

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

В.К.Смирнов

Аппаратная реализация языка Рефал
в ИПМ им.М.В.Келдыша

Москва
2003

В.К.Смирнов

Аппаратная реализация языка Рефал в ИПМ им.М.В.Келдыша

Аннотация

Описана история создания процессора обработки текстовой информации ЕС-2702, являющегося специализированным процессором, ориентированным на решение задач, требующих обработки больших массивов информации, представленных в символьной форме. Процессор ЕС-2702 реализован средствами микропрограммирования на базе серийно выпускаемого процессора ЕС-2635. В качестве входного языка спецпроцессора ЕС-2702 использован язык Рефал-2.

Описана архитектура процессора ЕС-2702, представляющая собой микропрограммную реализацию рефал-машины, и средства управления, включающие микропрограммную операционную систему, монитор виртуальных процессоров и т.д.

Рассматриваются особенности микропрограммной реализации спецпроцессора ЕС-2702, включая реализацию режима «виртуальных процессоров», который базируется на динамической перезагрузке памяти микропрограмм одномашинной конфигурации ЕС-1035, выполняющей роль как центральной ЕС-машины, так и спецпроцессора ЕС-2702.

Большая оперативная память, наличие виртуальной памяти, высокая производительность, возможность восстановления после сбоев - все это позволяло решать на процессоре ЕС-2702 задачи, которые не поддавались решению на других системах.

V.K.Smirnov

The Hardware realization of the language Refal in the Keldysh Institute for Applied Mathematics

Abstract

The Described history of the making the symbol processor ES-2702, oriented on decision of the problems, requiring processing the greater volumes of information, presented in symbol form. The Processor ES-2702 was designed on the base of the serial processor ES-2635 by microprogramming. As input language of the processor ES-2702 is used language Refal-2.

The Architecture of the processor ES-2702 and management facility, including microprogramme operating system, virtual processor monitor and etc are described.

They Are Considered particularities to realization of the processor ES-2702, including realization of the "virtual processor" mode, which is based on dynamic rebooting the control memories of computer ES-1035, executing role both central ES-machines, and processor ES-2702.

The big operative memory, presence of virtual memory, high efficiency, possibility of the reconstruction after malfunctions - all this allowed to solve on processor ES-2702 problems, which did not yield to the decision on the other system.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	4
2. Выполнение работ	4
2.1. Постановка задачи	5
2.2. Макет	6
2.3. Специализированный процессор ЕС-2702	7
2.4. Особенности реализации ЕС-2702	7
3. Особенности спецпроцессора ЕС-2702	8
3.1. Архитектура	8
3.2. Организация памяти	10
3.3. Микропрограммная операционная система	11
3.4. Поддержка виртуальных процессоров	12
3.5. Восстановление после сбоев	13
3.6. Арифметика произвольной разрядности	13
4. Завершение работ	14
5. Использование ЕС-2702	15
6. Заключение	15
Литература	16
Участники разработки	20
Состав Государственной комиссии	21

1. Введение

Язык Рефал (REFAL - REcursive Functions Algorithmic Language) был предложен В.Ф.Турчиным в 1968 году. Он был задуман как универсальный метаязык для описания преобразований языковых объектов. Язык базируется на отождествлении по образцу и последующей замене символьных выражений. Программа на Рефале напоминает запись алгоритма по Маркову. К началу 70-х годов были созданы системы программирования на языке Рефал для БЭСМ-6 и ряда других машин.

В 1976 - 1985 годах в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша АН СССР велись работы по аппаратной реализации языка Рефал. В 1985 году в ИПМ начал работать специализированный символьный процессор ЕС-2702. Этот процессор представлял собой аппаратную реализацию языка Рефал и был создан на базе идей динамического микропрограммирования, что позволило создать оригинальную архитектуру на основе промышленной аппаратуры.

Теперь все изложенное здесь стало историей, ибо самого рефал-процессора уже не существует: вместе со всеми универсальными ЭВМ Института прикладной математики он был демонтирован.

Автор этих заметок был непосредственным участником разработки и создания рефал-процессора и решил хоть на бумаге оставить след от этой разработки.

Когда мы приступали к этой работе, то были уверены, что широкому использованию Рефала мешают ограниченные возможности его реализации - прежде всего низкое быстродействие и ограниченный объем памяти. Поэтому поставленная в самом начале разработки цель - повысить на порядок быстродействие выполнения рефал-программ, казалось, должна была привлечь пользователей, как уже работавших с Рефалом, так и новых. Однако после запуска процессора в работу, к сожалению, мы этого не обнаружили. Оказалось также, что практически все системы, созданные на базе Рефала, которые мы хотели запустить на рефал-процессоре, были в таком состоянии, что без участия авторов запустить их было практически невозможно, а у авторов не было интереса проводить такую работу. Короче говоря, задач для загрузки процессора не оказалось. Нашелся только один пользователь-энтузиаст - Владимир Леонидович Топунов, с которым мы несколько лет работали, решая его задачи аналитических вычислений.

2. Выполнение работ

Работа по аппаратной реализации языка Рефал началась в рамках проекта машины с языком повышенного уровня.

В 1975 году И.Б.Задыхайло с несколькими сотрудниками перешел работать в отдел А.Н.Мямина и предложил начать работу над проектом машины с языком повышенного уровня, в основу которой предполагалось

положить идеи, изложенные в работе И.Б.Задыхайло, С.С.Камынина и Э.З.Любимского. А.Н.Мямлин поддержал это предложение и организовал работу над проектом.

Работа над проектом машины с языком повышенного уровня велась совместно двумя секторами Отдела №12 - Сектором №1 (В.К.Смирнов) и Сектором №4 (И.Б.Задыхайло). В Секторе №1 к этому времени заканчивались работы по созданию микропрограммного процессора. Было решено использовать его в качестве базы для создания макета одного из блоков будущей машины - символьного процессора. Последующая деятельность Сектора №1 была практически целиком посвящена созданию макета, а затем и самого символьного процессора.

В Секторе №4 в течение ряда лет проводились работы по созданию проектов других специализированных блоков машины. Однако ограниченные силы не позволили воплотить эти блоки в аппаратуре.

В последующем изложении будут рассматриваться только работы, связанные с созданием символьного процессора (рефал-процессора). В этих работах можно выделить три этапа:

- 1) Постановка задачи и определение целей разработки.
- 2) Создание макета символьного процессора.
- 3) Создание спецпроцессора ЕС-2702.

2.1. Постановка задачи

На этом этапе решались следующие вопросы: выбор входного языка, формулировка принципов реализации и определение целей.

В качестве входного языка для процессора текстовых преобразований практически без колебаний был выбран Рефал. К середине 70-х годов Рефал уже зарекомендовал себя как удобный язык для создания трансляторов, систем аналитических вычислений и других программ работы с текстовой информацией.

Было решено реализовывать язык микропрограммно. Схема реализации выглядела следующим образом. Программа на Рефале транслировалась в язык, близкий к языку сборки, который являлся внутренним языком рефал-процессора. Реализация внутреннего языка осуществлялась микропрограммно.

Была собрана статистика отдельных команд внутреннего языка, и на основе моделирования было выяснено, что от микропрограммной реализации можно ожидать примерно 10-кратное ускорение выполнения рефал-программы. Процессор, на котором предполагалось реализовать этот внутренний язык, имел традиционную архитектуру и никак не отражал специфику Рефала. Была поставлена задача добиться на нем увеличения скорости выполнения рефал-программы в 10 раз по сравнению с программной реализацией на универсальной ЭВМ, построенной на такой же элементной базе. Это и было принято в качестве основной цели аппаратной реализации языка Рефал.

2.2 Макет

На этом этапе был разработан, реализован и экспериментально опробован макет символьного процессора.

Аппаратура макета включала следующие компоненты:

- микропрограммный процессор собственной разработки и изготовления;
- оперативная память емкостью 4 Кб от машины ЕС-1030;
- перезагружаемая память микропрограмм, в качестве которой использовались два блока оперативной памяти от машины БЭСМ-6 (освободившиеся в результате модернизации машины БЭСМ-6).

Микропрограммный процессор полностью разработан и построен в ИПМ на базе микросхем среднего уровня интеграции. На этом процессоре микропрограммно была реализована архитектура рефал-процессора, ориентированная на поддержку входного языка Рефал-2. В основу архитектуры рефал-процессора была положена виртуальная рефал-машина на базе языка сборки, предложенная С.А.Романенко и использованная в ряде программных реализаций Рефала (на машинах БЭСМ, ЕС ЭВМ и др.).

Рефал-процессор подключался к селекторному каналу машины ЕС-1030, которая служила центральной машиной, через которую осуществлялась начальная загрузка рефал-процессора, управление его работой и все общения рефал-процессора с внешним миром: рефал-программе, исполняемой на рефал-процессоре были доступны все внешние устройства центральной машины.

Блок управления селекторным каналом со стороны рефал-процессора был реализован микропрограммно.

Микрокоманда имела ширину 90 двоичных разрядов. Микропрограммная память допускала перезагрузку микрокоманд. Это существенно облегчало создание и отладку микропрограммного обеспечения процессора. Был разработан символический язык микропрограммирования и создана система автоматизации микропрограммирования.

Работа по созданию макета носила многоплановый характер:

- разработка аппаратной базы (микропрограммного процессора);
- разработка языка микропрограммирования и создание системы автоматизации микропрограммирования;
- микропрограммная реализация архитектуры рефал-процессора;
- создание средств взаимодействия (включая аппаратные, микропрограммные и программные компоненты);
- разработка управляющей программы на центральной машине;
- проведение отладки микропрограмм рефал-процессора и управляющих программ на центральной машине.

Исследование работы макета рефал-процессора подтвердило правильность оценки ожидаемой эффективности выбранной реализации. Это позволило перейти к заключительному этапу работы - созданию специализированного символьного процессора для машин ЕС ЭВМ

(получившего наименование ЕС-2702). Эта работа проводилась по заказу НИЦЭВТ в 1981 - 1985 годах.

В создании микропрограммного процессора принимали участие М.И.Проскурин, М.Л.Юдина, В.Н.Синицын, Э.С.Ковалев, С.М.Хлызова. Вопросами подключения к ЭВМ ЕС-1030 занимались А.Г.Рубин, В.Г.Озеркова и В.П.Тульский. Система автоматизации микропрограммирования была создана группой Н.А.Наумова - в нее входили Ю.Н.Жокин, А.Г.Шаменко и С.Н.Минасова. Работа по созданию микропрограмм осуществлялась В.И.Меламед, В.П.Тульским и С.Л.Головковым. Транслятор с Рефала на внутренний язык был написан Э.С.Ковалевым.

2.3. Спецпроцессор ЕС-2702

С целью повышения эффективности работы символьного процессора большая часть управляющей программы в процессоре ЕС-2702 была перенесена с центральной машины на спецпроцессор и реализована микропрограммно. Это привело к тому, что на процессоре ЕС-2702 появилась операционная система, реализованная микропрограммно. На центральной машине осталась сравнительно небольшая управляющая программа (Монитор), выполняющая взаимодействие со спецпроцессором и обеспечивающая связь спецпроцессора с внешними устройствами центральной машины.

Разработка микропрограмм для ЕС-2702 велась с помощью системы подготовки микропрограмм для машины ЕС-1035 . Микропрограммы могли загружаться как со специального пультового накопителя (на магнитной ленте), так и с внешней памяти центральной машины. Обычно с пультового накопителя производилась начальная загрузка при включении процессора, а затем с центральной машины осуществлялась загрузка основной части его микропрограммного обеспечения (система команд и микропрограммная операционная система).

Транслятор с входного языка (Рефал) на внутренний язык процессора ЕС-2702 был написан на Рефале и мог работать как на спецпроцессоре, так и на центральной машине.

2.4. Особенности реализации ЕС-2702

В начале работы над рефал-процессором ЕС-2702 не было уверенности в том, что к моменту, когда начнется отладка микропрограмм системы команд рефал-процессора, в руках у разработчиков будет аппаратная база рефал-процессора - микропрограммный процессор ЕС-2635. Поэтому было решено сделать программную модель этого процессора, и на ней проводить отладку микропрограмм. Задача была поставлена так, чтобы на этой модели можно было прогонять небольшие тестовые программы, написанные на входном языке рефал-процессора (Рефал-2).

После трансляции тест на внутреннем языке рефал-процессора вместе с микропрограммой, реализующей команды, входящие в тест, загружались в

систему моделирования, и тест пускался на модели. Загружаемая микропрограмма содержал также микропрограмму создания управляющего окружения, необходимого для работы интерпретатора. Система моделирования работала на машине БЭСМ-6.

Для создания самой микропрограммы использовалась система динамического микропрограммирования, предоставленная минским НИИ ЭВМ. Эта система функционировала на машине ЕС-1035.

С помощью системы моделирования были отлажены микропрограммы всех основных команд внутреннего языка рефал-процессора и базовые механизмы интерпретатора команд и блока управления памятью.

Однако, когда дело подошло к началу комплексной отладке микропрограммного обеспечения, в распоряжении разработчиков еще не было процессора ЕС-2635 и оперативной памяти, которые составляли аппаратную базу рефал-процессора. Поэтому было решено создать систему, реализующую специальный режим работы (режим виртуальных процессоров), позволяющий с помощью одной машины ЕС-1035 обеспечить функционирование и центральной машины и рефал-процессора.

Система моделирования и режим виртуальных процессоров позволили, несмотря на задержку в поставке оборудования, уложиться в намеченные сроки завершения работы и закончить ее к концу 1985 года.

3. Особенности спецпроцессора ЕС-2702

Процессор ЕС-2702 имел следующие особенности:

- архитектура процессора была ориентирована на реализацию языка Рефал;
- процессор имел память списочной организации и специализированную виртуальную память;
- управление процессором осуществлялось микропрограммной операционной системой;
- процессор обладал средствами поддержки виртуальных архитектур на ЕС-1035;
- процессор обладал микропрограммными средствами автоматического восстановления после сбоев;
- процессор имел встроенную арифметику произвольной разрядности.

3.1. Архитектура

Специфика архитектуры процессора ЕС-2702 касалась прежде всего следующих аспектов:

- системы команд,
- структуры памяти,
- организации управления.

С точки зрения архитектуры процессор ЕС-2702 представлял собой микропрограммно реализованную абстрактную рефал-машину.

Рефал-процессор представляет собой совокупность интерпретатора команд и набора запоминающих устройств: поля зрения, поля состояния и поля памяти. Обработываемая информация размещается в **поле зрения**, которое представляет собой двусвязный список. Некоторые фрагменты поля зрения могут помещаться для временного хранения в **поле состояния**. **Поле памяти** содержит рефал-программу, представляющую собой последовательность описаний функций. Каждое описание состоит из цепочки команд, анализирующих аргумент функции, и цепочки команд, строящих результат выполнения функции. Связь между полем зрения и полем памяти устанавливается с помощью **стека рекурсий**, каждый элемент которого содержит ссылку на некоторую функцию и ссылку на аргумент функции (рис.1).



Рис.1. Общая схема рефал-процессора

Выполнение программы на рефал-процессоре представляет собой последовательность шагов - однотипных действий, каждое из которых состоит в выполнении одной из функций рефал-программы над некоторой цепочкой данных (ведущим термом), находящихся в поле зрения. На каждом шаге выполняется некоторая последовательность команд внутреннего языка процессора.

Интерпретатор внутреннего языка выбирает очередную команду по адресу, содержащемуся в счетчике команд, модифицирует счетчик и выполняет команду. Так продолжается до тех пор, пока очередная команда не передаст управление подсистеме инициализации очередного шага. Описание всех

требующих выполнения шагов находится в виде активационных записей в стеке рекурсий.

Каждая активационная запись содержит адрес некоторого фрагмента поля зрения (ведущего терма) и адрес функции, которая должна его обработать. Выполнение шага начинается с занесения левой и правой границ ведущего терма на соответствующие указатели (регистры) процессора и занесения адреса функции на счетчик команд. Затем запускается интерпретатор команд. Каждый шаг состоит из **фазы отождествления** и **фазы замены**. Фаза отождествления заключается в сопоставлении аргумента с образцом, представленным левыми частями предложений рефал-функции. В случае успешного завершения отождествления процессор выполняет фазу замены, на которой формируется результат (на списке свободных звеньев) и этот результат заменяет собой ведущий терм в поле зрения.

После завершения текущего шага указатель вершины стека рекурсий сдвигается на предыдущую активационную запись и начинается выполнение нового шага.

Выполнение программы завершается при опустошении стека рекурсий. В процессе выполнения шага в стек могут заноситься новые активационные записи. Интерпретатор внутреннего языка использует следующие архитектурные компоненты процессора:

- поле зрения - двусвязный список, содержащий обрабатываемый текст;
- список свободных звеньев - двусвязный список, из которого берутся свободные звенья для построения результата замены;
- стек рекурсий - стек, в котором хранится информация о функциях, требующих выполнения, и их аргументах;
- стек переходов - стек для организации возвратов при локальных неудачах отождествления и для запоминания трансплантаций (на этапе замены);
- таблица элементов - таблица, в которую помещается информация о структуре анализируемого фрагмента поля зрения.

3.2. Организация памяти

Как уже говорилось, архитектурой рефал-процессора предусматривается три запоминающих устройства: поле зрения, поле состояния и поле памяти. Для построения этих запоминающих устройств используются две области оперативной памяти процессора ЕС-2635. Одна из этих областей имеет структуру кучи с элементами фиксированного размера (Ф-область), из которых строятся поле зрения и поле состояния. Другая имеет структуру кучи с элементами переменного размера (П-область), которые используются для создания поля памяти и различных служебных таблиц, буферов ввода-вывода, дескрипторов и т.п.

Поле зрения и поле состояния представляют собой двунаправленные списки, предназначенные для хранения обрабатываемой информации. Списки состоят из звеньев. Каждое звено имеет три поля (по 32 разряда): информационное поле, ссылка назад и ссылка вперед. Хранение информации в

списках существенно упрощает и ускоряет основные операции с текстом - добавление, удаление, перемещение фрагментов текста.

Основные потребители памяти в системе - это аргументы функций, размещаемые в поле зрения, и содержимое поля состояния («ящики»). Поэтому над этими типами объектов (размещаемыми в Ф-области) создается виртуальная память специальной организации. Механизм перемещения между оперативной памятью и внешней строится следующим образом.

При исчерпании памяти (исчерпании списка свободных звеньев) выбирается некоторая списковая структура – либо аргумент в поле зрения, который дольше всего не будет использоваться, либо список, хранящийся в некотором ящике. Содержимое выбранного списка перемещается в П-область (попутно подвергаясь кодированию и уплотнению), и этот освободившийся список передается в список свободных звеньев.

Возврат информации в поле зрения или в поле состояния происходит по требованию, т.е. при возникновении необходимости использования соответствующего аргумента или ящика. Тогда информация возвращается в списочную память и используется программой. При перемещении информации между Ф-областью и П-областью выполняются соответствующие преобразования формы представления.

Если при выталкивании информации из списочной памяти в П-область в последней не оказывается подходящего блока памяти, то один из блоков П-области вытесняется во внешнюю память.

3.3. Микропрограммная операционная система

Для процессора ЕС-2702 были реализованы два варианта специализированной микропрограммной операционной системы:

- вариант «С» для подключенного рефал-процессора. В этом варианте процессор ЕС-2702 функционировал как автономное устройство, подключаемое к селекторному каналу любой ЭВМ серии ЕС.
- вариант «V» для виртуального рефал-процессора. В этом варианте процессор ЕС-2702 функционировал на центральном процессоре ЭВМ ЕС-1035 в режиме виртуального процессора.

В состав микропрограммной операционной системы входили следующие компоненты:

- инициализатор (только для варианта «С»), осуществлявший подготовку процессора к работе: тестировал аппаратуру, очищал память, создавал системные таблицы, приводил в готовность системы управления;
- подсистема управления памятью, которая обеспечивала создание Ф- и П-областей и управление этими областями;
- подсистема инициализации рефал-процесса, создававшая поле зрения, поле состояния и поле памяти и запускавшая рефал-машину;
- подсистема ввода-вывода, разная для вариантов «С» и «V».

- подсистема обработки прерываний, включавшая многочисленные микропрограммы обработки прерываний. В нее входили и средства восстановления, обеспечивавшие анализ возможности повторения шага и собственно повторение шага, а также средства отладки.
- переключатель состояния процессора (только для варианта «V»), обеспечивавший работу процессора ЕС-2702 на центральном процессоре ЭВМ ЕС-1035 в режиме виртуального процессора.

3.4. Поддержка виртуальных процессоров

Как уже говорилось, спецпроцессор ЕС-2702 мог работать в двух режимах - в режиме подключенного процессора и в режиме виртуального процессора. В режиме подключенного процессора ЕС-2702 представлял собой отдельное устройство, подключаемое к селекторному каналу любой машины серии ЕС. Во втором случае на машине ЕС-1035 организовывалось два виртуальных процессора, работающих под управлением микропрограммного Монитора Виртуальных Процессоров (МВП).

Первоначально создание режима виртуальных процессоров было стимулировано задержкой поставки аппаратной базы рефал-процессора. Чтобы во-время начать комплексную отладку микропрограммного обеспечения символьного процессора было принято решение использовать имеющуюся в то время в распоряжении разработчиков машину ЕС-1035, организовав на ней два виртуальных процессора - рефал-процессора и ЕС-процессора.

Процессор ЕС-2702 реализован микропрограммно на процессоре ЕС-2635 (процессоре машины ЕС-1035). Для реализации процессора ЕС-2702 не требуется никаких изменений в аппаратуре процессора ЕС-2635. Поэтому физический процессор ЕС-2635 в одинаковой степени пригоден для реализации как рефал-процессора, так и ЕС-процессора. Следовательно, если в качестве центральной машины используется ЭВМ ЕС-1035, то физический процессор ЕС-2635 может совмещать функции процессора центральной машины и рефал-процессора. Для этого только нужно организовать динамическую перезагрузку памяти управления соответствующими микропрограммами. Таким образом, наличие в процессоре ЕС-2635 перезагружаемой управляющей памяти для хранения микропрограмм позволяло реализовать рефал-процессор на том же микропрограммном процессоре, который использовался для реализации ЕС-процессора.

Переключение виртуальных процессоров (ЕС-процессора и рефал-процессора) осуществляется специальной микропрограммой - Монитором виртуальных процессоров (МВП), загружаемой при стандартной начальной загрузке микропрограмм ЕС-процессора. В распоряжении МВП имелись две области оперативной памяти - в одной из них хранилось содержимое управляющей памяти для ЕС-процессора, в другой - содержимое управляющей памяти рефал-процессора.

При запуске рефал-программы МВП перезагружает управляющую память микропрограммы рефал-процессора и передает им управление. Когда рефал-

процессору нужно обратиться к центральной машине, например, для выполнения операции ввода-вывода, он в свою очередь обращается к МВП, который загружает управляющую память микропрограммами ЕС-процессора и возвращает управление центральной машине. После выполнения центральной машиной необходимых действий (например, операций ввода-вывода) МВП вновь перезагружает управляющую память, и управление вновь попадает к рефал-процессору.

3.5. Восстановление после сбоев

Рефал-процессор обладал иерархической системой восстановления после сбоя. В нее входили уровень аппаратуры, уровень микрокоманды, уровень шага и уровень монитора. Если возникший сбой не удавалось парировать на уровне аппаратуры или микрокоманды, то на уровне шага возникало специальное прерывание, в результате обработки которого происходил автоматический возврат на начало шага. Затем работа процессора продолжалась.

Восстановление после сбоев на уровне шага базировалось на особенностях механизма выполнения шага. Каждый шаг состоял из трех частей - отождествления, построения результата и замены аргумента на результат. На этапе отождествления проверялось соответствие аргумента функции заданному образцу. При успешном отождествлении формировался соответствующий результат, при формировании которого никаких изменений в исходном аргументе не делалось - результат целиком строился на новом участке списочной памяти. После завершения первых двух этапов результат "подшивался" в поле зрения на место исходного аргумента, который передавался в список свободной памяти. Сбой на первых двух этапах выполнения шага приводил к возврату на начало шага с исходным аргументом.

Средства восстановления позволяли успешно решать многочасовые задачи.

3.6. Арифметика произвольной разрядности

В процессоре ЕС-2702 была аппаратно реализована арифметика над целыми числами произвольной разрядности.

Целое число, которое могло участвовать в арифметических операциях, представлялось в системе счисления с основанием 2^{32} . Каждая цифра такого числа (макроцифра) размещалась в отдельном звене, занимала 4 байта поля информации и могла иметь значение от 0 до $2^{32}-1$. Знак числа занимал отдельное звено, предшествующее звеньям с макроцифрами.

Набор команд арифметики над целыми числами произвольной разрядности включал в себя «сложение», «вычитание», «умножение», «деление с остатком» и «нахождение наибольшего общего кратного».

4. Завершение работ

Работа над рефал-процессором была завершена к концу 1985 года. 26 декабря 1985 года был подписан Акт Государственных испытаний опытного образца спецпроцессора ЕС-2702.

В выводах Государственной комиссии под председательством Директора НИИ "Квант" В.К.Левина отмечалось соответствие спецпроцессора ЕС-2702 и его документации требованиям ТЗ и правильность технических решений, принятых при его разработке.

Комиссия отметила: "По научно-техническому уровню разработка соответствует современным достижениям ведущих зарубежных фирм. Впервые в стране предложен и реализован режим виртуальных процессоров, позволяющий эффективно реализовать спецпроцессоры на стандартной аппаратуре путем динамической перестройки архитектуры. Режим виртуальных процессоров целесообразно использовать для создания спецпроцессоров, которые будут являться компонентами вычислительных систем 5-го поколения."

Комиссия рекомендовала:

"1. Предприятию п/я М-5339 (НИИ ЭВМ, Минск) совместно с ИПМ АН СССР рассмотреть вопрос об организации поставки изделия ЕС-2702 в составе программных средств ЭВМ ЕС-1035 как дополнительного средства, расширяющего функциональные возможности ЭВМ ЕС-1035, с присвоением десятичного номера документации ЕС2702.

2. ИПМ АН СССР использовать результаты, полученные при разработке спецпроцессора ЕС2702, для проведения дальнейших работ по созданию виртуальных специализированных процессоров с аппаратной реализацией языков высокого уровня в рамках перспективных систем обработки данных 5-го поколения".

Когда начинались работы по созданию спецпроцессора ЕС2702, НИЦЭВТ развивал направление по созданию спецпроцессоров в рамках общей концепции ЕС ЭВМ. Тогда было заложено создание нескольких специализированных процессоров для ЕС: векторного, символьного, рекурсивного и др. Такое направление развивалось также и фирмой IBM.

Завершение работ по этим процессорам, в частности и по процессору ЕС2702, совпало с началом кризиса развития универсальных ЭВМ, прежде всего Единой системы - самой массовой у нас в стране. В это время (середина 80-х годов) стремительно развивались персональные ЭВМ. Они завоевывали все больший сектор мирового компьютерного рынка, принося доходы, позволявшие делать большие вложения в разработки и создание новых производственных мощностей.

В 1988 году в ИПМ появились первые персональные ЭВМ - IBM PC XT и IBM PC AT-286. Выпуск персональных ЭВМ на базе микропроцессоров 386, а затем 486 поставил отечественные универсальные ЭВМ серии ЕС перед лицом жесткой конкуренции с персональными машинами. К концу 80-х годов производительность персональных ЭВМ начала сравниться, а затем очень

быстро и перегонять производительность машин серии ЕС (1045, 1066) и БЭСМ-6, которые долгие годы были основными инструментами научных вычислений.

Перестройка открыла рынок для зарубежных персональных ЭВМ и они быстро стали завоевывать пользователей в России. Универсальные ЭВМ стали неконкурентоспособными по стоимости, производительности, затратам на обслуживание. Во всем мире развитие универсальных ЭВМ резко затормозилось. Развитие линии ЕС ЭВМ стало бесперспективным, а вместе с этим бесперспективным стало и развитие спецпроцессоров для этой серии. Начался развал отечественной вычислительной индустрии. В 1993 году парк универсальных машин в ИПМ практически перестал существовать.

Работы по созданию спецпроцессоров потеряли актуальность. Обладая громадным рынком массовые микропроцессоры совершенствовались столь стремительно, что специализированная аппаратура не могла угнаться за прогрессом массовой аппаратуры. Из-за этого выигрыш в производительности за счет специализации падал. Так происходило во всем мире - может быть, наиболее ярким примером этого был крах американских фирм Symbolics и Lisp Machines, ранее успешно специализировавшихся на выпуске Лисп-машин.

5. Использование ЕС-2702

Большая на то время оперативная память (3 МБ), наличие виртуальной памяти, высокая производительность, возможность восстановления после сбоев - все это позволяло решать на процессоре ЕС-2702 задачи, которые не поддавались решению на других системах.

После ввода в строй процессора ЕС-2702 он работал совместно с машиной ЕС-1035, на которой функционировала операционная система ОС ЕС. Затем машина ЕС-1035 была демонтирована, и процессор ЕС-2702 был подключен к машине ЕС-1045. Поскольку стандартное программное обеспечение ЕС-1045 базировалось на ОС СВМ (Система Виртуальных Машин), пришлось переработать Монитор, функционирующий на центральной машине. Процессор ЕС-2702 просуществовал до 1993 года, когда в ИПМ была демонтирована машина ЕС-1045, а вместе с ней и процессор ЕС-2702.

До конца жизни универсальных ЭВМ в Институте прикладной математики процессор ЕС-2702 оставался самым быстродействующим средством выполнения программ на языке Рефал.

6. Заключение

Особо следует отметить роль Анатолия Николаевича Мямлина во всей работе по аппаратной реализации Рефала и в охватывающей ее работе над проектом машины с языком повышенного уровня. На всем протяжении этой работы А.Н.Мямлин был ее научным руководителем. Можно с уверенностью сказать, что без А.Н.Мямлина было бы практически невозможно до конца выполнить техническое воплощение идей этой разработки, так как это

требовало не только средств, но и фондов, и, что в то время играло важную роль, "выбивания" этих фондов.

Работа по аппаратной реализации языка Рефал не ограничивалась созданием процессора ЕС-2702. В Секторе №4 рассматривались и анализировались другие схемы реализации языка Рефал. В частности, большая работа была проведена Л.К.Эйсымонтом по разработке параллельных схем реализации Рефала.

После завершения работ по ЕС-2702 были начаты работы по аппаратной реализации языка Лисп. Эти работы были стимулированы всплеском интереса к задачам искусственного интеллекта.

Еще одно направление работ, зародившееся в процессе создания ЕС-2702 - создание интерфейсов.

Литература

1. В.Ф.Турчин. Метаалгоритмический язык. Кибернетика, №4, 1968.
2. В.Ф.Турчин. Программирование на языке РЕФАЛ. Препринт ИПМ АН СССР, 1971.
3. А.В.Климов, С.А.Романенко, В.Ф.Турчин. Компилятор с языка РЕФАЛ. Препринт ИПМ АН СССР, 1972.
4. И.Б.Задыхайло, С.С.Камынин, Э.З.Любимский. Вопросы конструирования вычислительных машин из блоков повышенной квалификации. Препринт №68, ИПМ АН СССР, Москва, 1971.
5. И.Б.Задыхайло, Е.И.Котов, А.Н.Мямлин, Л.А.Поздняков, В.К.Смирнов. Вычислительная система с внутренним языком повышенного уровня. Препринт №41, ИПМ АН СССР, Москва, 1975.
6. И.Б.Задыхайло, Е.И.Котов, А.Г.Красовский, А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов. О повышении эффективности символьных преобразований. Препринт №15, ИПМ АН СССР, Москва, 1975.
7. М.И.Проскурин, В.К.Смирнов, М.Л.Юдина. Микропрограммный процессор. Препринт №27, ИПМ АН СССР, Москва, 1976.
8. Ю.Н.Жокин, Э.С.Ковалев, С.Н.Минасова, Н.А.Наумов, В.К.Смирнов, А.Г.Шаменко. Система автоматизации разработки микропрограммного обеспечения. Препринт №21, ИПМ АН СССР, Москва, 1975.
9. А.Г.Рубин, В.К.Смирнов. Использование средств ОС ЕС ЭВМ для создания специализированных программных модулей связи с другими процессорами. Препринт ИПМ АН СССР, Москва, 1975.
10. В.Н.Озеркова, А.Г.Рубин, В.Н.Синицын. Подключение специализированного символьного процессора к ЕС ЭВМ через стандартный интерфейс ввода-вывода. Тезисы докладов Первой Международной конференции молодых ученых по проблемам проектирования и применения дискретных систем в управлении. Минск, 1977, с.310-312.

11. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Э.С.Ковалев, В.И.Меламед, А.Г.Рубин, В.П.Тульский, С.К.Пржеблевская. Специализированный символьный процессор. Технология программирования. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. ИК АН УССР, Киев, 1979.
12. А.Н.Мямлин, И.Б.Задыхайло, В.К.Смирнов. Процессор для обработки текстовой информации. Всесоюзная конференция "Параллельное программирование и высокопроизводительные системы", Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1980.
13. A.N.Myamlin, V.K.Smirnov, S.L.Golovkov. A Specialized Symbol Processor. Fifth Generation Architecture. Ed. by J.V.Woods. New-Holland, 1986.
14. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, С.Л.Головков. Специализированный процессор ЕС-2702. В сб. "Разработка ЭВМ нового поколения: архитектура, программирование, интеллектуализация". Под ред. А.П.Ершова, В.Е.Котова. Новосибирск, ВЦ СО АН СССР, 1986, с.39-47.
15. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, С.Л.Головков, О.Н.Пономаренко, В.П.Тульский. Микропрограммная реализация языка РЕФАЛ. В сб. "Машинная реализация систем искусственного интеллекта". Под ред. Л.Т.Кузина. Москва. "Энергоатомиздат". 1988, с 58-65.
16. С.Л.Головков. Программные методы обеспечения отказоустойчивости. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР. Москва, 1988, №25.
17. С.Л.Головков, О.Н.Пономаренко, В.К.Смирнов. Система подготовки и отладки прикладных микропрограмм для ЭВМ ЕС-1035. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР. Москва, 1987, №28.
18. С.Л.Головков. Управление памятью специализированного процессора ЕС-2702. Препринт №11, ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1986.
19. В.К.Смирнов, С.Л.Головков. Рефал-процессор. В сб. "Искусственный интеллект", кн.3 - "Программные и аппаратные средства". "Радио и связь", Москва, 1990.
20. С.Л.Головков. Принципы управления процессором ЕС-2702 и разработка специализированной микропрограммной операционной системы. Кандидатская диссертация. ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1989.
21. В.П.Тульский. Организация ввода-вывода в символьном процессоре ЕС-2702. Препринт №237 ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1987.
22. В.П.Тульский. Средства связи символьного процессора ЕС-2702 с универсальной ЭВМ. Препринт №169, ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1987.
23. В.П.Тульский. Особенности обмена для виртуального процессора. Препринт №78, ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1988.
24. А.Г.Рубин, В.К.Смирнов. Вопросы реализации диалоговых средств специализированного символьного процессора. Препринт №123, ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1990.
25. А.Г.Рубин. Применение принципа эмуляции при реализации системы символьного процессора. Кандидатская диссертация. ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, 1992.

26. С.Л.Головков, О.Н.Пономаренко, В.К.Смирнов. Отладка микропрограмм на базе режима виртуальных процессоров. Препринт №42 ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1986.
27. А.Н.Мямлин, С.Н.Минасова, Н.А.Наумов, А.Г.Рубин, В.К.Смирнов. Машинно-ориентированный язык микропрограммирования. Препринт №55 ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1987.
28. А.В.Климов, С.А.Романенко. Система программирования РЕФАЛ-2 для ЕС ЭВМ. Описание языка. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1987.
29. А.В.Климов, С.А.Романенко. Система программирования РЕФАЛ-2 для ЕС ЭВМ. Описание библиотеки функций. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1986.
30. В.К.Смирнов, В.Л.Топунов. Опыт использования специализированного символьного процессора ЕС-2702 для аналитических вычислений. Всесоюзная конференция "Аналитические преобразования на ЭВМ в автоматизации научно-исследовательских работ". Вильнюс, 1990.
31. В.К.Смирнов, В.Л.Топунов, Д.Л.Шишков. Аналитические вычисления на процессоре ЕС-2702. Препринт №62, ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, 1991.
32. В.К.Смирнов. Персональные ЭВМ и перспективы их развития. Препринт №101 ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1991.
33. Л.К.Эйсымонт. О возможности параллельных схем реализации одного языка для описания задач переработки текстовой информации. УСиМ, №2, 1977, с. 56-64.
34. К.Н.Ефимкин, И.Б.Задыхайло. О верификации программ на одном языке. Программирование, №2, 1980, с. 69-76.
35. С.Л.Головков, Н.А.Наумов, В.К.Смирнов. О некоторых новых средствах языка рекурсивных функций. Препринт №6 ИПМ им.М.В.Келдыша АН СССР, Москва, 1982.
36. В.Я.Пыхтин, А.П.Запольский, В.Б.Шкляр, П.Ф.Яцевич. Динамическое микропрограммирование в ЭВМ с перезагружаемой управляющей памятью. Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ, вып. 12, 1978.
37. Р.М.Асцатуров, В.Г.Васендо, А.П.Запольский, М.С.Марголин, В.Б.Шкляр, П.Ф.Яцевич. Система динамического микропрограммирования в ЭВМ ЕС-1036. Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ, вып. 13, 1982.
38. В.Г.Васендо, М.П.Котов, Е.Е.Митрофанова, Н.В.Мороз. Исследование возможности микропрограммной поддержки управляющей программы ОС ЕС. Вопросы радиоэлектроники, сер. ЭВТ, вып. 11, 1980.
39. А.Н.Мямлин, И.Б.Задыхайло, В.К.Смирнов. Об эффективности аппаратной реализации языка для описания объектов на уровне понятий и символьных преобразований. Тр.семинара "Искусственный интеллект. Итоги и перспективы". Изд-во "Знание". 1974.
40. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, В.П.Тулский. Микропрограммное управление арифметическими операциями над числами с фиксированной запятой. Отчет ИПМ, 1971, Л2-83, 3,2 п.л.

41. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, В.П.Тульский. Микропрограммное управление арифметическими операциями над числами с плавающей запятой. Отчет ИПМ, 1971, Л2-85, 6 п.л.
42. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Э.С.Ковалев, С.Н.Минасова. Система автоматизации микропрограммирования. Язык описания микропрограмм. Модель микропрограммного процессора на языке ФОРЭС. Отчет ИПМ, 1971, Л2-88. 7,1 п.л.
43. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, В.П.Тульский. Микропрограммная система СПАК. Исполнение команд сравнения и преобразования. Часть III. Отчет ИПМ, 1972, Л2-178. 7,2 п.л.
44. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, В.М.Новожилов. Процессор с микропрограммным управлением. Блок синхронизации. Отчет ИПМ, 1971. Л2-181. 39 стр.
45. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, В.И.Меламед. Микропрограммные алгоритмы символьного процессора. Отчет ИПМ, 1975, Л2-280. 61 стр.
46. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Н.А.Наумов. Специализированный процессор для текстовых преобразований. Кн.1. Операции и принципы работы. Отчет ИПМ, 1976, Л2-266, 71 стр.
47. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, М.И.Проскурин. Специализированный процессор для текстовых преобразований. Кн.2. Микропрограммный процессор. Отчет ИПМ, 1976, Л2-267, 40 стр.
48. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Э.С.Ковалев. Специализированный процессор для текстовых преобразований. Кн.3. Система автоматизации микропрограммирования. Отчет ИПМ, 1976, Л2-268, 43 стр.
49. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Э.С.Ковалев. Специализированный процессор для текстовых преобразований. Кн.4. Микропрограммные алгоритмы операций текстового процессора. Отчет ИПМ, 1976, Л2-269, 62 стр.
50. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Э.С.Ковалев. Программное обеспечение спецпроцессора текстовых преобразований. Транслятор с языка РЕФАЛ на внутренний язык ПТП. Кн.1. Отчет ИПМ, 1979, Л2-324. 48 стр.
51. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, А.Г.Рубин. Программное обеспечение процессора текстовых преобразований на ЕС ЭВМ. Отчет ИПМ, 1979, Л2-321, 107 стр.
52. А.Н.Мямлин, И.Б.Задыхайло, В.К.Смирнов. Спецпроцессор на базе микропрограммного процессора ЕС-2635. Часть I. Концепции и возможности. Отчет ИПМ, 1980, Л2-350. 70 стр.
53. А.Н.Мямлин, И.Б.Задыхайло, В.К.Смирнов. Спецпроцессор на базе микропрограммного процессора ЕС-2635. Часть II. Операции и принципы работы. Отчет ИПМ, 1980, Л2-351. 92 стр.
54. А.Н.Мямлин, В.К.Смирнов, Е.И.Котов. Динамическое распределение памяти микропрограммного процессора. Отчет ИПМ, Л2-359. 41 стр.
55. А.Н.Мямлин, И.Б.Задыхайло, В.К.Смирнов. Вопросы построения специализированных процессоров. Отчет ИПМ, 1981, Л2-389.

Участники разработки

Научный руководитель:

Мямлин Анатолий Николаевич

Зам.главного конструктора:

Смирнов Всеволод Кузьмич (*)

На разных этапах работы по созданию специализированного символьного процессора участвовали следующие сотрудники Института прикладной математики:

Бабкина Галина Михайловна
Головков Сергей Леонардович
Жокин Юрий Николаевич
Задыхайло Игорь Борисович
Каминская Ирина
Капустина Любовь Сергеевна
Ковалев Эрий Сергеевич
Котов Евгений Иванович
Меламед Вера Ивановна
Минасова Светлана Николаевна
Наумов Николай Анатольевич
Озеркова Вера Геннадиевна
Пономаренко Ольга Николаевна
Проскурин Михаил Иванович
Рубин Александр Григорьевич
Синицын Владимир Николаевич
Тульский Вячеслав Петрович
Шаменко Александр Григорьевич
Шаменко Светлана Михайловна
Эйсымонт Леонид Константинович
Юдина Марина Львовна

(*). Главным конструктором был Ю.В.Хлусевич (НИИ ЭВМ, г.Минск).

Состав Государственной комиссии**Председатель комиссии:**

В.К.Левин Директор НИИ "Квант"

Заместители Председателя:

А.Н.Мямлин ИПМ АН СССР

Я.П.Локшин НИЦЭВТ

Члены комиссии:

А.И.Гусев Президиум АН СССР

С.Н.Флоренцев Международный центр научно-технической информации

А.А.Храмов Кафедра Кибернетики МИФИ

В.Л.Топунов Кафедра теории чисел МГПИ

Л.В.Проворов ВЦ ЦАГИ

Ю.Е.Иванов п/я В-8325

В.К.Смирнов ИПМ АН СССР

С.Л.Головков ИПМ АН СССР

В.П.Качков НИИ ЭВМ, г.Минск

Ю.В.Хлусевич НИИ ЭВМ, г.Минск

А.П.Гагарин НИЦЭВТ