

12. Маричев В. Н. Высотное зондирование водяного пара атмосферы мощным перестраиваемым лазером на рубине.— В кн.: Зондирование физико-химических параметров атмосферы с использованием мощных лазеров. Томск: ИОА СО АН СССР, 1979.

Поступила в редакцию 3 июня 1983 г.

УДК 681.53.08

О. Ю. ПОЛЯНСКИЙ, А. Я. ШУЛЬМАН
(Москва)

УПРАВЛЯЕМЫЙ ЭВМ РЕШЕТОЧНЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА БАЗЕ ИКС-29

В современных спектроскопических исследованиях настолько возросла сложность аппаратуры и методов обработки данных, что для получения требуемой физической информации необходимо использовать ЭВМ на всех этапах, начиная с управления измерительной аппаратурой и кончая представлением результатов. Такой подход сейчас является уже общепринятым (см., например, [1]), так что центр тяжести переносится в область выбора наилучших решений вопросов, возникающих при автоматизации спектральных исследований. Несмотря на рост числа автоматизированных спектрометров, выпускаемых промышленностью, задачи сопряжения имеющихся неавтоматизированных спектрометров с ЭВМ или модификации (с целью улучшения) автоматизированных промышленных спектрометров еще значительное время, по-видимому, будут оставаться актуальными и решаться силами самих потребителей [2]. Поскольку методы решения задач автоматизации, применяемые крупными производителями спектральной аппаратуры, не всегда могут быть перенесены в лабораторные условия, то становятся необходимыми обмен информацией и систематизация накопленного в этой области опыта. В настоящей работе описывается схема подключения распространенного промышленного двухлучевого решеточного спектрометра ИКС-29 (рабочий диапазон $400-4200 \text{ см}^{-1}$) к мини-ЭВМ в режиме «in line». При этом были расширены функциональные возможности спектрометра и автоматизированы процессы измерения, сбора, хранения, обработки и представления данных. Кроме того, реализовано также управление от ЭВМ поворотом дифракционной решетки, величиной щелей и сменными фильтрующими элементами оптического тракта.

Одной из существенных особенностей разработки системы автоматизации с управлением процессом измерений является необходимость серьезного системного анализа проблемы (достижимая степень автоматизации эксперимента, распределение управляющих и информационных связей в треугольнике «человек — ЭВМ — экспериментальная аппаратура» и т. п.), а также использование системных методов программирования при конструировании и тестировании программ (например, учет временных соотношений между периодами активности различных элементов системы, планирование реакции на отказы аппаратуры или неправильные действия оператора и т. д.).

Следует отметить, что целью работы было не просто создание автономного автоматизированного прибора, а автоматизация спектрометра ИКС-29 в рамках многоэкспериментальной лабораторной системы автоматизации на базе ЭВМ типа персонального компьютера. Такой подход позволяет унифицировать техническое и программное обеспечение, используемое в автоматизированных измерительных комплексах, сокращает время на автоматизацию новых экспериментов и расширяет возможности мо-

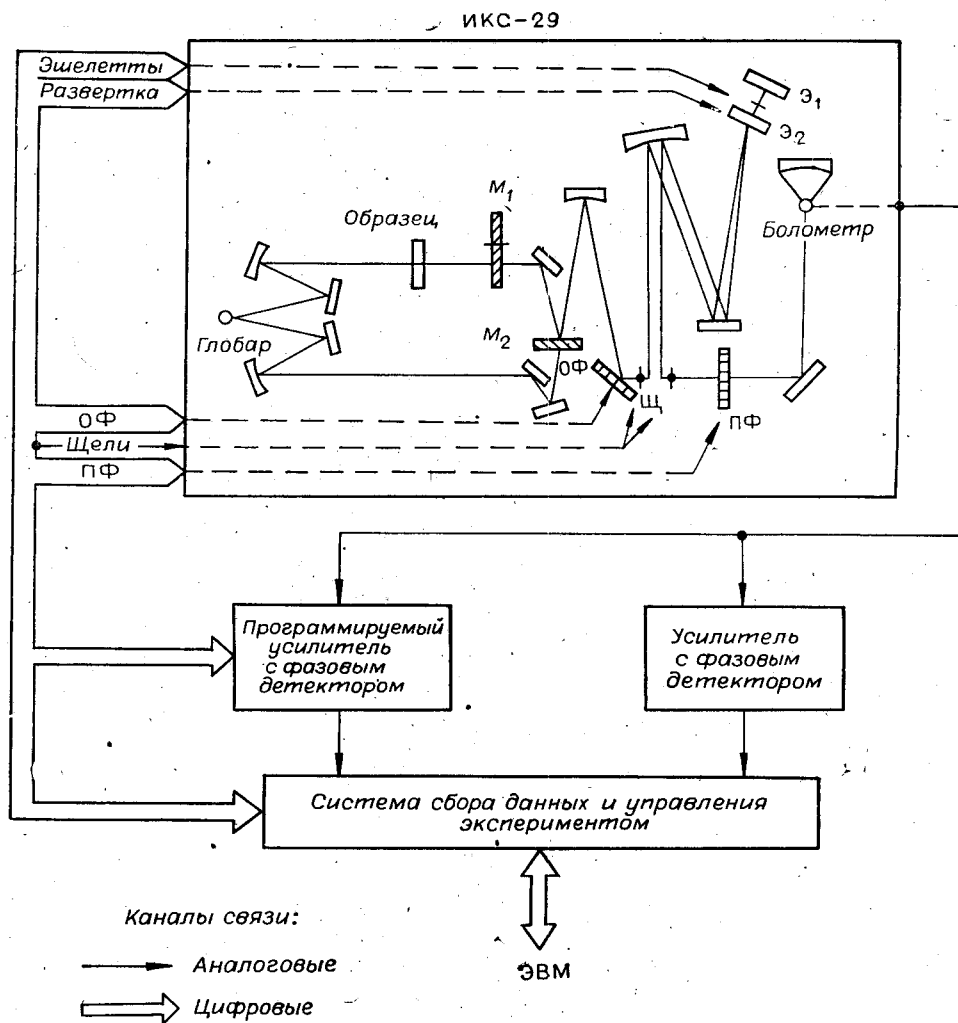


Рис. 1.

дификации программ, в том числе программ обработки данных, в связи с изменением текущих задач исследования (подробнее см. [3—8]).

Структура и технические средства. Блок-схема автоматизированного решеточного спектрометра на базе ИКС-29 приведена на рис. 1. В системе используется мини-ЭВМ WANG-2200VP с ОЗУ емкостью 64 Кбайт, которая представляет собой одноязычную машину со встроенным алгоритмическим языком БЭЙСИК-2 (расширенный вариант языка БЭЙСИК). Это расширение включает в себя операции с матрицами, операторы поиска и сортировки массивов, логические функции от символьных переменных, операторы преобразования данных из цифровой в символьную форму и обратно, развитую структуру команд ввода-вывода для управления 8-битовым параллельным интерфейсом связи с нестандартной периферией. Указанные особенности языка и его интерпретативный характер оказались полезны при разработке, отладке и сопровождении программного обеспечения для задач реального времени, ориентированных на интерактивный характер общения оператора с ЭВМ, что требует большого объема работы с текстовой информацией, таблицами, массивами данных и с разнообразными нестандартными внешними устройствами.

В состав системы автоматизации входят следующие устройства стандартной периферии: матричное печатающее устройство, планшетный графопостроитель, внешняя память на гибких магнитных (2 × 256 Кбайт)

дисках и на дисках $2 \times 2,5$ Мбайт. Связь центрального процессора с измерительной аппаратурой осуществляется через 8-битовый параллельный интерфейс ввода-вывода и устройство сопряжения [9, 10]. Интегрирование средств программного управления работой параллельного интерфейса ввода-вывода в языке БЭЙСИК-2 значительно облегчает написание, отладку и модификацию программ управления спектрометром.

Модернизация спектрометра ИКС-29. *Оптическая схема.* Решеточный спектрометр ИКС-29 представляет собой двухлучевой прибор, предназначенный для измерения спектров пропускания различных материалов с использованием метода оптической компенсации (оптического нуля). Принципиальная оптическая схема спектрометра показана на рис. 1. Для перекрытия всего рабочего диапазона служат две дифракционные решетки-эшелетты \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 , а срезание высших порядков дифракции и уменьшение рассеянного света производится соответственно пятью сменными интерференционными пропускающими (ПФ) и тремя отражающими (ОФ) фильтрами. Смена всех указанных выше элементов, а также непрерывное изменение величин щелей (Щ) по заданному закону в промышленной модели ИКС-29 осуществляется обычным программным кулачковым механизмом. Развертка спектра производится шаговым электродвигателем, который вращает решетку с помощью профилированного кулачка.

Для устранения известных недостатков метода оптического нуля (см., например, [11]) в оптическую схему спектрометра был введен второй модулятор M_1 (в дополнение к уже имевшемуся M_2) с другой частотой прерываний. Это позволило реализовать в ИКС-29 схему электрического нуля методом двухчастотной модуляции. Можно показать, что абсолютная величина коэффициента пропускания исследуемого образца в нашем случае определяется формулой

$$T = 2V_1 / (nV_2 + V_1),$$

где V_1 и V_2 — амплитуды сигналов с болометра на частотах f_1 и f_2 модуляторов M_1 и M_2 соответственно. Множитель n , учитывающий зависимость отклика детектора от частоты модуляции, для используемого в ИКС-29 болометра БМК-2 близок к величине 0,2 при частоте $f_1 = 40$ Гц, выбранной с учетом инерционности болометра ($\sim 0,1$ с). Частота f_2 в ИКС-29 всегда равна 12,5 Гц. Существенной особенностью описанной схемы двухчастотной модуляции является необходимость использования фазовых детекторов как в канале образца, так и в опорном канале (см. рис. 1).

Органы контроля и управления. К группам управляемых от ЭВМ элементов спектрометра мы отнесли шаговый двигатель, поворачивающий решетку; устройство, изменяющее размеры щелей; электродвигатели, меняющие эшелетты; отражающие и интерференционные фильтры. Основанием к такому выбору послужили следующие причины:

А. В промышленной модели ИКС-29 предусматривается только непрерывное сканирование спектра в процессе измерений, в то время как в автоматизированном эксперименте необходимо иметь возможность останавливать сканирование в произвольной точке спектра (например, для накопления сигнала в этой точке с целью подавления шумов, для ожидания обработки управляемых элементов спектрометра: фильтров, решеток и т. д.), а также изменять направление и скорость вращения решетки.

Б. Система управления раскрытием щелей в ИКС-29 ориентирована на поддержание постоянного уровня энергии по спектру. (Заметим, что эта величина меняется все же почти в 2 раза). Кроме того, более важной характеристикой, которую следует сохранять постоянной в процессе эксперимента, является спектральное разрешение (по волновым числам или по длинам волн в зависимости от поставленной задачи). Последнее требует использования такой управляющей электронной системы, которая могла бы реализовать любой необходимый экспериментатору закон изменения щелей при измерении спектра.

В. Что касается электродвигателей, отвечающих за смену фильтров и эшелеттов, то предпочтительнее управлять ими от ЭВМ с целью придания большей гибкости измерительной аппаратуре (например, для выбора какого-либо нестандартного набора сменяемых элементов в некоторых специальных случаях) и для обеспечения большей воспроизводимости спектров (в полуавтоматическом режиме недостаточная воспроизводимость связана с несовершенством механической кулачковой системы).

Таким образом, для автоматизации спектрометра требуются пять контуров управления, два из которых должны контролировать параметры, принимающие значения на ограниченном непрерывном множестве (волновое число и размер щелей), а три других — параметры, принимающие конечное число дискретных значений: от двух до шести (номера фильтров, решеток).

Для реализации перечисленных выше требований к схеме управления спектрометром от ЭВМ были произведены изменения в электрических схемах ИКС-29, созданы дополнительные цепи управления [10] и предусмотрен контроль со стороны ЭВМ за обработкой управляющих команд. Кроме того, для преобразования волнового числа в код дополнительно поставлен прецизионный однооборотный потенциометр, ось движка которого жестко связана с осью вращения профилированного кулачка, разворачивающего дифракционную решетку. Все отводы от различных точек электрических цепей спектрометра выведены на разъемы, установленные на внешней панели ИКС-29 таким образом, чтобы обеспечить возможность, замыкая места разрывов на схемах с помощью специально распаянных внешних разъемов, работать со спектрометром в автономном режиме, предусмотренном заводом-изготовителем. Аналоговые цепи и исполнительные элементы контуров управления размещены непосредственно внутри спектрометра и программируемого усилителя, а логические цепи — в специальном блоке сопряжения [10].

Программа управления спектрометром ИКС-29. Созданная для управления автоматизированным спектрометром ИКС-29 программа позволяет измерять в двухлучевом режиме спектры пропускания, отражения и фотопроводимости с использованием как встроенного болометра, так и внешнего фотоприемника. При разработке программы принимались во внимание требования простоты ее отладки и максимально возможной интерактивности. Программа имеет модульную структуру и отвечает основным принципам структурного подхода к программированию (см., например, [12]). Функциональная блок-схема программы приведена на рис. 2 (подробнее см. [13]).

Программа обеспечивает три основных режима работы спектрометра: задание таблицы исходных параметров эксперимента, ручное управление элементами спектрометра с клавиатуры ЭВМ и режим автоматизированного измерения спектра.

Перед экспериментом оператор в интерактивном режиме задает требуемые параметры спектра: границы диапазона измерений, разрешение, требуемое отношение сигнал — шум, а также характеристики измерительной аппаратуры, которая в лабораторном эксперименте часто меняется.

В режиме автоматизированного измерения спектра ЭВМ полностью контролирует ход измерений и сбор данных. Перед записью очередной точки спектра определяется вектор состояния спектрометра, вычисляется новый вектор задания (требуемые номера фильтров, эшелеттов, величина щелей и волновое число), и после сравнения этих векторов соответствующая информация о несовпадающих элементах используется для инициализации программных модулей, которые выдают команды на установку элементов спектрометра.

Компоненты вектора состояния, отвечающие дискретным изменяемым элементам-эшелеттам, фильтрам, режиму работы шагового двигателя и диапазону усилителя, определяются по состоянию соответствующих логических шин. Значения непрерывно изменяемых параметров (волнового

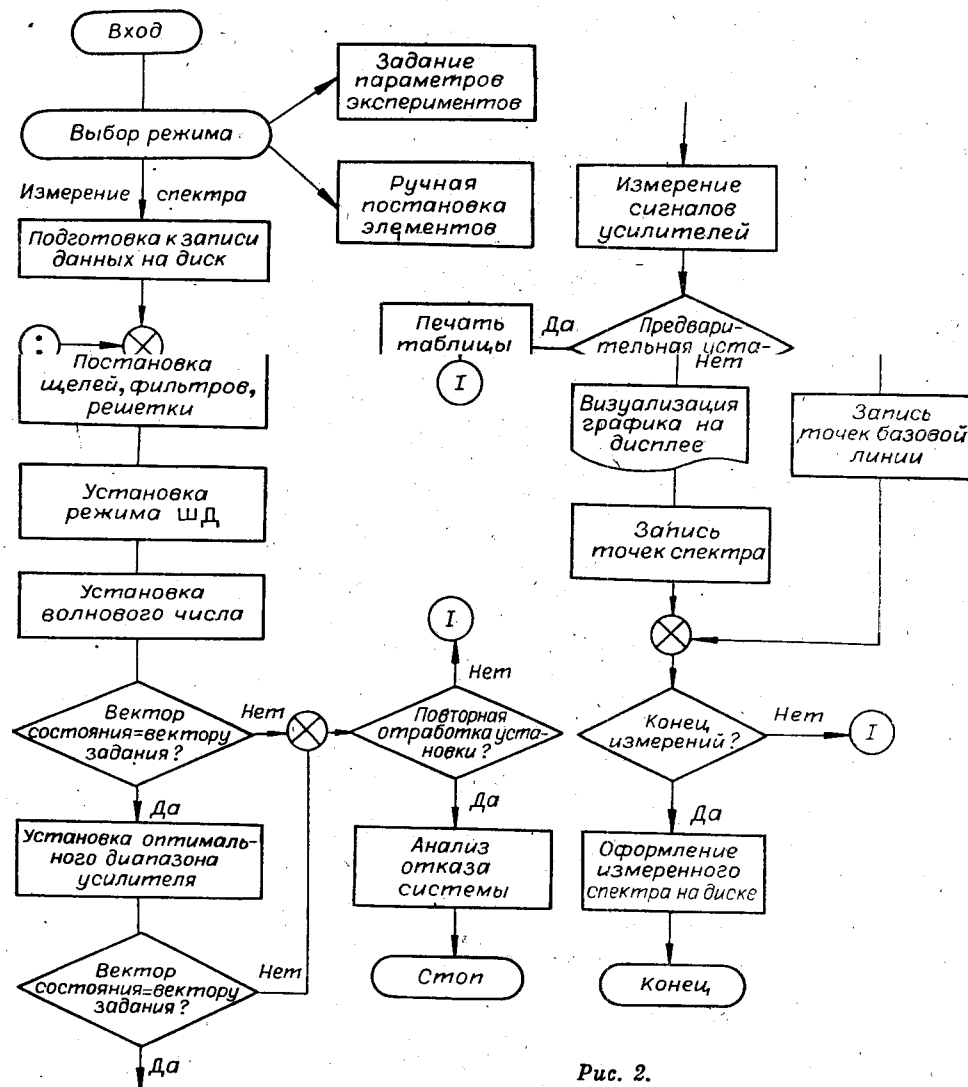


Рис. 2.

числа и величины щелей) находятся по измеренным значениям сопротивления потенциометров, механически связанных с устройствами поворота решетки и раскрытия щелей. При этом система автоматизации устанавливает значение волнового числа с точностью не хуже одной трети от заданного разрешения, а величину щелей спектрометра — в пределе $\pm 5\%$ от требуемой величины. Анализ показал, что такая величина ошибок квантования вполне приемлема для реализации заданных характеристик спектрометра.

По получении сигнала «Готово» (по шине готовности системы) проверяется правильность исполнения отданной команды: определяется истинный вектор нового состояния спектрометра и сравнивается с вектором задания (см. рис. 2). Если имела место ошибка в постановке какого-либо элемента (т. е. вектор задания не совпадает с вектором состояния), программа отдаст повторную команду, меняя при этом показание счетчика числа обращений к данному программному модулю, а в случае превы-

шения допустимого числа ошибок процесс измерения спектра прекращается и управление передается подпрограмме анализа отказов системы. Последняя выявляет характер неисправности и сообщает об этом оператору.

Непосредственно перед измерением точки спектра программа устанавливает оптимальный диапазон чувствительности усилителя, контролируя, аналогично описанному выше, обработку усилителем команд ЭВМ, а также отсутствие перегрузок и наличие опорного напряжения на синхронном детекторе. По окончании процесса установки элементов спектрометра происходит измерение очередной точки (в виде однократного отсчета или — для достижения заданного отношения сигнал/шум — как результата усреднения по множеству отсчетов), вывод ее на графический дисплей и занесение в массив данных. Полученные спектры вместе с соответствующей служебной информацией оформляются в виде файлов базы данных [6, 7] на дисковом накопителе.

В процессе измерений программа управления позволяет оператору взаимодействовать с системой в интерактивном режиме: временно прерывать проведение эксперимента без потери накопленной информации, проверять состояние элементов спектрометра или отдавать команду на досрочное окончание измерений, ограничившись только полученной до этого момента частью спектра. Объем программы около 24 Кбайт.

Экспериментальные результаты. На автоматизированном спектрометре ИКС-29 проводятся измерения спектров пропускания, отражения и фотопроводимости. Возможность измерения фотопроводимости, а также использования вместо болометра внешних (в том числе и охлаждаемых) приемников обеспечивается специальной схемой вывода излучения вне спектрометра после выходной щели. Примеры измеренных спектров представлены на рис. 3—5.

На рис. 3 приведены результаты измерений абсолютного спектра пропускания многослойного интерференционного фильтра на подложке ZnSe для области 10 мкм. На рисунке изображены: 1, 2 — сигналы с болометра, измеренные на частотах модуляторов M_1 и M_2 соответственно (произвольные единицы); 3 — абсолютный спектр пропускания фильтра, полученный в результате математической обработки кривых 1 и 2 по формуле (1). Видно, что имеющиеся на кривых 1 и 2 значительные нерегулярности, связанные с поглощением на парах воды и со сменой элементов оптического тракта, полностью устраняются из результирующего спектра 3.

На рис. 4 кривой 1 изображен интерференционный спектр пропускания тонкой пластины (толщина ~ 80 мкм) из InSb при $T = 300$ К, кривой 2 — тот же спектр, но усредненный по периоду интерференции, кривой 3 — интерференционная составляющая спектра пропускания InSb. Усреднение экспериментальных кривых по периоду интерференции, выделение интерференционной составляющей, а также сглаживание шумов производились с использованием дискретного преобразования Фурье [14, 15]. По кривым рис. 4 можно определять частотную зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости материала.

На рис. 5 показан спектр отражения полупроводниковой пластины GaAs, $n = 3,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, $T = 300$ К в области плазменного отражения. По таким спектрам определяется приповерхностная концентрация свободных носителей в этом материале, используемом, в частности, при изготовлении структур металл — полупроводник с барьером Шоттки.

Временные характеристики автоматизированного спектрометра определяются в основном чувствительностью и инерционностью используемого детектора. Последняя важна еще и потому, что в процессе измерений предложенным методом двухчастотной модуляции сигналы в двух каналах могут значительно отличаться по уровням, превышая динамический резерв фазового детектора более чувствительного усилителя. Для борьбы с этим эффектом, а также с наложением высших гармоник меандра низкочастотной модуляции f_2 на основную частоту f_1 канала образца необхо-

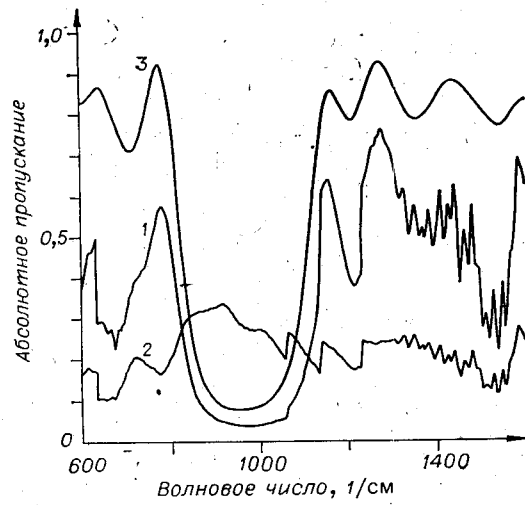


Рис. 3.

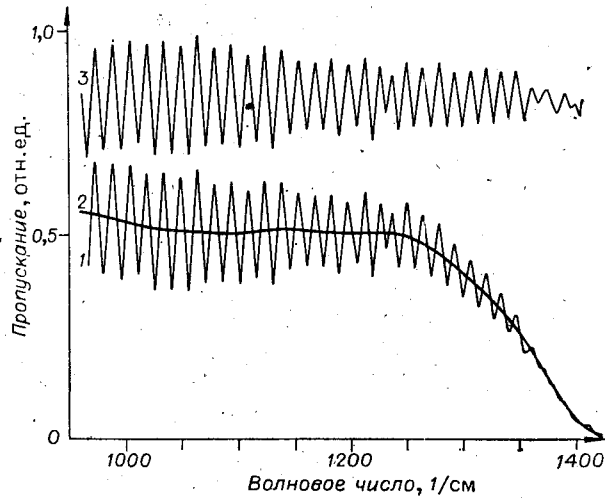


Рис. 4.

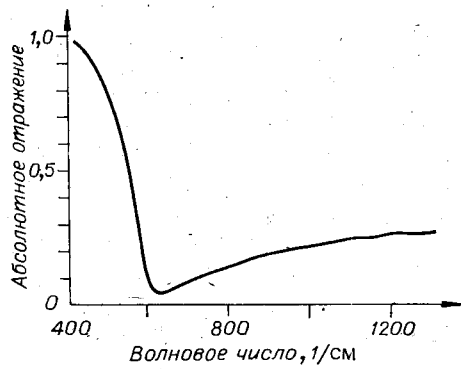


Рис. 5.

дима предварительная узкополосная фильтрация сигналов около несущей частоты каждого из каналов и увеличение времени интегрирования фазовых детекторов до нескольких периодов биений. Реально в случае болометра, стоящего в ИКС-29, эти ограничения означают затраты времени на измерение одной точки от 1 с и более. Замена болометра на более быстродействующий детектор, например пироэлектрический, позволит уменьшить предельное время измерений до 0,1—0,2 с на точку.

Заключение. Важным преимуществом разработанной схемы автоматизации спектрометра (как лабораторного исследовательского прибора) является возможность его модификации в соответствии с меняющимися задачами исследования (см., например, [4, 15]). При жестко заданных связях между регистрирующими и управляющими цепями, как это имеет место в неавтоматизированном промышленном варианте спектрометра, или при использовании для автоматизации специализированного вычислителя, как в [11], замена детектора, усилителя, изменение характера измерений, требующие внесения изменений в механические и электронные цепи управления, а также в программное обеспечение, весьма трудоемки. При программной реализации управления спектрометром с помощью универсальной ЭВМ переделываться должны только соответствующий узел спектрометра и часть управляющей программы. Последнее осуществляется относительно просто благодаря модульному построению программы и реализации ее на языке БЭИСИК. Программы же хранения, обработки и представления данных, будучи частью программного обеспечения многоэкспериментальной лабораторной системы автоматизации [5, 6], изначально не зависят от типа используемого прибора.

И, наконец, отметим, что полученные в этой работе результаты могут быть полезны при автоматизации других приборов аналогичного класса (с использованием, например, ЭКВМ «Искра-226») силами небольшой исследовательской лаборатории без привлечения значительного числа программистов и инженеров по электронике.

Выражаем благодарность В. В. Романовцеву за разработку логической схемы блока сопряжения и содействие в его изготовлении. Мы признательны также Т. М. Лифшицу за многочисленные обсуждения и поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белянкин В. Б. Некоторые тенденции развития оптического спектрального приборостроения.— В кн.: Современные тенденции в технике спектроскопии/Под ред. чл.-кор. АН СССР С. Г. Раутиана. Новосибирск: Наука, 1982.
2. Раутиан С. Г. Предисловие редактора.— Там же, с. 3—6.
3. Дивин Ю. Я. и др. Лабораторная диалоговая система автоматизации спектральных измерений.— В кн.: Диалоговые системы. Рига: Зинатне, 1978, вып. 2.
4. Полянский О. Ю., Шульман А. Я., Романовцев В. В. Структура и технические средства лабораторной системы автоматизации спектральных исследований.— М., 1982. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 6 (333)).
5. Полянский О. Ю., Шульман А. Я. Программное обеспечение лабораторной системы автоматизации спектральных исследований.— М., 1982. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 7 (334)).
6. Полянский О. Ю., Шульман А. Я. Программное обеспечение диалоговой системы автоматизации спектральных исследований.— В кн.: Тезисы докл. 2-й Всесоюз. конф. «Диалог-82». Л.: ЛИАП, 1982, ч. 1.
7. Полянский О. Ю., Шульман А. Я. Описание системных программ лабораторной системы автоматизации спектральных исследований.— М., 1982. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 8 (335)).
8. Полянский О. Ю. Исследование и разработка методики автоматизированных спектроскопических экспериментов в физике твердого тела: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук.— М.: ИРЭ АН СССР, 1982.
9. Полянский О. Ю., Шульман А. Я. Управляемый ЭВМ решеточный спектрометр на базе ИКС-29.— В кн.: Тез. докл. на 6-й Всесоюз. конф. по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1981.
10. Полянский О. Ю., Шульман А. Я., Романовцев В. В. Управляемый ЭВМ решеточный спектрометр на базе ИКС-29.— М., 1982. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 9 (336)).

11. Виноградов Е. А., Жижин Г. Н., Иванов И. А., Любезников О. А. Спектрофотометр на базе однолучевого ИК-спектрометра и вычислителя.— В кн.: Новые методы спектроскопии/Под ред. чл.-кор. АН СССР С. Г. Раутиана. Новосибирск: Наука, 1982.
12. Хьюз Дж., Митчом Дж. Структурный подход к программированию: Пер. с англ. под ред. В. Ш. Кауфмана.— М.: Мир, 1980.
13. Полянский О. Ю., Шульман А. Я. Программа управления автоматизированным решеточным спектрометром на базе ИКС-29.— М., 1982. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 10 (337)).
14. Лифшиц Т. М., Ормонт А. Б., Чиркова Е. Г., Шульман А. Я. Оптическое пропускание полупроводникового твердого раствора $Bi_{1-x}Sb_x$.— ЖЭТФ, 1977, т. 72, с. 1130—1139.
15. Лифшиц Т. М., Ормонт А. Б., Чиркова Е. Г., Шульман А. Я. Оптические свойства $Bi_{1-x}Sb_x$.— М., 1977. (Препринт АН СССР, ИРЭ; № 4 (227)).

*Поступила в редакцию 27 августа 1981 г.;
окончательный вариант — 14 мая 1982 г.*
