

достаточно мощный инструмент оперативной модификации функциональных возможностей системы без необходимости редактирования текста описания системы и повторения процедуры генерации;

реализация достаточно полного, специализированного пакета программных модулей, ориентированных на обслуживание экспериментов данного класса, создание общей логической структуры системы, наличие средств адаптации системы к изменениям методики и условий проведения исследований позволяют рассматривать разработанную систему в качестве типовой для микроэлектродных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е. и др. Организация систем автоматизации научных исследований (проблемы, методы, перспективы).— Автометрия, 1974, № 4.
2. КАМАК-системы автоматизации в экспериментальной биологии и медицине/Под ред. Ю. Е. Нестерихина.— Новосибирск: Наука, 1978.
3. Талыкин Э. А. Модульное программирование в задачах сбора и обработки экспериментальных данных.— Автометрия, 1976, № 1.
4. Гласс Р., Наузо Р. Сопровождение программного обеспечения.— М.: Мир, 1983.
5. RT-11. System Reference Manual (DEC-11-ORUGA-C-D).— DEC, Maynard, Massachusetts, 1975.
6. Балуха Г. и др. Комплекс средств для генерации прикладных систем автоматизации накопления и предварительной обработки данных — САНПО.— Дубна, 1980. (Препринт/АН СССР, ОИЯИ; № P10-12960).
7. Саламатин И. М., Штарк М. Б., Яновский Г. Я. Генерация программного обеспечения для медико-биологических экспериментов с использованием мини-ЭВМ типа СМ-3 и оборудования КАМАК.— Автометрия, 1981, № 4.
8. RT-11 Software Support Manual (DEC-ORUGA-B-D).— DEC, Maynard, Massachusetts, 1975.

Поступила в редакцию 9 марта 1984 г.

УДК 681.3

**Ф. А. ЖУРАВЕЛЬ, З. Б. КРУГЛЯК, С. Н. ЛУКАЩУК, В. С. ЛЬВОВ,
А. А. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ, В. В. САВЕЛЬЕВ, В. Б. ЧЕРЕПАНОВ,
А. И. ЧЕРНЫХ, А. В. ШАФАРЕНКО**

(Новосибирск)

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА В ЖИЗНИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Немного истории: от ЭВМ «Минск-22» до М-4030. Первый опыт общения с ЭВМ у сотрудников лаборатории магнитных явлений Института автоматики и электрометрии СО АН СССР возник в 1970 г. при теоретических исследованиях волновой турбулентности в связи с необходимостью численного моделирования и расчета сложных процессов взаимодействия волн [1]. В те годы нами использовалась ЭВМ БЭСМ-6 с перфокартами на входе и длинными распечатками на выходе.

Приблизительно 10 лет назад в институте была создана экспериментальная установка для исследования ламинарно-турбулентного перехода в круговом течении Куэтта (течение жидкости между двумя коаксиальными вращающимися цилиндрами). В соответствии с существовавшими в то время представлениями о механизме зарождения турбулентности необходимо было с высоким разрешением по частоте определять спектр движения жидкости и корреляционные функции, что оказалось далеко за пределами возможностей аналоговых методов спектрального анализа. Поэтому задуманный эксперимент немалым образом зависит от использования ЭВМ и систем автоматизации.

Первая попытка выполнить автоматизированный сбор экспериментальных данных предпринята на ЭВМ «Минск-22Т» (для чего пришлось прошивать дополнительные команды). Бесперспективность такого подхода

стала очевидной с появлением нового семейства управляющих ЭВМ и началом освоения отечественных магистрально-модульных систем КАМАК.

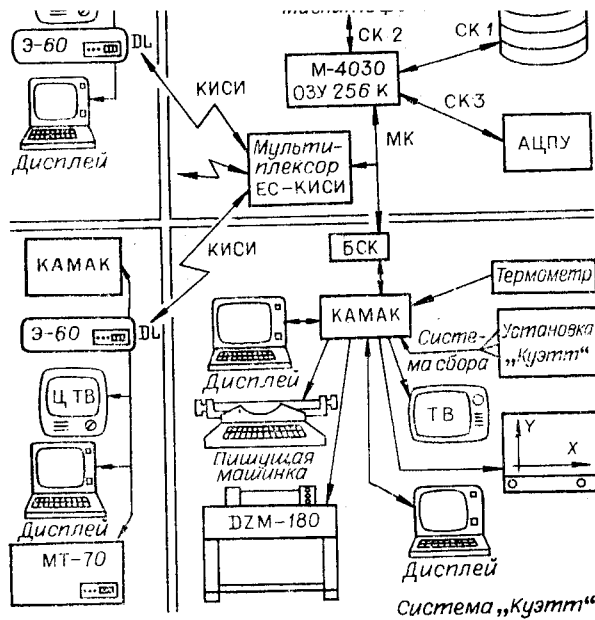
Следующий этап автоматизации этих исследований базировался на мини-ЭВМ М-400, а связь с экспериментальной установкой осуществлялась через КАМАК-крейт. Сигнал лазерного доплеровского измерителя, пропорциональный скорости жидкости в точке в данный момент времени, преобразовывался под управлением ЭВМ системой КАМАК-счетчиков в цифровой, и порядка одной тысячи отсчетов вводилось в оперативную память. Далее проводилось преобразование Фурье и результат выводился через одноканальный цифроаналоговый преобразователь на самописец с линейной разверткой.

Однако вскоре стало ясно, что такой уровень автоматизации совершенно неудовлетворителен по целому ряду причин. Прежде всего, отсутствие внешней памяти и, как следствие, примитивность перфоленточной операционной системы не позволяли с желаемой оперативностью варьировать программное обеспечение и расширять возможности системы. Отсутствие аппарата арифметики с плавающей точкой и программирование на уровне Ассемблера существенно затрудняли реализацию обработки сигналов. Далее, поскольку характерные времена накопления одной записи сигнала (одного режима) и его обработки оказались соизмеримы и составляли приблизительно час, то для экономии времени эксперимента возникла необходимость параллельного выполнения этих процессов. Эксперимент же состоял в анализе значительного числа различных режимов, и часто возникала острая необходимость готовить новые программы обработки данных, не прерывая эксперимента. Создание такой многозадачной операционной системы выходило за рамки компетенции и возможностей физиков лаборатории.

Избавиться от этих трудностей можно было единственным образом — перейти на более мощную ЭВМ с развитой операционной системой и значительной внешней памятью. Из имевшихся тогда в институте вычислительных машин наиболее приемлемым оказался вариант с ЭВМ М-4030 с дисковой операционной системой (ДОС АСВТ). Вопрос о подсоединении к такой машине нестандартного оборудования экспериментаторов успешно решался путем создания КАМАК-контроллера к мультиплексному каналу [2]. Однако возникла проблема эффективного управления КАМАК-оборудованием, заключавшаяся в следующем. Устройство каналов М-4030 (и ЭВМ ЕС) таково, что затраты процессорного времени на их запуск под контролем ДОС компенсируются лишь в том случае, если объемы пересылаемых данных велики, а алгоритм сбора имеет мало ветвлений. Предыдущая же система ввода основывалась на сложном программном обмене и управлении счетчиками КАМАК, и подобная организация при канальном доступе оказалась невыгодной. Поэтому систему ввода пришлось переделать, использовав автономный процессор доплеровского сигнала [3] и аналого-цифровой преобразователь. К счастью, стандарт КАМАК оказался достаточно простым для того, чтобы сами экспериментаторы смогли изготовить интерфейсы к своим цифровым приборам, имея горсть микросхем и плату свободного монтажа.

Построение новой системы сбора и обработки данных начиналось с подключения алфавитно-цифрового дисплея и создания подпрограмм, позволивших производить операции ввода-вывода на дисплей из программы пользователя. Следующий шаг — подключение цифрового вольтметра через самодельный интерфейс и написание подпрограммы, осуществляющей буферизованный сбор данных и их запись на магнитную ленту. Нулевой вариант системы был завершён разработкой модуля привода двухкоординатного самописца. К концу 1978 г. с ее помощью получены первые результаты [4].

Система «Куэтт»: аппаратура и программы. Современный вариант аппаратной части системы «Куэтт», работающий последние несколько лет без существенных изменений, приведен в левой нижней части рисунка. В структуре системы можно выделить три функциональные под-



дисплея «Videoton-340», блока управления частотой вращения цилиндра, генератора звуковых сигналов и индикатора магистрали.

Программная поддержка системы представляет собой пакет подпрограмм, написанный на Ассемблере ДОС АСВТ. В этом пакете также можно выделить три уровня. Подпрограммы первого уровня осуществляют такие элементарные функции, как ввод-вывод символьной и числовой информации на терминал пользователя, вывод массива точек на экран графического дисплея и самописец, программирование набора померов каналов аналогового коммутатора и частоты таймера, подача звукового сигнала и т. п.

Второй уровень программного обеспечения составляет набор сервисных подпрограмм, главная цель которых — обеспечить непосредственное взаимодействие пользователя с вычислительным процессом. В частности, пользователь может с помощью одной из управляющих клавиш дисплея остановить выполнение своей программы, просмотреть текущее значение заранее обусловленных диалоговых переменных (и при необходимости изменить любую из них), загрузить новую программу, окончить работу текущей программы или продолжить ее с одной из нескольких заранее заданных специальными операторами точек возврата. Большинство ошибок, возникающих в ходе выполнения программы пользователя (адресация, переполнение и т. п.), также анализируются сервисной подпрограммой, и управление передается на нулевую точку возврата. Такие средства поддержки терминала пользователя, личной алфавитно-цифровой печати, аппаратуры графического отображения и т. д. в операционных системах ЭВМ ЕС, ориентированных на пакетную обработку, отсутствуют. Здесь же при отладке программ они весьма эффективны и значительно повышают производительность программиста-пользователя.

Следующий уровень программного обеспечения призван обеспечить параллельность и синхронизацию процессов сбора данных, их предварительной обработки и занесения в архив. Эту задачу также пришлось решать с помощью системных программистов высокой квалификации, поскольку соответствующих средств в стандартных языках высокого уровня в ДОС АСВТ нет.

Методика разработки проблемных программ. Все создаваемые системные программы ориентированы на вызов из языков высокого уровня так, чтобы написание программ для решения конкретных проблем могло быть полностью переложено на плечи самих пользователей системы. Такой подход оказался весьма плодотворным, поскольку любой научный сотрудник физической лаборатории знаком с программированием на Фортране, а специфика своей задачи пользователю известна лучше, чем другим. Это дает возможность уделить больше внимания главной цели — решению проблемы пользователем в соответствии со своими представлениями об удобстве общения с ЭВМ. Однако опыт показал, что следует внимательнее подходить к структуре и технике управления вычислительным процессом, к форме и содержанию диалога «ЭВМ — человек». Как правило, написанная программа является главным конечным инструментом экспериментатора, который используется много раз (и не только самим автором), и комфортность и производительность работы с этим многофункциональным инструментом сильно зависят от дизайна управления.

Организация экспериментов на установке «Куэрт». Специализированная программа, предназначенная для проведения экспериментов по изучению ламинарно-турбулентного перехода в течения Куэрта, в основном использует интерактивный режим работы. Это связано с тем, что на начальной стадии изучения явления не ясны ни характер и уровни сигналов, ни их статистические характеристики, ни времена переходных процессов, происходящих при переключении единственного программно-управляемого параметра — скорости вращения цилиндра (т. е. числа Рейнольдса). Собственно задача эксперимента заключалась в изучении режимов течения при увеличении числа Рейнольдса и попытке выделить в последовательности этих режимов области с качественно различным поведением, т. е. установить сценарий ламинарно-турбулентного перехода в изучаемой системе.

Полная неопределенность хода эксперимента на этой стадии требовала постоянного присутствия экспериментатора, который действовал примерно по такой схеме: давал некоторое приращение скорости вращения и смотрел, что произойдет с потоком жидкости. Для этого сначала выбирался режим работы типа «цифровой осциллограф», при котором последовательность вводимых данных просто отображается на экран графического телевизионного дисплея, и подбиралось усиление аналогового тракта так, чтобы размах сигнала не превышал $1/3$ шкалы АЦП. Затем экспериментатор переводил программу в режим анализатора спектра, вычисляющего «текущий» спектр мощности выбранного канала (скользящее среднее по заданному числу периодogramм). После длительного всматривания в изменения структуры спектра делался вывод, что процесс достаточно стационарен и можно производить запись в архив. Тогда режим спектроанализатора прерывался, программа переводилась в режим записи данных на магнитную ленту и достаточно представительная реализация процесса (в зависимости от ситуации длиной до 0,5 млн отсчетов, или до 4 ч накопления) записывалась в архив. После этого скорость снова увеличивалась и процесс повторялся.

Архив данных и повторная обработка. Данные, записанные в архив, имеют файловую структуру, что позволяет легко находить записи давно проведенных экспериментов и осуществлять их вторичную обработку, а также многократно возвращаться к их обработке по каким-либо новым алгоритмам. Например, после первых грубых экспериментов стало ясно, что спектры сигналов содержат узкополосные компоненты и много важной информации заключено в их комплексных огибающих. Это наблюдение

потребовало реализации техники цифровой фильтрации сигналов, и ранее накопленные данные были заново переработаны. Объем данных, возникающих после фильтрации одной исходной реализации в нескольких частотных полосах, возрос настолько, что для успешного оперирования ими пришлось задействовать несколько мегабайт дисковой памяти. Изучение эволюции отфильтрованных сигналов привело к формированию нового языка описания процессов, происходящих в течении, основывающегося на представлении о движении системы по фазовой траектории в некотором пространстве измеряемых величин. Эти новые представления, в свою очередь, породили новые приемы обработки уже записанных данных, а также привели к уточнениям в методике последовавших экспериментов.

Математическое моделирование. Описанные программно-аппаратные средства позволяют применять терминальный комплекс не только для сбора, обработки и визуализации данных эксперимента, но и как мощное средство для решения чисто математических задач. Значительное ускорение решения таких задач происходит за счет возможности вмешательства оператора в ход проведения вычислений, упрощения и ускорения диалога с ЭВМ, вывода основной информации на телевизионный графический дисплей, что позволяет быстрее оценить ситуацию. Поэтому, когда была предложена теоретическая модель, описывающая развитие турбулентности в течении Куэтта, созданный комплекс позволил достаточно быстро реализовать решение динамической задачи для системы тридцати (!) дифференциальных уравнений и просмотреть различные фазовые проекции почти для тысячи наборов параметров [5]. В частности, констатировался факт качественного соответствия предложенной модели и данных эксперимента [6].

План эксперимента — в программе ЭВМ. После первых серий опытов, проведенных в существенно интерактивном режиме при непосредственном участии экспериментатора во всех стадиях процесса исследования, стало ясно, что в определенных областях чисел Рейнольдса эксперимент можно планировать и, следовательно, перевести его на программное управление. Для этого над программой сбора данных надстраивался управляющий блок, в котором была запрограммирована вся описанная последовательность операций. Указав в режиме диалога величину шага по числу Рейнольдса, время ожидания окончания переходного процесса и параметры записи в архив, экспериментатор может спокойнее заняться анализом предыдущих измерений, не отвлекаясь на рутинную работу. При этом ЭВМ контролирует скорость вращения цилиндра и температуру установки, ведет протокол эксперимента, печатая на DZM текущее время, номер записи, значения температуры и периода вращения, находит по хранящейся в памяти таблице соответствующее значение вязкости и по нему вычисляет значение числа Рейнольдса и т. п., а также индицирует звуковыми сигналами моменты перехода к новым режимам работы, позволяя экспериментатору контролировать общий процесс на слух.

Техника создания текстов. Естественно полагать, что все описанное количество программ не могло быть создано и отлажено на базе перфокарточной системы подготовки исходных текстов, которая являлась штатным средством ДЭС и где редактирование велось на уровне переключателя перфокарт. Для решения этой задачи пришлось создать редактор экранного типа, ориентированный на систему команд дисплея VT-340, с помощью которого и были написаны тексты программ общим объемом около 5 Мбайт.

Достигнутая степень автоматизации эксперимента породила желание автоматизировать и другие трудоемкие и рутинные области деятельности лаборатории. В первую очередь автоматизация коснулась процесса подготовки к печати рукописей. Обычно при подготовке статьи к печати машинистке приходится 2—3 раза перепечатывать текст, так как первые варианты сильно нуждаются в редактировании. Кроме того, один и тот же текст или его часть может после минимальной правки быть статьей, репринтом, частью обзора, отчета, диссертации, и каждый раз его при-

ходится перепечатывать. Компьютер существенно уменьшает объем работы машинистки, так как ей достаточно один раз внести текст в память ЭВМ.

К сожалению, до недавнего времени ни распространенные дисплеи, ни устройства печати не имели средств отображения строчных символов, а паучную статью, напечатанную одними прописными буквами, ни одна редакция не принимает. Поэтому пришлось заняться проблемой малых символов на имеющемся оборудовании. Для дисплея «Videoton-340» эта задача сначала решалась введением подчеркивания прописных букв, а впоследствии путем расширения ПЗУ знакогенератора обеспечивалось отображение всего русского и латинского алфавитов.

Устройства для вывода «твердой» копии текста также пришлось подвергнуть доработке. Для получения машинописной копии достаточно было заменить шрифт на одном из консольных устройств (типа «Consul-260» и более надежное VT-22104), а в быстром печатающем устройстве мозаичного типа DZM-180 удалось разработать знакогенератор, дающий вполне приемлемое изображение строчных букв.

Для распечатки текста на этих устройствах создана специальная программа — форматер. Эта программа в зависимости от заданного формата печати разбивает текст на строки и страницы, выравнивает строки по правому краю, причем при необходимости перенос части слова осуществляется в соответствии с правилами русской грамматики. Распознавая специальным образом оформленные директивы, форматер выделяет абзацы, центрирует заголовки, делает отступ слева и т. п.

Следует отметить, что смысловой текст несколько отличается по структуре от обычной программы, которая также записывается с помощью алфавита. Элементарный объект текста программы — строка, а смыслового текста — слово, предложение или абзац. Поэтому для подготовки и редактирования смысловых текстов была написана еще одна специальная программа — текстовый экраный редактор. Объектом, с которым работает этот редактор, является слово текста. При наборе текста слово, которое не входит в строку дисплея, автоматически переносится целиком на новую строку. Это позволяет увеличить скорость набора текста машинисткой, так как она не должна теперь заботиться о размещении слов в тексте и переносе слова в конце строки, а также не боится сделать опечатку (ее легко исправить). При необходимости правки текст воспроизводится на экране дисплея и обрабатывается с помощью стандартной техники экранного редактирования. После введения всех корректив и редакционных спецификаций текст готов к изготовлению машинописной копии, которую можно послать в редакцию.

Автоматизация коснулась и оргтехники лаборатории: стандартные тексты служебных записок, заявок на материалы и оборудование и т. д. хранятся в памяти компьютера, и исследователи затрачивают значительно меньше усилий на канцелярское производство, автоматизированно изготавливая необходимое количество хорошо оформленных бумаг.

Следующим шагом в совершенствовании системы подготовки текстов является автоматизация типографского набора вплоть до вписывания формул в статьи. Этого можно достичь, связав ЭВМ с фотонаборным автоматом, способным продуцировать самые разнообразные символы произвольного размера. В настоящее время в институте создана программа, управляющая фотонаборным автоматом, и проводятся первые работы с комплексом ЭВМ «Электроника-100/25» — фотонаборный автомат ФА-1000. К сожалению, этот автомат обладает рядом недостатков: ограниченным набором символов, малой скоростью печати (10 символ./с). Поэтому сейчас проводятся работы по замене ФА-1000 лазерным принтером, разработанным в институте. Это позволит воспроизводить любой типографский текст вместе с полутоновыми и цветными рисунками.

Перспектива: персональная ЭВМ на линии с ЭВМ ЕС. Универсальные ЭВМ коммерческой серии типа М-4030 или ЕС имеют довольно хорошие арифметические процессоры, но, строго говоря, не предназна-

чены для управления экспериментом. В нашем случае использование М-4030 для этой цели обусловлено историческими причинами. Такие ЭВМ являются вычислительными системами коллективного пользования, а для управления экспериментом необходимо располагать стабильным ресурсом

Современный выход из этого положения состоит в использовании персональных микрокомпьютеров типа «Электроника-60», соединенных посредством линии связи (желательно последовательного типа) с мощной стационарной ЭВМ. С одной стороны, такой подход дает возможность использовать персональный компьютер для сбора и предварительной обработки данных (для него создание и программирование нестандартной аппаратуры является намного более простым делом). С другой стороны, пользователю становятся доступными большие вычислительные ресурсы, емкая архивная память большой машины и дорогостоящие устройства отображения. Данные, собранные на таком удаленном рабочем месте, можно передать стационарной ЭВМ для сложной математической обработки и вывода результатов в наиболее удобной форме.

Структура одного из вариантов такого подхода, реализованного в лаборатории на базе ЭВМ М-4030, представлена на рисунке. Удаленные рабочие места (показаны только два из четырех действующих) подсоединяются к мультиплексному каналу через разработанный блок сопряжения, выходы которого совместимы по протоколу линии с последовательным связным интерфейсом DL-КИСИ [7]. Это дало возможность обеспечить достаточно быструю и надежную линию связи ЕС—Э-60. Разработано также соответствующее математическое обеспечение, позволяющее использовать все устройства стационарной ЭВМ при работе на персональном удаленном рабочем месте. Само рабочее место снабжается операционной системой реального времени типа RT-11, для которой линия играет роль внешней дисковой памяти.

В настоящее время ведутся работы по адаптации такого программного комплекса к среде ОС ЕС и планируется создание радиальной сети ЭВМ во главе с ЭВМ ЕС-1045 (усиленной матричным процессором) и абонентами на базе ЭВМ «Электроника-60». В разрабатываемой сети для одного эксперимента смогут работать несколько процессоров: уже сейчас некоторые удаленные ЭВМ снабжены быстрыми периферийными процессорами «Электроника-МТ/70».

ЛИТЕРАТУРА

1. Львов В. С., Захаров В. Е., Старобинец С. С., Мушер С. Л. Параллельная накачка спиновых волн в иттриевом гранате.— ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 1782.
2. Журавель Ф. А., Кругляк З. Б. Аппаратные средства управления однокрейтовой системой КАМАК от ЭВМ ЕС или УВК М-4030.— Автометрия, 1980, № 4.
3. Журавель Ф. А. и др. Методика и результаты исследования перехода к турбулентности в простых гидродинамических течениях.— Автометрия, 1982, № 3.
4. Кузнецов Е. А. и др. О проблеме перехода к турбулентности в течении Куэтта.— Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, вып. 4.
5. Черных А. И. Численное моделирование цепочки вихрей Тейлора.— Новосибирск, 1981. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАНЭ; № 147).
6. Львов В. С., Предтеченский А. А., Черных А. И. Бифуркации и хаос в системе вихрей Тейлора: натуральный и численный эксперимент.— ЖЭТФ, 1981, т. 80, вып. 3.
7. Бажан А. И. и др. Многомашинный комплекс автоматизации физического эксперимента (технические и системные средства).— В кн.: Труды Второго всесоюз. семинара по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1982.

Поступила в редакцию 21 января 1984 г.