

Поступила в редакцию 5 сентября 1975 г.

УДК 681.3.056 : 539.1.098

**А. В. БЕЛОВ, В. Н. ЕРЕМЕЕВ, В. И. ЖУК, Т. И. КАЛАГИНА,
Г. В. МУРАДЯН, Е. А. ТИТОВА, Б. И. ШИТИКОВ, Ю. Г. ЩЕПКИН**

(Москва)

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ МНОГОМЕРНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ НА МАЛОЙ ЭВМ С МАГНИТНЫМИ ДИСКАМИ

Введение. Одной из важных проблем автоматизации измерений в ядерной физике низких и средних энергий является регистрация спектров [1—6]. К системам регистрации спектров предъявляются требования быстродействия, универсальности и гибкости. Последние два требования определяются разнообразием задач регистрации спектров и возможностью их оперативного изменения. Необходимость выполнения этих требований, особенно в условиях увеличения информационной сложности задач регистрации, привела к построению систем регистрации спектров на базе универсальных ЭВМ. Дальнейшее повышение универсальности и гибкости этих систем достигается созданием проблемно-ориентированного комплекса программ регистрации спектров, универсального в пределах некоторого класса задач и оперативно адаптирующегося к изменению экспериментов и их параметров.

Использование такого комплекса во многих случаях делает ненужной разработку программ для каждого частного случая и позволит сократить трудозатраты и сроки перестройки системы регистрации при постановке новых экспериментов и изменении ведущихся.

В данной статье описываются принципы построения проблемно-ориентированного комплекса программ для многомерной регистрации спектров непосредственно на универсальной ЭВМ с магнитными дисками.

Рассматриваемый комплекс предназначается для проведения многопараметрических экспериментов в области ядерной физики и физики твердого тела. Область применения комплекса ограничена условием, состоящим в том, что суммарный объем одновременно регистрируемых спектров без исключения из них маловероятных каналов превышает объем поля данных оперативной памяти (ОП), но меньше объема дисковой памяти (ДП) на величину, необходимую для размещения достаточно большого нерассортированного массива признаков событий.

Этот комплекс программ разработан для нескольких систем регистрации. Аппаратная часть этих систем состоит из многоходового измерителя исходных признаков и ЭВМ на базе процессора HP2100A фирмы «Хьюлетт-Паккард». Измеритель обслуживает до 15 детекторов и подключен к ЭВМ через канал прямого доступа (КПД). Минимальная конфигурация ЭВМ в системе регистрации содержит ОП объемом

16К 16-разрядных двоичных слов и накопитель на магнитных дисках (НМД) типа HP7900A с перемещаемыми головками. Объем ДП составляет около $2,5 \cdot 10^6$ слов. Программы комплекса адаптируются к расширению ОП и ДП. Благодаря этому расширению возрастает быстродействие системы регистрации.

Программное обеспечение систем регистрации разработано на языке ассемблера с использованием операционной системы DOS-M и может быть применено также на других ЭВМ, совместимых с указанной, например, на моделях серии HP2100 и на ЭВМ М-6000. К середине 1974 г. программное обеспечение систем регистрации прошло испытания в реальных условиях.

Это программное обеспечение содержит комплекс программ регистрации спектров; диалоговую программу, служащую для ввода — вывода и редактирования файлов — символьных и двоичных таблиц; диалоговую программу для вывода массивов с диска на внешние устройства и программу для контроля приема в ОП исходных признаков событий от их датчика.

1. Задачи регистрации спектров. Задачи регистрации спектров, решаемые с помощью рассматриваемого комплекса программ, сводятся к следующему. На вход ЭВМ от измерителя поступает поток признаков X исходных событий. Признаки X могут иметь постоянную длину в одно или два слова и могут состоять из одного или нескольких элементарных признаков. ЭВМ регистрирует спектры путем сортировки признаков X по критериям различной сложности [3]. Особенность задач регистрации, для которых в первую очередь предназначен рассматриваемый комплекс программ, состоит в том, что каждый признак X одновременно может нести информацию о случайном количестве некоторых «вторичных» событий. Сортировка каждого признака X заключается в извлечении из него информации о «вторичных» событиях путем его расщепления на несколько «вторичных» признаков Y (в соответствии с некоторой функцией их идентификации) и в последующей поканальной сортировке * признаков Y .

Известные системы регистрации спектров на ЭВМ с магнитными барабанами [4] и дисками [5] не предназначены для решения поставленной задачи регистрации спектров с расщеплением признаков исходных событий одновременно на несколько признаков «вторичных» событий. Трудности решения этой задачи «связаны, с одной стороны, с ее информационной сложностью и ограниченными возможностями технических средств (объем памяти, быстродействие), а с другой — с жесткими требованиями к продолжительности вынужденных перерывов в измерении. Информационная сложность этой задачи определяется большим количеством используемых источников исходных событий, сложностью функции идентификации, большим количеством спектров и каналов в них, высокой интенсивностью потока исходных событий (одновременно могут накапливаться до нескольких десятков спектров с общим объемом до миллиона каналов).

2. Подход к проектированию комплекса программ регистрации спектров. Подход к созданию рассматриваемого комплекса программ в первую очередь определился требованиями быстродействия, универсальности и адаптивности, отмеченными во введении.

Кроме того, этот комплекс программ должен быть снабжен средствами контроля, повышающими достоверность результатов регистрации и снижающими время обнаружения неисправности в системе регистрации. Комплекс программ, удовлетворяющий этим требованиям, как любую сложную многофункциональную систему целесообразно строить по

* Подсчет количества событий в каждом канале спектра [6].

модульному принципу. Перечислим меры, принятые для обеспечения необходимых свойств комплекса.

Модульность. Комплекс состоит из наборов функциональных модулей и вызывающих их модульных организующих программ *EXPRi*, каждая из которых обслуживает *i*-ю систему регистрации спектров. Большинство модулей инвариантно относительно задач регистрации спектра (относительно эксперимента), их параметров, структуры и формата исходных признаков событий. Эти модули используются разными организующими программами. Все модули и организующие программы инвариантны относительно распределения поля данных ОП и ДП. Модули могут иметь модификации, определяемые максимально возможным объемом поля данных ОП, некоторыми изменениями своих функций и способов их реализации. Модули оформляются в виде сегментов, а организующие программы — в виде главных (*MAIN*) программ в операционной системе DOS-M. Все сегменты спроектированы так, что могут работать вне главной программы, если их оформить как отдельные программы.

Быстродействие. Для достижения максимально возможного быстродействия системы регистрации, или, иначе, для максимального сокращения потерь времени на вынужденные перерывы в измерении, используются следующие меры: выбор метода быстрой регистрации; оптимизация параметров алгоритмов регистрации; оптимизация программ с целью минимизации времени выполнения многократно повторяющихся циклов; сокращение длины тела сегментов и главной программы с целью увеличения поля данных ОП; оптимальное распределение поля данных ОП; использование обращений к ДП по абсолютным адресам; автоматическое распределение поля данных ДП в зависимости от статистического распределения потока событий в процессе эксперимента.

Универсальность. Для обеспечения универсальности комплекса программ регистрации спектров одновременно используются следующие факторы: выбор функционально-полного (для заданной проблемной ориентации) набора модулей; выбор метода регистрации, который подходил бы для широкого круга экспериментов; выбор универсальной структуры организующей программы; организация работы программ по таблицам переменных параметров; максимально возможное отражение специфики эксперимента в таблицах переменных параметров программ; организация обращения к массивам в ОП и ДП через файлы — таблицы параметров программ и файлы — паспорта массивов.

Кроме того, степень специализации программного модуля, производящего прием исходных признаков событий, может быть существенно понижена благодаря выбору унифицированной структуры этих признаков и алгоритма их преобразования.

Адаптивность. Для обеспечения адаптивности модульных программ регистрации спектров к изменениям эксперимента и сокращения затрат на их перестройку используются следующие меры: использование таблиц параметров программ и паспортов массивов; удобная организация ввода и редактирования таблиц параметров программ и паспортов массивов; локализация специфики экспериментов в отдельных заменяемых частях (например, подпрограммах) отдельных модулей.

При развитии комплекса программ предусматривается автоматизация формирования параметров программ и распределения полей данных.

Контроль. Повышение достоверности результатов регистрации и снижение времени обнаружения неисправности в системе регистрации обеспечиваются с помощью следующих видов контроля: контроль приема исходных событий с распознаванием вида ошибок; контроль интенсивности потока исходных событий; контроль параметров программы;

статистический контроль достоверности зарегистрированных спектров; автономный тестовый контроль системы регистрации с имитацией регистрируемых данных.

3. Метод регистрации. Метод регистрации спектров, разработанный для рассматриваемого комплекса программ, заключается в следующем.

Процесс регистрации спектров подразделяется на два этапа — внешнее неинкрементное накопление и внешняя поканальная сортировка. На обоих этапах поле данных на диске разделяется на поле каналов и поле признаков. Оба эти поля, в свою очередь, разделены на зоны так, что каждой зоне поля признаков соответствует одна зона поля каналов. В каждой зоне поля признаков размещен неупорядоченный массив вторичных признаков Y , которые каким-либо образом соответствуют номеру зоны. Заметим, что значения признаков, размещенных в разных зонах, могут быть одинаковыми.

На этапе накопления поле данных в ОП делится на поле приема (буфер КПД) и поле группировки, которое разделено на зоны, соответствующие зонам на диске. Если позволяет объем ОП, то, в свою очередь, каждая зона в поле группировки может быть подразделена на две подзоны. Первичные признаки X , сформированные измерителем, через КПД поступают в поле приема. Одновременно с этим программа следит за текущей границей заполнения этого поля, преобразует каждый очередной первичный признак X в один или несколько вторичных признаков Y в соответствии с функцией идентификации и группирует вторичные признаки по зонам поля группировки так, что в каждой заполняемой зоне (подзоне) образуется неупорядоченный массив. Когда какая-либо зона (подзона) заполнится, ее содержимое передается в соответствующую зону поля признаков диска. При этом прием первичных признаков продолжается. Если зоны в поле группировки разделены на подзоны, то одновременно с этим начинает заполняться другая подзона той же зоны главной памяти. Таким образом, прием первичных признаков, их преобразование, группировка вторичных признаков по зонам и передача их на диск совмещены во времени. По окончании заполнения и обработки буфера КПД начинается новое заполнение этого буфера. Этап внешнего накопления заканчивается либо после заданного количества заполнений буфера КПД, либо по достижении требуемой степени заполнения зон диска.

На этапе внешней сортировки поле данных в ОП делится на поле признаков и поле каналов. Массив в каждой зоне поля признаков на диске делится на элементарные массивы d , объем каждого из которых равен объему поля признаков в главной памяти. Массив в каждой зоне поля каналов на диске делится на элементарные массивы s , объем каждого из которых равен объему поля каналов в главной памяти. В ОП могут одновременно находиться один массив d и один массив s . Алгоритм внешней поканальной сортировки состоит в поочередном формировании массивов s и пересылке их на диск. Для формирования каждого массива s , относящегося к некоторой зоне, производится пересылка в главную память и внутренняя сортировка всех массивов d , размещенных в заполненной части соответствующей зоны поля признаков на диске. Внутренняя сортировка каждого элемента (признака) Y массива d заключается в определении адреса соответствующего элемента в массиве s по значению признака Y и в увеличении значения этого элемента на единицу. Время сортировки существенно благодаря предварительной группировке признаков по зонам на диске.

Описанный метод позволяет существенно сократить время вынужденных перерывов в измерении благодаря разделению процесса регистрации на два этапа — внешнее накопление и внешнюю сортировку, отделению процесса идентификации «вторичных» признаков от их сор-

тировки, совмещению во времени процессов на этапе накопления и со-

4. **Программы регистрации спектров.** Организующие программы *EXPRi* различаются в основном использованием различных модификаций отдельных модулей-сегментов. Упрощенная схема программы *EXPRi* показана на рисунке. В этой схеме используется 11 сегментов. Основные функции регистрации выполняются двумя из них: сегментом *STORi* внешнего неинкрементного накопления и сегментом *SORTj* внешней поканальной сортировки. Два сегмента (*DIALi*, *PREP*) выполняют некоторые подготовительные функции. Три сегмента (*ESORT*, *EØCT*, *BOUND*) выполняют в основном функции редактирования таблиц параметров. Два сегмента (*GEND*, *CHECK*) предназначены для автономного контроля. Сегмент *STATi* служит для оперативного статистического контроля и суммирования спектров, а сегмент *FINAL* — для передачи полученных спектров во временный местный архив в ДП. Более подробно функции сегментов будут описаны ниже. Из 11 перечисленных сегментов 8 сегментов инвариантны относительно типа экспериментов. В 3 сегментах (*DIALi*, *STORi*, *STATi*) специфика эксперимента отражена только в определенных их частях, заменяемых в зависимости от эксперимента. Сегмент *SORTj* имеет несколько модификаций различной универсальности и быстродействия, каждая из которых предназначена для своего класса задач сортировки, определяемого ограничениями на количество спектров и зон.

Предусмотрено три основных режима программы *EXPRi*: 1) рабочий режим, или режим измерения; 2) автономный режим 1 с программной генерацией контрольных сортируемых массивов в ДП; 3) автономный режим 2 с имитацией потока исходных событий с помощью фотоввода.

В программе *EXPRi* используются следующие виды файлов — таблиц переменных параметров:

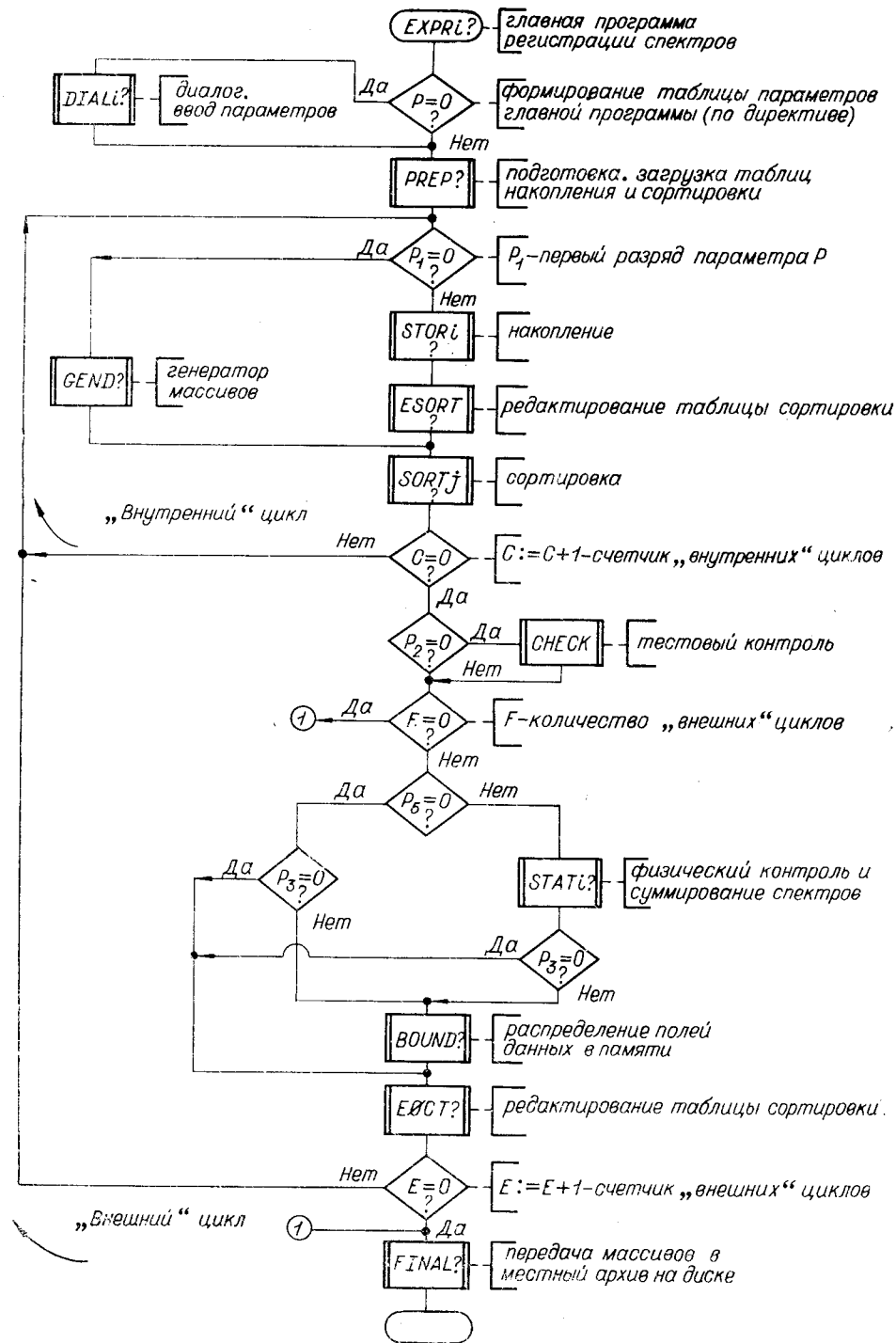
таблица *FPRAM* параметров программы *EXPRi*;
таблицы накопления, определяющие работу сегментов *STORi*, *GEND*;
таблицы сортировки, определяющие работу сегментов *SORTj*, *CHECK*;
таблицы контрольных параметров для сегмента *STATi*.

Структура всех таблиц, кроме таблиц контрольных параметров, инвариантна относительно эксперимента.

Таблица *FPRAM* содержит управляющее слово программы *EXPRi*, параметры, определяющие количество циклов в ней, и некоторые параметры, характеризующие эксперимент (например, номер вида измерения). Управляющее слово в этой таблице обуславливает режим работы программы *EXPRi*, используемый набор сегментов и схему их соединения.

Таблицы накопления и сортировки содержат параметры распределения полей данных ОП и ДП и управляющее слово, определяющее режимы работы соответствующих сегментов. Таблицы накопления содержат параметры, определяющие условия окончания работы сегмента *STORi*, параметры, характеризующие допустимую интенсивность входного потока регистрируемых признаков событий, а также допустимое количество ошибок приема этих признаков в ОП. В таблицах сортировки указано допустимое количество переполнений в каналах спектров.

Рассмотрим работу программы *EXPRi*. Директивой запуска программы *EXPRi* в нее вводятся 5 параметров, передаваемых затем



работы определяется первым из этих параметров — управляющим словом P (см. рисунок). Если в директиве запуска задается $P=0$, то сегмент $DIALi$ в диалоговом режиме формирует управляющее слово P и вводит таблицы контрольных параметров. Если в директиве запуска задается $P \neq 0$, то сегмент $DIALi$ не вызывается; при этом в таблицу $FPRAM$, содержание которой было описано выше. Режим

используются таблицы контрольных параметров, сформированные этим сегментом ранее. Далее сегмент *PREP* в зависимости от режима работы, указанного в управляющем слове *P*, выбирает необходимые исходные таблицы накопления и сортировки и загружает их в файлы рабочих таблиц, которыми пользуются другие сегменты. По окончании подготовительного этапа осуществляется определенное количество «внешних» циклов регистрации. В каждом «внешнем» цикле сначала производится накопление спектров за определенное количество «внутренних» циклов регистрации, а затем выполняется контроль и некоторая обработка спектров, накопленных в этом «внешнем» цикле. Количество $|F|$ «внешних» циклов и количество $|C|$ «внутренних» задаются в таблице *FPRAM*.

В рабочем режиме и автономном режиме 2 первый разряд слова *P* имеет значение $P_1=1$. В этих режимах во «внутренних» циклах чередуется выполнение сегментов *STORi*, *ESORT*, *SORTj*.

Сегмент *STORi* осуществляет этап внешнего неинкрементного накопления, описанный в разделе 3. Исходные признаки *X* принимаются через КПД в рабочем режиме от измерителя, а в автономном режиме 2 — от фотоввода. В этом сегменте реализован контроль интенсивности потока признака *X*. Для случая, когда признак *X* состоит из двух слов, предусмотрен контроль приема признаков *X*, основанный на выявлении запрещенных значений слов и их запрещенных последовательностей. В каждом признаке *X* запрещенными считаются 1-е слово, содержащее «0» в старшем разряде, 2-е слово, содержащее «1» в старшем разряде, а также нулевые значения этих слов. Контроль приема признаков *X* обнаруживает 7 видов ошибок, регистрирует количество ошибок по каждому виду и суммарное их количество. Этим обеспечивается постоянный эффективный контроль датчика признаков *X*. Признаки *X*, содержащие ошибку, не подвергаются дальнейшей обработке. Если суммарное количество ошибок превысит заданное допустимое значение, то сегмент *STORi* печатает сообщение об этом и сбрасывает программу *EXPRi*.

Одновременно могут быть заданы два условия нормального окончания работы сегмента *STORi*: по заданному количеству заполнений поля приема ОП (буфера КПД) и по некоторому критерию заполнения любой зоны поля признаков на диске. Сегмент *STORi* заканчивает работу по тому из этих условий, которое выполнится раньше. Критерий заполнения любой зоны признаков на диске выбран исходя из того, чтобы эта зона не переполнилась в результате обработки признаков *X* в поле приема ОП во время последнего ее заполнения перед окончанием работы сегмента *STORi*. Согласно этому критерию, зона признаков на диске считается заполненной, если объем ее заполненной части не меньше некоторого контрольного объема.

Все характеристики результатов накопления, в том числе границы заполнения зон поля признаков на диске, отражаются в текущей таблице накопления, которая формируется в ОП на месте рабочей таблицы накопления и в конце работы сегмента *STORi* посылается на диск. В этой таблице регистрируется также время работы этого сегмента.

Сегмент *ESORT* редактирует рабочую таблицу сортировки по результатам накопления, полученным в текущей таблице накопления по окончании работы сегмента *STORi*. Кроме того, сегмент *ESORT* формирует файл суммарного количества ошибок, зарегистрированных сегментом *STORi*, и файл суммарного времени работы сегмента *STORi* в заданном количестве «внутренних» циклов.

Сегмент *SORTj* осуществляет этап внешней поканальной сортировки, описанный выше в разделе 3. Индекс *j* в названии этого сегмента указывает номер его версии, определяемой используемым способом внутренней сортировки. Сегмент *SORTj* работает по рабочей

таблице сортировки, отредактированной сегментом *ESORT*. При работе этого сегмента в 1-м внутреннем цикле каждого внешнего цикла массивы s не считываются с диска, а вместо этого часть поля данных ОП, служащая для их размещения, заполняется нулями перед формированием элементарных массивов s . В остальных внутренних циклах массивы s считываются с диска и значения их элементов увеличиваются в процессе сортировки. Номера переполнившихся каналов спектров регистрируются в файле переполнений. Если количество переполнений превысит допустимую величину, указанную в рабочей таблице сортировки, то сегмент *SORTj* печатает соответствующее сообщение и завершает выполнение программы *EXPRi*.

Если заданное количество F «внешних» циклов равно нулю, то после выполнения заданного количества «внутренних» циклов сегмент *FINAL* печатает сообщение об окончании работы программы *EXPRi*, распечатывает файл ошибок (если была зарегистрирована хотя бы одна ошибка приема признаков X в сегменте *STORi*) и передает необходимые зарегистрированные спектры во временный местный архив на диске в соответствии с указаниями в каталоге спектров. После этого выполнение программы *EXPRi* завершается. Если $F > 1$, то в зависимости от значений разрядов P_3 и P_5 выполняются сегменты *STATi*, *BOUND*, *EOST* либо часть из них (см. рисунок).

Сегмент *STATi* производит статистический контроль достоверности спектров, полученных за определенное количество «внутренних» циклов. Этот контроль основан на статистическом сравнении значений некоторых функций, характеризующих контролируемый спектр, с «эталонными» значениями этих функций, полученными ранее в том же эксперименте.

Сегмент *BOUND* автоматически распределяет поле данных на диске (в зависимости от статистического распределения признаков событий) по зонам, устанавливая границы этих зон в рабочих таблицах накопления и сортировки таким образом, чтобы увеличить степень заполнения всех зон и уменьшить среднее время перемещения головок диска. Для этого зоны размещаются в поле данных диска от центра к краям в порядке убывания вероятности попадания в них событий.

Сегмент *EOST* восстанавливает в управляющем слове таблицы сортировки признак того, что следующий «внутренний» цикл будет первым в очередном «внешнем» цикле. Это необходимо для работы сегмента *STORi*. Кроме того, сегмент *EOST* обнуляет файл времени, формируемый сегментом *ESORT*. После выполнения сегмента *EOST* начинается новый «внешний» цикл или, если заданное количество «внешних» циклов исчерпано, выполняется сегмент *FINAL* и программа *EXPRi* сбрасывается.

В автономном режиме 1 во «внутренних» циклах работа сегмента *STORi* имитируется выполнением сегмента *GEND*, который генерирует случайные массивы в зонах поля признаков на диске в соответствии с рабочей таблицей накопления. В зависимости от значений определенных разрядов управляющего слова этой таблицы генерируются неупорядоченный и упорядоченный массивы, а также массивы, все элементы которых содержат во всех разрядах нули или единицы.

По окончании заданного количества «внутренних» циклов в автономных режимах 1 и 2 (при $P_2 = 0$) выполняется сегмент *CHECK*, который производит тестовый контроль спектров, полученных в результате сортировки контрольных массивов, сформированных сегментом *GEND* либо сегментом *STORi* в режиме приема исходных признаков от фотоввода. Тестовый контроль основан на том, что отсчеты в соседних каналах контролируемого спектра должны быть равны или отличаться на константу. Сегмент *CHECK* работает по рабочей таблице сортировки. По окончании контроля печатается сообщение об ошибках с

указанием их значений и номеров соответствующих им каналов спектра.

Приведем основные характеристики возможностей регистрации спектров, обеспечиваемые программами *EXPRi*. Максимальное значение отсчета в канале, формируемое модулем *SORTj*, составляет $64K-1$. Максимальное количество каналов в одном спектре равно $64K-1$. Суммарное количество каналов в одновременно регистрируемых спектрах зависит от объема поля данных на диске и, например, при использовании одного дискового накопителя HP7900A составляет примерно 10^6 . Допустимое количество спектров зависит от объемов полей данных главной памяти, диска и количества каналов в спектрах. Например, объем поля данных главной памяти, равной $20K$ байтам, позволяет накапливать примерно 50 спектров. Время сортировки массива объемом 10^6 признаков на 37 спектров по $8K$ каналов в каждом составляет примерно 46 с при объеме ОП, равном $32K$ байтам. Средняя интенсивность потока первичных признаков событий составляет до 10^4 событий в секунду в зависимости от функции идентификации и определяется из условия, согласно которому средний период потока первичных признаков должен быть больше среднего времени преобразования этих признаков в сегменте *STORi*; максимальная интенсивность потока первичных признаков событий равна примерно $25 \cdot 10^4$ событий в секунду, что соответствует мертвому времени, равному 4 мкс. Мертвое время системы может быть уменьшено путем установки дополнительных регистров в многодетекторном измерителе времени пролета частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Маталин, Ж. Нари, С. И. Чубаров. Методы регистрации и обработки данных в ядерной физике и технике. М., Атомиздат, 1968.
2. С. С. Курочкин. Многомерные статистические анализаторы. М., Атомиздат, 1968.
3. В. И. Жук. О некоторых методах накопления и внешней сортировки спектрометрических данных на малой ЭВМ с магнитными дисками.— «Автометрия», 1975, № 6.
4. Р. Г. Офенгенден, Л. А. Головач, С. И. Пилипчак. Алгоритм для измерения распределения вероятностей произвольного входящего потока с помощью ЭВМ.— В кн.: Автоматизация научных исследований. (Материалы III Всесоюзной школы.) Рига, «Зинатне», 1972.
5. D. C. Hensley. List or sort? — Some experience with the ORIC multiparameters data acquisition system.— "IEEE Trans. Nucl. Sci.", N. Y., 1973, vol. NS-20, № 1.
6. В. М. Цупко-Ситников. ЭВМ в задачах физики низких энергий.— В кн.: ЭВМ в экспериментальной физике. Лекции II школы ОИЯИ, г. Алушта, 3—7 мая 1970 г. Дубна, ОИЯИ, 1970.

Поступила в редакцию 10 июня 1975 г.