разрядное слово. В процессоре имеется 8 регистров общего назначения (РОН) и один 48-разрядный аккумулятор для чисел с плавающей запятой. Числа с плавающей запятой содержат 38-разрядную мантиссу в дополнительном коде и двоичный 9-разрядный порядок, что дает относительную погрешность  $10^{-12}$  и динамический диапазон чисел  $10^{+78}$ . Для кодирования символьной информации используется укороченный 6-разрядный «байт». В одном слове помещается четыре таких «байта». Программы работают с информацией во внутреннем представлении, при выводе на внешние устройства ОС программно выполняет соответствующую перекодировку в код КОИ-7.

Команда всегда занимает одно слово. Основные форматы команд показаны на рис. 1. Поле X задает один из восьми РОН, участвующих в операции. Особенность данной ЭВМ — то, что РОН отображаются на первые восемь ячеек в адресном пространстве программы, поэтому в системе команд отсутствуют явные операции типа «регистр — регистр». Они являются частным случаем операций типа «регистр — память». По-

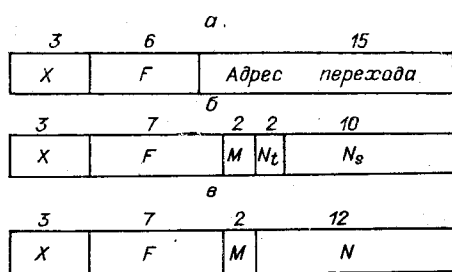


Рис. 1

пользоваться в качестве индексного регистра. Для получения исполнительного адреса 15 младших разрядов индексного регистра (РОН 1, 2 или 3) алгебраически суммируются с содержимым поля  $N$ . Таким образом, адресное пространство одной задачи не превышает 32 Кслов. В системе имеется возможность переключения на работу с расширенным диапазоном адресов (так называемый режим 22 АМ); в этом случае адресное пространство одной задачи составляет 4 Мслов.

В системе команд предусмотрены операции для работы с числами в формате с фиксированной запятой многократной точности, содержится обширная группа команд для работы с битовыми полями, в том числе команды для манипуляций с байтами. Система команд в значительной степени ортогональна относительно способов адресации и симметрична для основных арифметических и логических операций: есть как команды вида «регистр:=регистр+память», так и команды типа «память:=регистр+память».

Команды условного перехода (рис. 1, а) разделены на две группы: по содержимому указанного РОН и по состоянию флагов процессора ( $V$  — флаг переполнения,  $C$  — флаг переноса). В команде обращения к подпрограмме текущее слово состояния процессора сохраняется в РОН, указанном в команде. Имеются также четыре команды для организации циклов.

На рис. 1, б показан формат команд сдвига. Поле  $N_t$  задает тип сдвига: циклический, арифметический, логический; поле  $N_s$  определяет количество сдвигов. Возможны сдвиги одинарного или двойного слова на произвольное число разрядов. Существуют команды для нормализации числа и поиска старшего значащего бита в слове. В системе команд предусмотрены операции для преобразования из десятичного формата в двоичный и обратно, групповой пересылки блока данных из одной области памяти в другую, подсчета контрольной суммы, а также для работы с числами в формате с плавающей запятой.

Формат команд взаимодействия с магистралью КАМАК такой же, как для обычных команд (рис. 1, в). В РОН содержится NAF, а поле  $N(M)$  стандартным образом задает адрес слова данных, участвующего в обмене в КАМАК-цикле. После выполнения команды в старшие разряды РОН заносится состояние КАМАК-сигналов  $Q, X, I$ . Кроме команды выполнения одиночного NAF, предусмотрены команды группового обмена (до  $Q=0$ ) и сканирования крейта по субадресам и номерам станций, а также команда чтения состояния регистра LAM. Существенно, что все обращения к магистрали КАМАК выполняются с помощью одной машинной команды, т. е. все они являются неразрывными операциями. Это дает возможность использовать КАМАК-операции непосредственно в программе пользователя при работе в мультизадачном режиме. Эта ситуация радикально отличается от имеющей место в традиционных 16-разрядных мини-ЭВМ, к которым аппаратура КАМАК подключается как нестандартное периферийное оборудование. Для выполнения одиночного обмена с магистралью КАМАК в случае использования, например, распространенного контроллера СС-11 требуется

ле  $F$  задает код операции. Система команд включает около 120 различных типов операций.

В процессоре реализованы четыре способа адресации операнда: прямая, индексная со смещением, непосредственная и непосредственная с индексацией. При  $M=0$  поле содержит адрес операнда (или сам операнд при непосредственной адресации). В противном случае поле  $M$  указывает на соответствующий РОН, содержимое которого будет ис-

выполнить несколько действий: записать в командный регистр контроллера крейта код функции  $F$ , занести старший байт данных в регистр старшего байта, переслать 16 младших разрядов данных. Поскольку при работе в мультизадачном режиме контроллер крейта — разделяемый ресурс, все эти действия должны выполняться внутри критического интервала при запрещенных прерываниях или на уровне ОС. Работа через ОС приводит к резкому увеличению времени, затрачиваемого на организацию одиночного обмена. Так, например, на выполнение одиночного КАМАК-цикла на ЭВМ VAX-11/780 (ОС VMS) и PDP-11/60 (ОС RSX-11M) затрачивается 1,8 и 2,2 мс соответственно [2]. В нашем случае на вызов аналогичной подпрограммы на языке высокого уровня требуется 25 мкс, причем время в основном расходуется на передачу параметров в подпрограмму; собственно команда генерации КАМАК-цикла выполняется за 3 мкс. Максимальная скорость обмена с магистралью КАМАК в режиме передачи массива или сканирования составляет 300 000 24-разрядных слов в секунду.

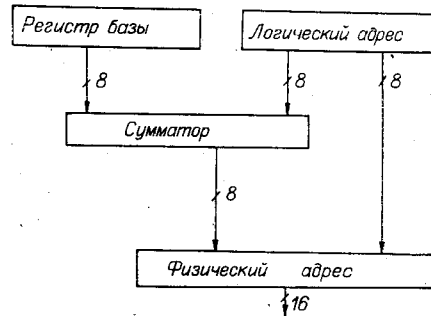


Рис. 2

**Системные средства.** Для реализации мультипрограммного режима работы в «Одренке» предусмотрены встроенные средства управления памятью и два режима работы процессора: СУПЕРВИЗОР и ЗАДАЧА. При всех обращениях к памяти в состоянии ЗАДАЧА к адресу памяти прибавляется смещение из регистра базы, как показано на рис. 2. При запуске задачи ОС заносит в регистр базы (с помощью соответствующей привилегированной команды) адрес начала ее размещения в физической памяти. Таким образом, все программы работают в собственном виртуальном адресном пространстве, а адресное пространство ОС недоступно пользовательским программам.

В системе возможны два типа прерываний: внешние от встроенного таймера и сигналов ЛАМ в крейте и внутренние, вызываемые попыткой выполнить нелегальную команду или одну из команд обращения к супервизору (так называемые экстракоды). В том и другом случае состояние процессора (включая состояние всех регистров) аппаратно сохраняется в теле задачи и управление передается в ОС по абсолютному адресу 28 для внутренних или по адресу 29 для внешних прерываний. Сохранение контекста в пространстве адресов задачи позволяет легко динамически перераспределять память, осуществлять запись образа задачи во внешнюю память с последующим восстановлением в произвольном месте физической памяти. Восстановление контекста и запуск задачи выполняются с помощью одной привилегированной команды. Для ускорения обработки внутренних прерываний команда, вызвавшая прерывание, «распаковывается» таким образом, чтобы при входе в ОС в регистрах содержалась вся необходимая для обработки экстракода информация.

Единственный источник внешних прерываний — сигналы запросов (ЛАМ) в крейте. Каждый источник запроса может индивидуально маскироваться соответствующими разрядами в регистре маски ЛАМ. Этот регистр программно доступен, причем для запрета прерываний предусмотрена неразрывная команда чтения текущего состояния регистра маски с последующим его сбросом. В состоянии СУПЕРВИЗОР запрещены внешние прерывания и механизм преобразования адреса.

В первой версии «Одренка» из-за ограниченной емкости ПЗУ микропрограмм не удалось реализовать на микропрограммном уровне полную систему команд виртуальной машины (не реализованы команды деления, а также преобразования типов). Упомянутый механизм экстрако-

дов (программных прерываний) используется для программной интерпретации этих команд. Если в программе встречается такая команда, то происходит программное прерывание и управление передается в ОС, которая интерпретирует ее и возвращает результат в программу так, как если бы она была выполнена аппаратно. Это дало возможность обеспечить полную программную совместимость на уровне двоичных программ.

Единственный канал ввода-вывода «Одренка» — магистраль КАМАК. Кроме программного обмена, инициируемого машинными командами, имеется возможность прямого доступа к памяти, а также управления состоянием ЭВМ от магистрали крейта. Термин «прямой доступ» в данном случае довольно условный, так как на самом деле реализуется микропрограммой. Модуль связи с машиной верхнего уровня, файловой машиной сети (или модуль ПЗУ начального загрузчика) устанавливается в произвольную позицию крейта. Для выбора модуля со стороны «Одренка» используется дополнительная шина магистрали крейта P2 (аналог шины N), для передачи запроса от модуля в «Одренка» — шина P1 (аналог шины L). При появлении запроса на шине P1 «Одренка» читает статусный регистр модуля (в котором размещаются три бита управления: «шаг», «прямой доступ», «пиши») и адрес прямого доступа в физической памяти «Одренка» командой  $F(0)A(1)$  и в зависимости от требуемого направления передачи генерирует команду  $F(0)A(0)$  или  $F(0)A(16)$ , записывая или читая слово данных из памяти «Одренка».

**Схемная реализация.** При выборе конкретных схемных решений авторы стремились к достижению полной программной совместимости при одновременном учете ограничений как по токопотреблению, так и по объему оборудования (две платы КАМАК). Поэтому предпочтение отдавалось наиболее простым и экономичным вариантам, иногда в ущерб быстродействию. При рассмотрении различных схемных решений производилась оценка возможных реализаций микропрограммы для наиболее часто встречающихся команд. На этом этапе использовалась статистическая информация о частотах появления команд в типичных управляющих и счетных программах.

Упрощенная структурная схема «Одренка» приведена на рис. 3.

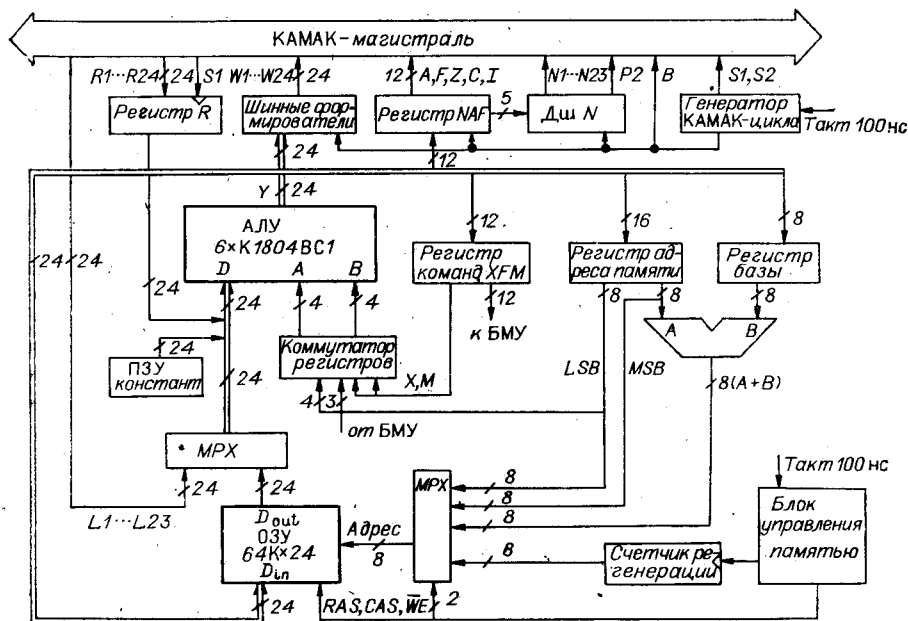


Рис. 3

Основу процессора составляет 24-разрядное арифметико-логическое устройство (АЛУ), построенное на базе шести 4-разрядных процессорных секций (ПС) К1804ВС1 [3]. Шестнадцать внутренних регистров ПС достаточно для реализации полного набора регистров эмулируемой ЭВМ, включая слово состояния процессора и регистр маски прерываний. В состав арифметического устройства также входят схемы управления сдвигами, селекторы регистров ПС, схема ускоренного переноса (К589ИК03), а также дополнительная логика формирования флагов *V* и *S*. Регистр XFM служит для промежуточного хранения части эмулируемой команды (поля *X*, *F* и *M*). В ПЗУ констант емкостью 32 слова хранятся величины, используемые микропрограммой: маски для выделения частей слова, начальные значения счетчиков циклов и т. д.

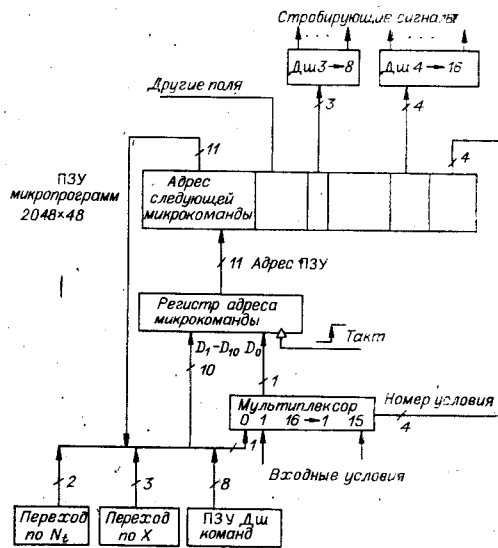


Рис. 4

На входную 24-разрядную шину арифметического устройства коммутируются выходы ПЗУ констант, регистра чтения из КАМАК-магистрали, выход ОЗУ и сигналы LAM. Выход устройства соединен с регистром NAF, регистром адреса памяти, регистром базы схемы управления памятью, входом памяти, а также (через шинные формирователи) подается на шины *W* КАМАК-магистрали.

Память содержит 24 схемы К565РУ5 и управляется независимым автоматом, выполняющим, кроме функций чтения и записи, преобразование виртуальных адресов в физические, а также независимую от работы процессора регенерацию динамической памяти.

Блок микропрограммного управления (рис. 4) сделан по простой схеме на базе регистра памяти текущего адреса микрокоманды и мультиплексора условий. Используется принудительная адресация — в каждой микрокоманде содержится полный адрес следующей. Переходы осуществляются в четный или нечетный адрес в зависимости от состояния выбранного (с помощью мультиплексора) в данный момент условия. Такая схема широко используется и в других разработках, проведенных в ИЯФ [4, 5]; она отличается простотой и малой вносимой задержкой. Микрокоманда имеет ширину 48 бит и содержит 14 полей (адрес следующей микрокоманды, номер условия перехода, адрес ПЗУ констант, код функции АЛУ и др.). Объем микропрограммы 512 слов. В новой версии «Одренка» объем расширен до 2048 слов. Еще одна схема ПЗУ (К556РТ5) используется в дешифраторе команд.

Блок микропрограммного управления работает с фиксированной длительностью такта 300 нс. Длительности тактов автоматов управления памятью и генератора КАМАК-цикла 100 нс. На выполнение большинства команд из подмножества, наиболее часто используемых, требуется от 6 до 9 тактов.

**Заключение.** В настоящее время в ИЯФ СО АН СССР эксплуатируется около 90 микроЭВМ «Одренок». Они применяются в распределенных системах управления электрофизическими установками, в качестве инженерных рабочих станций, используемых при проектировании и наладке радиоэлектронной аппаратуры, а также в персональных станциях научного работника. Первоначально «Одренок» проектировался лишь как автономный контроллер крейта. Авторы не рассчитывали на

ЭВМ	Язык	Время, с	ЭВМ	Язык	Время, с
ЕС-1061	Фортран	1,7	«Одренок»	Тран *	7,6
БЭСМ-6	—	2,6	«Одра-1305»	—	8,5
«Электроника 79»	—	3,3	—	Фортран	8,8
			Электроника 100/25»	—	12,4

\* Язык Тран — подмножество языка Фортран. При программировании данного теста на языке Ассемблер время сокращается до 2,2 с. На всех ЭВМ использовались оптимизирующие компиляторы, режим трассирования был отключен.

его использование в качестве полноценной ЭВМ. Однако благодаря разработке сетевой ОС, позволившей сохранить все программное обеспечение, ранее применявшееся на ЭВМ «Одра-1325», а также из-за довольно высокой производительности процессора вариант применения созданной микроЭВМ в научных рабочих станциях получил в ИЯФ широкое распространение.

В таблице приведены сравнительные данные о времени выполнения оценочной программы — поиска простых чисел для некоторых типов ЭВМ.

В задачах с интенсивным использованием операций с плавающей запятой производительность «Одренка» составляет 0,3—0,5 от производительности ЭВМ «Одра-1305». Мультипрограммные возможности позволяют работать на микроЭВМ нескольким пользователям одновременно. В типичной конфигурации к одной файловой машине («Одренок» с подключенным к нему винчестерским накопителем на магнитных дисках) подсоединяется с помощью последовательных линий связи до 15 станций на базе «Одрят», на каждой из которых, в свою очередь, может работать одновременно до четырех пользователей.

В настоящее время предполагается, что дальнейшее развитие систем управления экспериментальными установками в ИЯФ будет в значительной мере базироваться на применении микроЭВМ, программно совместимых с семейством «Одра-1300». Несмотря на то что архитектура этих машин была разработана около 20 лет тому назад, она достаточно сбалансированна и современна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов Г. А. и др. Программируемые контроллеры в системах управления физическим экспериментом в ИЯФ СО АН СССР.— В кн.: Сб. тр. 2-го Всесоюз. симп. по модульным информ.-вычислит. системам. М., 1980.
2. Burckhart D. e. a. Standard CAMAC subroutines for online computers at CERN.— IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1981, v. NS-28, N 5.
3. Беляев В. Н. и др. Микропроцессорный комплект БИС серии K1804.— Электрон. пром-сть: Науч.-техн. сб. ЦНИИ «Электроника», 1983, вып. 9.
4. Купер Э. А. и др. Цветной растровый дисплей ЦДР-2.— Новосибирск, 1984. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 84—112).
5. Нифонтов В. И. и др. Алфавитно-цифровой дисплей с сенсорной клавиатурой.— Новосибирск, 1984. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; 82—151).

Поступила в редакцию 3 февраля 1986 г.