

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 681.142 : 537.7

А. Н. ВЫСТАВКИН, А. Я. ОЛЕЙНИКОВ, Е. В. ПАНКРАЦ,
А. Я. СМИРНОВ, В. Н. СТРЕЛЬНИКОВ, А. Б. ФУРЩИК

(Москва)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НА ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРАХ ДЛИННОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

В научных исследованиях все шире применяются излучения миллиметровой, субмиллиметровой и длинноволновой инфракрасной областей спектра. Для радиотехники важным в практическом отношении можно считать проведение спектральных исследований в диапазоне длин волн, соответствующих окнам прозрачности атмосферы [1]. Задачей спектроскопии здесь является поиск и исследование веществ и эффектов, полезных для освоения этих областей спектра. При этом привлекают как методы СВЧ с использованием когерентных источников излучения, так и оптические методы, когда в качестве источников используются широкополосные излучатели. Несмотря на то, что методами СВЧ можно достичь предельно высоких разрешений [2, 3], спектрометры на их основе пока не получили широкого распространения, так как в настоящее время эти устройства относятся к классу уникального оборудования. В то же время оптические методы, незаменимые при проведении спектральных исследований тепловых источников излучения, оказываются пригодными и для многих других задач этого диапазона.

Рассматриваемый диапазон труден для спектральных исследований с применением оптических методов из-за крайне низких уровней энергии широкополосных источников излучения в этой области спектра (например, черное тело при температуре 3000 К на длине волны 1 мм излучает 10^{-8} часть энергии, генерируемой им при тех же условиях на длине волны 10 мкм). Поэтому проблема эффективного использования энергии здесь оказывается достаточно острой. В этих условиях, особенно в случаях, когда требуется сравнительно высокое разрешение или исследования ведутся в широком спектральном диапазоне, наилучшим методом можно считать метод фурье-спектроскопии. Так, фурье-спектрометры по сравнению с дифракционными спектрометрами могут работать при гораздо большей светосиле и, следовательно, большем потоке энергии, а также при значительно большем отношении сигнала к шуму за счет того, что на приемный элемент фурье-спектрометра воздействует энергия сразу во всем рабочем интервале частот. При тех же требованиях к спектру по интервалу исследуемых частот, разрешению и отношению сигнала к шуму оба указанных фактора дают основания ожидать увеличения эффективности примерно на два порядка [4]. Однако реализовать эти преимущества можно лишь, применяя ЭВМ, поскольку непосредственным результатом измерения является интерфе-

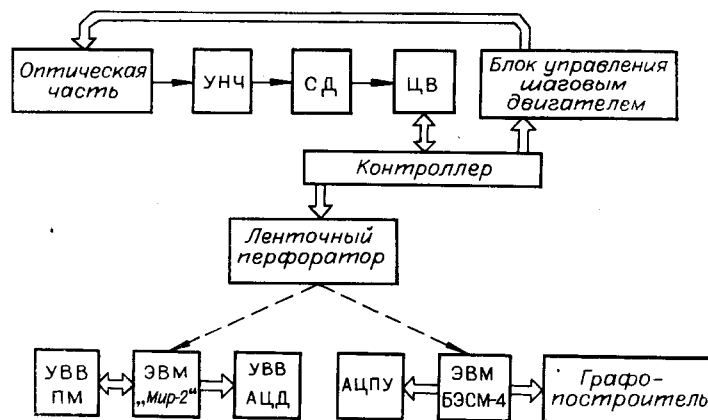


Рис. 1. Блок-схема системы автоматизации исследований на фурье-спектрометре с использованием ЭВМ в режиме "off line".

программа (зависимость отклика приемника от разности хода двух лучей), содержащая обычно от нескольких сотен до десятка тысяч выборок, и для получения спектра нужно выполнить обратное дискретное преобразование Фурье от интерферограммы.

В статье обсуждаются результаты проводившихся в течение последних лет работ по созданию аппаратного и математического обеспечения экспериментов на фурье-спектрометрах при исследованиях в длинноволновой части дальнего инфракрасного диапазона длин волн. Нами разработаны системы, начиная с относительно простого устройства управления фурье-спектрометром со сбором информации на машинный носитель и кончая комплексом, состоящим из экспериментальной аппаратуры и ЭВМ "on line" с широким набором программ и внешнего оборудования, обеспечивающих возможность выбора оптимальных условий проведения эксперимента и способа обработки данных в режиме диалога экспериментатора с ЭВМ.

Первым шагом в этом плане явилось создание системы (рис. 1), в которой осуществлено программное управление фурье-спектрометром и регистрация данных на перфолену (ПЛ). Восстановление спектров производилось на универсальной ЭВМ, использовавшейся в режиме "off line" [5]. Спектральная информация могла выводиться на графопостроитель, подключенный к ЭВМ (рис. 2). Создание такой системы явилось первым необходимым этапом автоматизации экспериментов на фурье-спектрометре, но не всегда достаточным, так как здесь возникают проблемы, обусловленные разрывом во времени между измерением интерферограммы и получением готового спектра. В ряде случаев, например в экспедиционных условиях или при отсутствии ЭВМ в лаборатории, такие системы с успехом применяются [6]. Известны (см., например, [4]) промышленные разработки такого типа у ряда фирм.

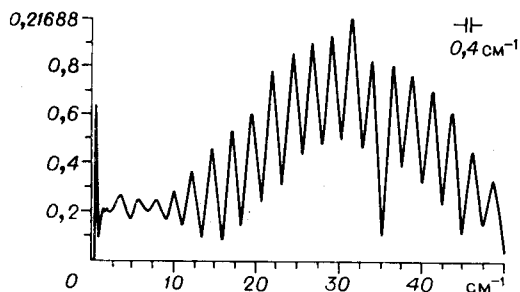


Рис. 2. Спектр интерференции в плоскопараллельном образце антимонида индия, воспроизведенный с помощью планшетного графопостроителя «Бенсон-220».

Постановка спектральных исследований в научно-исследовательских лабораториях характеризуется тем, что как сами задачи, так и ме-

тодика их решений могут широко меняться от эксперимента к эксперименту, развиваться и усложняться для выявления все более тонких зависимостей. В этих условиях представляется разумным за счет определенной избыточности аппаратурного и математического обеспечения создавать благоприятные возможности такого развития.

На этих предпосылках основывались наши последующие разработки и, в частности, система с ЭВМ «Саратов» (класс PDP-8) "on line". Восстановление спектров с малыми разрешениями происходило в реальном времени с выводом их на экран осциллоскопа. Это давало возможность экспериментатору, контролируя ход эксперимента, прекращать работу при повышении уровня шума в спектрограмме выше допустимого [7]. Эта же ЭВМ использовалась и для обеспечения автоматизированного эксперимента по исследованию электрофизических свойств полупроводников [8].

Более высокому уровню организации автоматизированных систем — диалоговому режиму — соответствует система, реализованная на базе УВК М-400 [9, 10].

Основное отличие разработанной нами системы (рис. 3) от известных [4] состоит в том, что экспериментатор, пользуясь рекомендациями, выдаваемыми ЭВМ после обработки данных, полученных при экспресс-анализе исследуемого излучения, выбирает в диалоге с ЭВМ оптимальные условия проведения эксперимента, которые далее контролируются с помощью ЭВМ. Для этого осуществлено машинное управление шаговым двигателем сервопривода (выбор числа и размера шагов), усилителем низкой частоты (УНЧ) с синхронным детектором (СД) (управление коэффициентом усиления и постоянной времени) и цифровым вольтметром (ЦВ) (управление частотой выборок и интервалами между выборками). Система создана совместно с СКБ ИРЭ АН СССР и ИНЭУМ.

Как уже говорилось, особенность применения метода фурье-спекроскопии в миллиметровой, субмиллиметровой и длинноволновой областях спектра состоит в том, что измерения ведутся при очень малых уровнях энергии. В соответствии с этим улучшение любого из трех параметров исследуемого спектра: интервала исследуемых частот, разрешения и отношения сигнала к шуму — связано с увеличением времени накопления сигнала в каждой точке выборки интерферограммы. Большая длительность эксперимента непременно требует оценки параметров эксперимента, если не до начала его, то хотя бы на раннем этапе. В зависимости от конкретных целей эксперимента и условий его проведения параметры спектра и возможное время ведения опыта широко меняются. Во всех описанных в литературе системах они задаются на основании априорных предпосылок перед началом эксперимента. Это может привести к ошибкам, отражающимся на качестве результатов и ведущим в конечном счете к нерациональным тратам времени экспериментатора.

На рис. 4 приведена блок-схема эксперимента, на которой для удобства дальнейшего изложения эксперимент представлен четырьмя этапами: этапом оценки с помощью ЭВМ условий эксперимента (определение отношения сигнала к шуму в интерферограмме и диапазона исследуемых частот) 1; этапом выбора оптимального соотношения взаимосвязанных параметров эксперимента: разрешения, отношения сигнала к шуму в спектре и времени регистрации интерферограммы 2; этапом регистрации обзорной интерферограммы (до 256 точек выборки) с получением соответствующего спектра и отображением его на экране осциллоскопа в реальном времени 3; этапом дальнейшей обработки, на котором в зависимости от поставленной задачи может быть либо продолжена регистрация интерферограммы с последующей ее обработкой в режиме "off line", либо же осуществлено накопление спектров с не-

большим разрешением, получение отношений таких спектров и их документирования 4.

Каждый этап реализован в форме диалога. В качестве аппаратных средств диалога используются устройства ввода-вывода символьной информации (УВВ) — алфавитно-цифровой дисплей (АЦД) и пишущая машинка (ПМ). Общение экспериментатора с ЭВМ организовано посредством вводимых с клавиатуры команд.

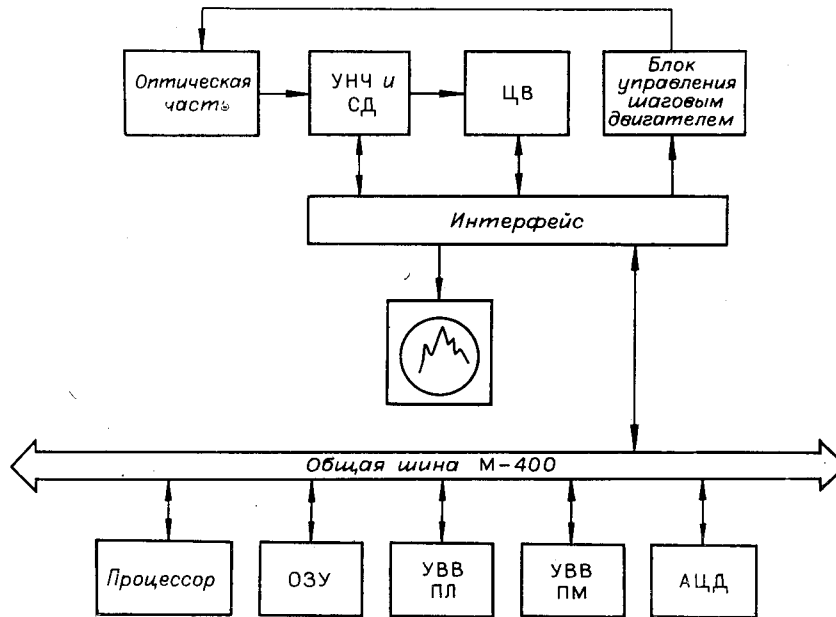


Рис. 3. Блок-схема системы автоматизации исследований на фурье-спектрометре с использованием УВК М-400 в режиме "on line".

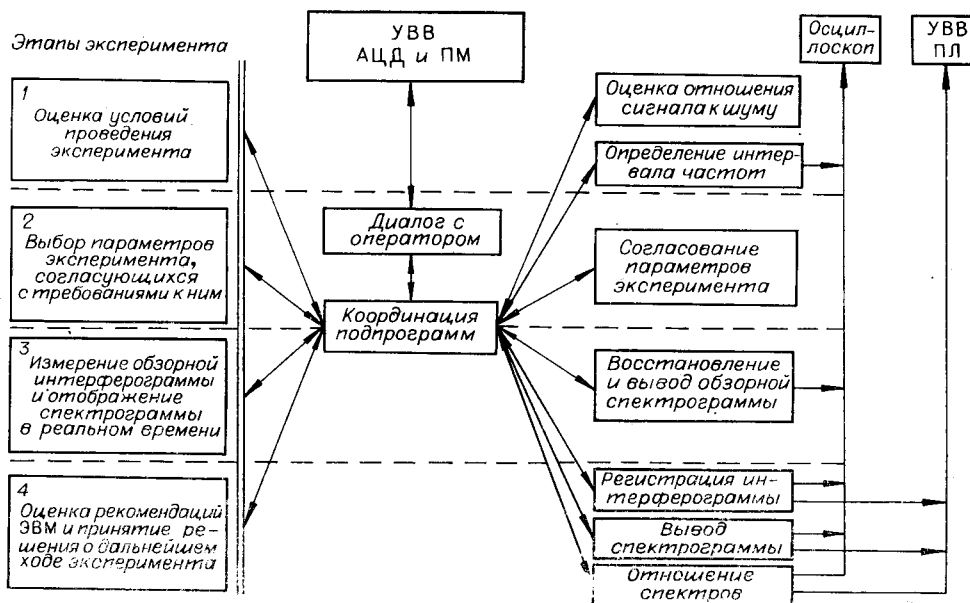


Рис. 4. Блок-схема автоматизированного спектрального эксперимента.

Программные средства диалога распадаются на две части: подпрограмму, ведущую диалог, которая принимает, анализирует и выполняет отдельные команды экспериментатора, и подпрограммы, выполняющие функции операционной системы (координация подпрограмм), позволяющие экспериментатору вмешиваться в ход обработки команд.

Подпрограмма, ведущая диалог (рис. 5), принимает команду, состоящую из кода команды и набора аргументов, разделенных запятыми. Так, полный текст команды на восстановление спектра имеет вид (рис. 6)

$S_p, m, n, t,$

где S_p — код операции; m — число точек интерферограммы; n — число измерений в точке; t — признак необходимости перфорации. Вместо пропущенных значений подставляются значения, использовавшиеся в предшествующем эксперименте или полученные на этапе согласования параметров.

По коду команды определяется подпрограмма, выполняющая принятую команду, а введенные аргументы передаются этой подпрограмме. Для повышения гибкости обеспечена возможность пропуска ранее введенных аргументов с восстановлением их соответствующей подпрограммой. Предусмотрена возможность исправления вводимой информации до ввода признака конца команды.

Такая реализация диалога дает экспериментатору эффективные средства контроля вводимых им команд и обеспечивает определенное удобство диалога (в пределах, допустимых вычислительными ресурсами данной ЭВМ).

В число имеющихся в настоящее время подпрограмм входят: подпрограмма определения реально имеющего место интервала частот исследуемого излучения в пределах всего доступного диапазона (см.

рис. 6); подпрограмма оценки отношения сигнала к шуму в интерферограмме (рис. 7); подпрограмма оценки времени проведения эксперимента и согласования требований к точности и разрешению с ограничениями по времени и с учетом отношения сигнала к шуму (рис. 8); подпрограмма регистрации интерферограммы с восстановлением и отображением получаемого спектра в реальном времени (рис. 9); подпрограмма вывода интерферограммы или спектра на перфоленду; подпрограмма деления спектра на эталонный.

Программное обеспечение написано на ассемблере, занимает 4К слов памяти и имеет модульную структуру. Кроме описанных выше подпрограмм, программное обеспечение включает в себя ряд служебных подпрограмм (преобразование форматов, арифметические действия с плавающей запятой и т. д.), входящих в перфоленточное обеспечение

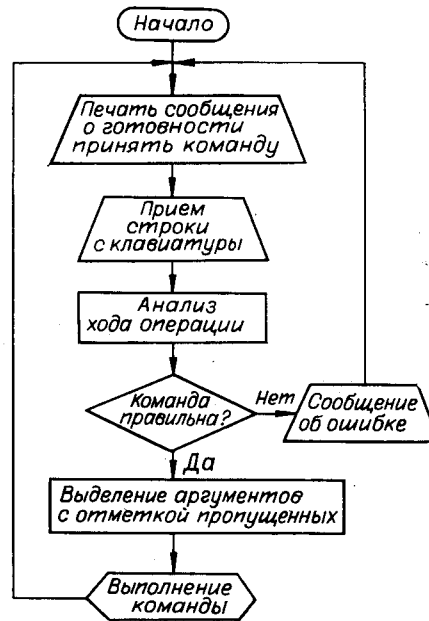


Рис. 5. Блок-схема подпрограммы диалога с оператором.



Рис. 6. Блок-схема подпрограммы определения интервала частот.

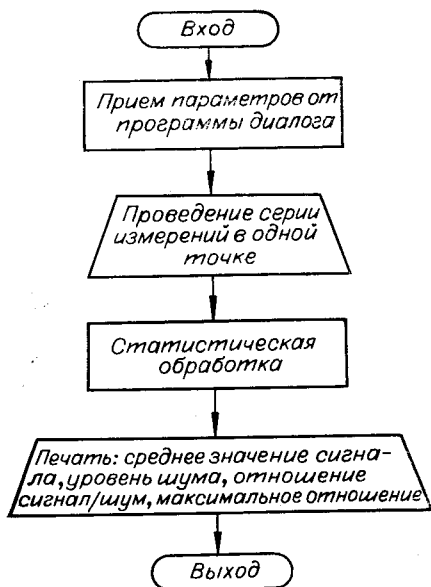


Рис. 7. Блок-схема подпрограммы оценки отношения сигнала к шуму.

Созданная система позволяет в значительной степени освободить экспериментатора от нетворческих, рутинных операций и гарантирует требуемое качество многочасового, порой уникального эксперимента. Система с успехом может использоваться и для автоматизации исследований на классических, дифракционных спектрометрах.

Возможность такого широкого применения дает основание для разработки типовой системы автоматизации оптических спектральных исследований на базе новейшей отечественной мини-ЭВМ СМ-3 с ориентацией аппаратурного и математического обеспечения на стандарт САМАС. Использование известных преимуществ стандарта САМАС позволило создать машинно-независимый комплекс аппаратурного и математического обеспечения оптического спектрального эксперимента, осуществив за счет определенной избыточности высокие адаптационные свойства системы. Немаловажным достоинством стандарта САМАС являются и его «кооперационные» возможности — возможности использования при создании систем как технологического опыта, так и самих разработок различных производственных объединений, что позволяет значи-

ЭВМ М-400 [11]. Вся работа с внешними устройствами ведется в режиме с прерываниями, что позволяет совместить операции обмена и обработки данных.

Регистрация интерферограмм осуществляется с постоянной относительной ошибкой измерения [12]. Как показано в работе [13], при этом имеют место минимальные искажения в восстанавливаемом спектре. Кроме того, этот способ регистрации оказывается полезным при восстановлении спектрограмм в реальном времени, так как в этом случае основной вклад шумов становится доступным для контроля уже на начальном этапе работы. Для реализации этой методики необходимо избавиться от постоянной составляющей интерферограммы на входе низкочастотного тракта. В нашей разработке это осуществлено посредством введения фазовой (или внутренней) модуляции потока излучения [14, 15].

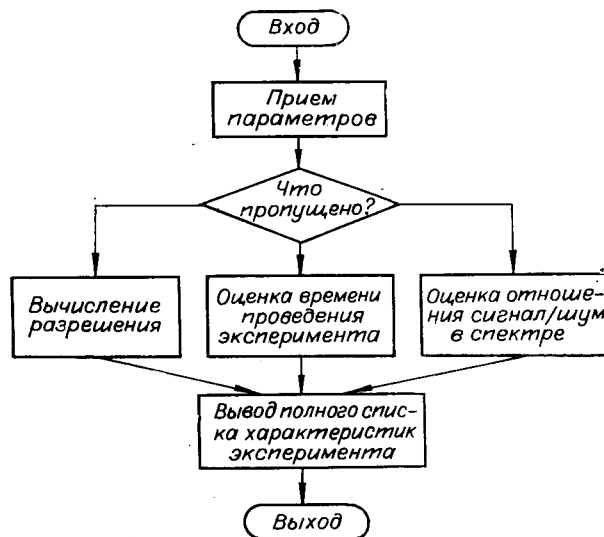


Рис. 8. Блок-схема подпрограммы согласования параметров эксперимента.

тельно сокращать сроки создания и модернизации систем.

В настоящее время эта система, также созданная совместно с СКБ ИРЭ АН СССР и ИНЭУМ, проходит лабораторные испытания. Система состоит из (рис. 10): 1) ЭВМ СМ-3, в комплект которой входят встроенный процессор, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), устройство ввода-вывода перфолент, алфавитно-цифровой дисплей, устройство широкой печати и встроенный магнитный диск с блоком управления; 2) системного математического обеспечения; 3) аппаратуры САМАС, включающей в себя крейт-контроллер к СМ-3, индикатор магистрали, ручной регистр, модуль управления цифровым вольтметром, цифроаналоговые преобразователи для планшетного графопостроителя и осциллоскопа, синхронизатор, входной и выходной регистры для управления коэффициентом усиления и постоянной времени аналогового тракта, модуль управления шаговым двигателем (ШД), десятичный счетчик с индикацией и аларм-регистр для контроля сбоя аппаратуры; 4) внешних устройств — усилителя низкой частоты и синхронного детектора с блоком управления от ЭВМ коэффи-

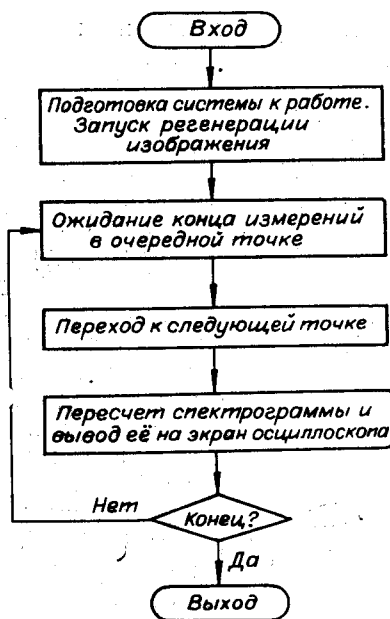


Рис. 9. Блок-схема подпрограммы восстановления и вывода обзорной спектрограммы.

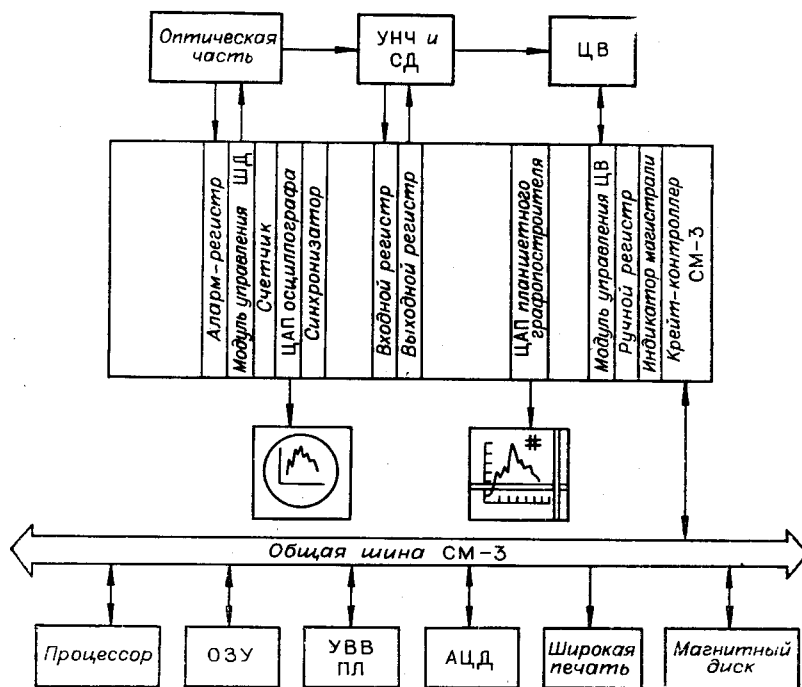


Рис. 10. Блок-схема системы автоматизации исследований на фурье-спектрометре на базе ЭВМ СМ-3 и аппаратуры САМАС.

циентом усиления и постоянной времени, цифрового вольтметра, осциллоскопа и планшетного графопостроителя. Система позволяет управлять оптико-механической частью спектрометра, выбирать коэффициент усиления и постоянную времени аналогового тракта, в диалоговом режиме определять параметры эксперимента на основе экспресс-анализа исследуемого излучения, производить сбор, накопление и обработку данных в реальном масштабе времени и выводить результаты обработки в графической и табличной формах.

ВЫВОДЫ

1. Разработан ряд систем автоматизации исследований на фурье-спектрометрах длинноволновой инфракрасной области спектра, ориентированных на использование их в научно-исследовательских лабораториях и соответствующих разным уровням автоматизации. Высший уровень представлен системой с диалоговым режимом взаимодействия экспериментатора и ЭВМ.

2. Завершающим этапом разработок является система на базе ЭВМ СМ-3 и аппаратуры САМАС, пригодная для автоматизации широкого круга оптических спектральных экспериментов и обладающая большими возможностями для развития.

3. Использование системы позволит существенно снизить нерациональные затраты времени и значительно повысить точность результатов исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Введенский Б. А., Колосов М. А., Соколов А. В. Исследования распространения метровых, дециметровых, сантиметровых и субмиллиметровых радиоволн.— «Радиотехника и электроника», 1976, т. XII, № 11, с. 1867—1890.
2. Ирисова Н. А. Новая метрика субмиллиметровых волн.— «Вестник Академии наук», 1968, № 10, с. 63—71; Ирисова Н. А. Автоматический субмиллиметровый спектрометр сверхвысокого разрешения.— «Электрон. техника, сер. 11», 1971, вып. 3 (24), с. 83—87; Быстров В. П., Ирисова Н. А., Козлов Г. В., Куценко А. В., Полосьянц Б. А., Терехин С. А. Автоматический субмиллиметровый монохроматический спектрометр.— «Электрон. техника, сер. 1», 1975, вып. 11, с. 83—89; Быстров В. П., Волков Н. А., Ирисова Н. А., Козлов Г. В., Прохоров А. М., Чернышев И. М. Исследование материалов с электрооптическими свойствами в субмиллиметровом диапазоне.— «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1977, т. 41, № 3, с. 485—492.
3. Гершензон Е. М., Гольцман Г. Н., Птицына Г. Н. Субмиллиметровая спектроскопия полупроводников.— «ЖЭТФ», 1973, т. 64, с. 587—601.
4. Белл Р. Дж. Введение в фурье-спектроскопию. М., «Мир», 1975.
5. Vystavkin A. N., Kolesov Yu. U., Listvin V. N., Smirnov A. Ya. Submillimeter spectroradiometers with n — In Sb detectors.— «IEEE Trans. on MTT», 1974, vol. MTT-22, p. 1041—1046.
6. Варданян А. С., Выставкин А. Н., Исхаков И. А., Колесов Ю. И., Листвин В. Н., Смирнов А. Я., Соколов А. В., Сухонин Е. В. Наблюдение субмиллиметрового излучения Солнца на уровне моря с помощью фурье-спектрометра.— «Астр. журн. АН СССР», 1973, т. 50, вып. 3, с. 657—659.
7. Бойко Л. Л., Лозюк В. С., Моренков А. Д., Олейников А. Я., Смирнов А. Я. Система автоматизации экспериментов по исследованию электрофизических и оптических (спектральных) свойств полупроводников с ЭВМ «Саратов» «на линии».— В кн.: Системы автоматизации научных исследований. (Тезисы докладов Всесоюзного совещания.) Рига, «Зинатне», 1975, с. 207—209.
8. Загородний С. Ф., Лозюк В. С., Моренков А. Д., Олейников А. Я. Автоматизация исследований свойств полупроводников на основе измерения гальваномангнитных коэффициентов.— «Упр. системы и машины», 1976, № 3, с. 90—94.
9. Листвин В. Н., Олейников А. Я., Панкрац Е. В., Смирнов А. Я., Страхов В. А., Тимофеев В. А. Автоматизированный фурье-спектрометр субмиллиметрового диапазона.— «ПТЭ», 1975, № 6, с. 296.
10. Олейников А. Я., Панкрац Е. В., Смирнов А. Я., Тимофеев В. А. Диалоговая система для спектральных исследований на основе УВК М-400.— В кн.: Системы автоматиза-

- ции научных исследований. (Тезисы докладов Всесоюзного совещания.) Рига, «Зинатне», 1975, с. 343—346.
11. **Мячев А. А.** Структура, программное обеспечение управляющего вычислительного комплекса М-400 и возможности его использования в системах автоматизации научных исследований.— В кн.: Материалы VII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований. Л., 1974, с. 175—185.
 12. **Листвин В. Н., Олейников А. Я., Панкрац Е. В., Смирнов А. Я., Соколовский А. А., Страхов В. А., Потапов В. Т., Игнатов Б. Г.** Фурье-спектрометр.— Авт. свид-во, № 530196, Б. И., 1976, № 36.
 13. **Волкова В. П., Горбунов Г. Г., Паршин П. Ф.** Влияние точности снятия отсчетов с интерферограммы на вид аппаратной функции фурье-спектрометра.— «ЖПС», 1972, т. XXVII, вып. 6, с. 1108—1111.
 14. **Майар Ж.-П.** Применение фурье-спектроскопии в ближней инфракрасной области к астрономическим проблемам.— В кн.: Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения. Под ред. Г. Н. Жижина. М., «Мир», 1972, с. 128—200.
 15. **Колесов Ю. И., Листвин В. Н., Смирнов А. Я., Страхов В. А.** Об эффективности фазовой модуляции в субмиллиметровой фурье-спектроскопии.— «Радиотехника и электроника», 1975, т. XX, № 6, с. 1320—1323.

Поступила в редакцию 15 июня 1977 г.

УДК 681.3 : 531.78.2

**Г. А. ДЕМИДОВ, Г. И. КИСЕЛЕВА,
Г. А. КОЗИН, А. М. ПОЛЮДОВА**

(Бийск)

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭВМ «ЭЛЕКТРОНИКА-100»

Появление мини-ЭВМ позволило по-новому подойти к автоматизации эксперимента и сделало ее по-настоящему эффективной. Однако практическое применение таких машин представляет непростую задачу. В частности, необходимо распределить функции между ЭВМ и специализированным оборудованием, максимально использовать возможности процессора, тщательно выбирать алгоритмы обработки и т. д.

В данной работе приведены результаты создания автоматизированной системы обработки измерительных сигналов с датчиков давления от нескольких экспериментальных установок (ЭУ). Двенадцатиразрядная мини-ЭВМ «Электроника-100», входящая в систему, снабжена памятью 8К, стандартным комплектом устройств ввода-вывода (печать, перфоратор, фотосчитыватель) и встроенным 10-разрядным аналого-цифровым преобразователем.

Необходимо было решить задачу использования этой ЭВМ при обслуживании четырех однотипных экспериментальных установок, порядком работы которых можно управлять. На каждой ЭУ в течение рабочей смены проводится до 50 экспериментов.

В системе необходимо выполнять следующие работы:

- ввести задание на обработку, содержащее исходные данные для расчетов и комментариев, общим объемом до 30 знаков;
- запустить ЭУ, информативность которой составляет порядка $20 \div 200$ цифровых отсчетов при скорости поступления $4 \div 7$ отсч./с;
- выполнить первичную обработку измерений, обеспечив при этом возможность обработки измерений по двум различным методикам;
- осуществить вторичную статистическую обработку по группам экспериментов.