

**ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ  
УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ В ИЯФ  
СО АН СССР ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ**

В.И.Нифонтов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

В данной работе представлен коллективный труд следующих сотрудников ИЯФ СО АН СССР: В.А.Гусева, М.Н.Захваткина, М.М.Карлинера, А.Н.Кирпотина, В.И.Кокоулина, Э.А.Купера, Б.В.Левичева, А.С.Медведко, Н.А.Мезенцева, Э.Л.Неханевича, В.И.Нифонтова, А.Д.Орешкова, Ю.И.Щепкова, Д.В.Пестрикова, Г.С.Пискунова, И.Я.Протопопова, В.А.Сидорова, Б.Н.Сухиной, В.С.Шабанова и многих других.

В Институте ядерной физики проводятся эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках. Современные ускорительно-накопительные комплексы требуют организации взаимодействия между большим количеством различных объектов, в состав которых входят устройства контроля и управления. Рабочие циклы по накоплению заряженных частиц продолжаются около часа, а эксперимент на накопленных пучках может происходить в течение суток. Столь продолжительные циклы заставляют добиваться особой надёжности систем управления и контроля, именно поэтому работы по использованию ЭВМ для этих целей в нашем Институте особенно актуальны. В настоящее время в ИЯФ полностью управляются при помощи ЭВМ три крупных ускорительно-накопительных комплекса ВЭПП-2М, НАП-М и ВЭПП-4. Все основные элементы и функциональные узлы перечисленных комплексов не имеют ручного управления.

## I. Начало работ по автоматизации управления

Работы в области автоматизации эксперимента с помощью ЭВМ в Институте начались в конце шестидесятых годов. На базе ЭВМ МИНСК-22 была создана система для приема и хранения информации, поступающей с экспериментальных установок. С помощью этой системы в 1970 г. был впервые в мире выполнен в режиме on line эксперимент на встречных пучках.

Первые опыты по применению ЭВМ МИНСК-22 для управления элементами накопительного комплекса были осуществлены в 1971 г. Объектом управления являлась система питания магнитов и линз накопителя ВЭШ-3. Осуществлялась задача регулирования токов в основных электромагнитах накопителя и в восьми квадрупольных линзах при подъеме энергии для перестройки оптики места встречи при накопленном пучке. Такой объем перестроек с нужной точностью мог быть выполнен за короткое время только с помощью управляющей ЭВМ<sup>I/</sup>.

## 2. Развитие систем управления

В Институте ядерной физики разработаны принципы построения и алгоритмы работы управляющих систем как на основе мини-ЭВМ, так и на основе ЭВМ универсального типа.

На базе мини-ЭВМ М-6000 организовано управление комплексом ВЭШ-2М.

ВЭШ-2М - ускорительно-накопительный комплекс для экспериментов со встречными электрон-позитронными пучками с энергией до 670 МэВ, обладающий самой большой в мире светимостью в этом диапазоне энергий <sup>2,3/</sup> (рис.16). Комплекс состоит из инжектора ИДУ, синхротрона Б-3М, бустерного накопителя ВЭШ-2 и жесткофокусирующего накопительного кольца ВЭШ-2М.

На комплексе ведется несколько физических программ: с 1974 г. идут эксперименты со встречными электрон-позитронными пучками; изучение радиационной поляризации электронных и позитронных пучков; эксперименты с использованием синхротронного излучения и др. Для обеспечения этих экспериментов организована система ЭВМ "РАДИУС" с общим банком программ и данных для управления установками, контроля аппаратуры, сбора и предварительной обработки информации в экспериментах по физике высоких энергий. Используется II комплект, имеющий ОЗУ 16 к, оснащенный разветвлением ввода-вывода РВВ и дисками. Базовые ЭВМ и центральная

М-6000 расположены в вычислительном центре Института, периферийные - в непосредственной близости от экспериментальных установок<sup>/4/</sup>.

Управление комплексами ВЭШ-4 и НАП-М осуществляется специализированным управляющим центром на базе ЭВМ серии ОДРА-1300 польской фирмы МЭРА-ЭЛЬВРО.

ВЭШ-4 - это ускорительно-накопительный комплекс для экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках с энергией  $2 \times 7$  ГэВ. В состав ВЭШ-4 входят: комплекс ВЭШ-3 (инжектор ЭЛИТ-3, синхротрон Б-4, накопитель ВЭШ-3), электронно-оптический канал и собственно-накопительное кольцо ВЭШ-4<sup>/5/</sup>.

Накопитель НАП-М - установка, предназначенная для проведения экспериментов по электронному охлаждению протонов; она состоит из инжектора протонов, накопительного кольца НАП-М и установки с электронными пучками<sup>/6/</sup>.

В настоящее время управляющий центр "ОДРА" оснащен машинами: ОДРА-1304 - I шт., ОДРА-1325 - IO шт., ОДРА-1305 - I шт. ОДРА-1325, принятая в качестве основной управляющей ЭВМ, является машиной третьего поколения и имеет следующие параметры: оперативная память - 32 к 24-разрядных слов; цикла памяти - I мкс и 9 каналов непосредственного доступа. ЭВМ ОДРА-1305 - также машина третьего поколения большой производительности. Она используется для подготовки управляющих программ и решения вычислительных задач.

Благодаря существующему соглашению между МЭРА-ЭЛЬВРО и английской фирмой ICL вместе с ЭВМ поставляется богатый комплект матобеспечения (ЭВМ серии ОДРА-1300 и ICL-1900 полностью совместимы). Все ЭВМ управляющего центра оснащены комплектом внешних устройств производства фирмы МЭРА-ЭЛЬВРО, набор которых зависит от задач, решаемых каждой данной машиной. Сосредоточение управляющих ЭВМ в одном месте позволило организовать коллективное использование периферийного оборудования.

### 3. Программное обеспечение

Использование ЭВМ для управления физическими комплексами предполагает наличие развитой системы матобеспечения. В ИЯФ создана большая библиотека, которая содержит достаточное количество рабочих, наладочных и тестовых программ; обеспечена возможность их изготовления, хранения, редактирования и обмена.

На комплексе ВЭШ-2М подготовлен и введен в работу комплект программ, который можно условно разбить на следующие группы:

- программы управления,
- программы контроля,
- программы первичной обработки результатов эксперимента.

Функции программ управления сводятся к заполнению информацией области ОЗУ, к которой подключен специальный канал чтения из памяти. В дальнейшем циклический вывод информации не требует процессорного обслуживания. Для каждого режима работы комплекса ВЭШ-2М в эту область памяти вводится определенный массив чисел. Время и последовательность перехода с одного режима на другой задается отдельной программой. Смена режимов выполняется по команде оператора или автоматически при выполнении какого-либо условия (например, накопление заданного числа частиц в накопителе ВЭШ-2). Оператор с клавиатуры дисплея может менять по своему усмотрению любой параметр управляющей таблицы.

Программы контроля следят за правильностью работы накопительных устройств и сообщают о несоответствии выходного сигнала заданному в любом из каналов регулирования.

Программы первичной обработки результатов эксперимента обеспечивают измерение светимости, положения равновесной орбиты и радиационной поляризации электронов.

Для сложного, многосистемного комплекса весьма существенна организация многопрограммной работы ЭВМ и возможность одновременной работы нескольких программ. В системе матобеспечения для управления комплексами на базе ЭВМ серии ОДРА реализация этих возможностей обеспечивается операционной системой - диспетчером. Диспетчер выполняет следующие функции: загружает и запускает вспомогательные и рабочие программы, распределяет время работы центрального процессора между программами в соответствии с их приоритетом, осуществляет контроль за работой внешних устройств, обрабатывает внешние прерывания и в соответствии с их характером перестраивает работу находящихся в памяти программ, осуществляет и контролирует межпроцессорную связь. Оператор поддерживает контакт с диспетчером, используя наборы директив, вводимых с клавиатуры алфавитно-цифрового дисплея.

Ввиду экспериментального характера установок невозможно заранее предсказать последовательность операций, которые должна производить ЭВМ над элементами. Поэтому необходимо написание

программ на проблемно-ориентированном языке высокого уровня с возможностью приготовления программ непосредственно с пульта оператора комплекса. Опыт использования ЭМ на ускорительно-накопительных установках ИЯФ подтверждает важность этого требования. Для реализации этих требований разработан язык, представляющий собой попытку объединения наиболее привлекательных возможностей языка Фортран IV и некоторого набора специальных операторов, посредством которых программа может осуществлять различные функции по управлению установками комплекса.

#### 4. Типичная структура системы управления

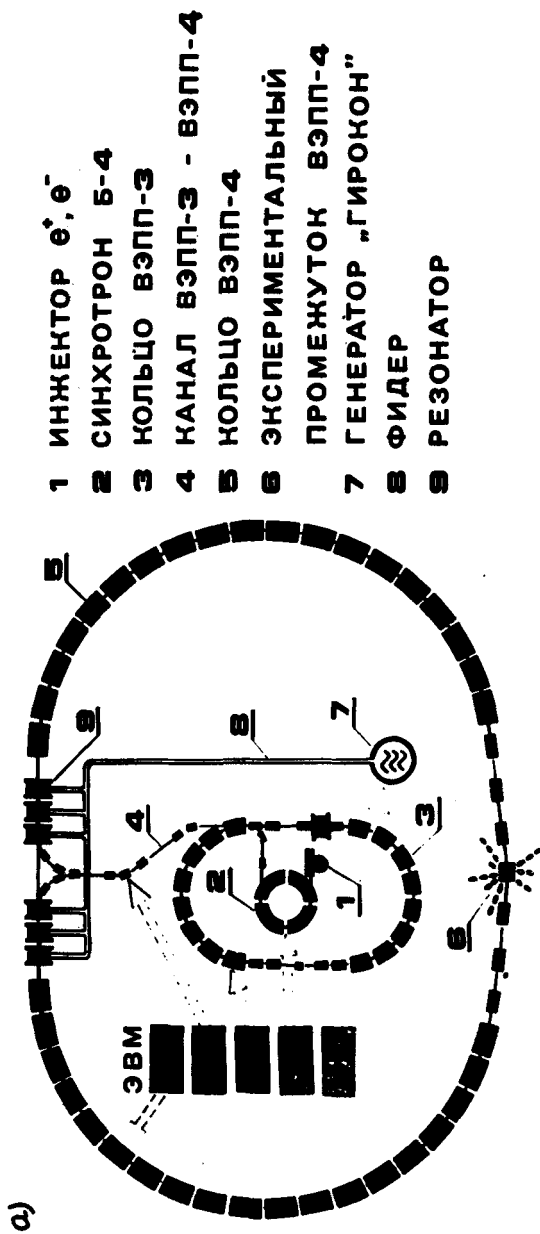
Структуру системы управления физическим комплексом можно рассмотреть на примере ускорительного комплекса ВЭШ-4. В основные принципы проектирования комплекса заложен тот факт, что управление и контроль всех его элементов осуществляется при помощи ЭМ.

Пять ЭМ ОДРА-1325 объединены межмашинной связью и с помощью аппаратуры передачи данных взаимодействуют с оконечными устройствами контроля и управления комплексом. Общее число точек управления превышает 600, контроля - 3000. Общение оператора с ЭМ осуществляется при помощи дисплеев, буквенно-цифровых таблиц, цифровых пультов управления, планшетов для удобного вызова необходимых программ. Структурная схема комплекса ВЭШ-4 приведена на рис. 1а.

Канал транспортировки частиц насчитывает более 40 поворотных магнитов, дублетов и триплетов линз, насаживаемых катушек, работающих в импульсном режиме. При помощи цифро-аналоговых преобразователей регулируется уровень поля и время запуска элементов канала. В каждом из элементов контролируется величина поля, напряжение на конденсаторных батареях, время запуска генераторов; во время перепуска измеряется положение пучка вторично-эмиссионными датчиками, информация с которых обрабатывается в ЭМ, что позволяет скорректировать параметры для следующих перепусков.

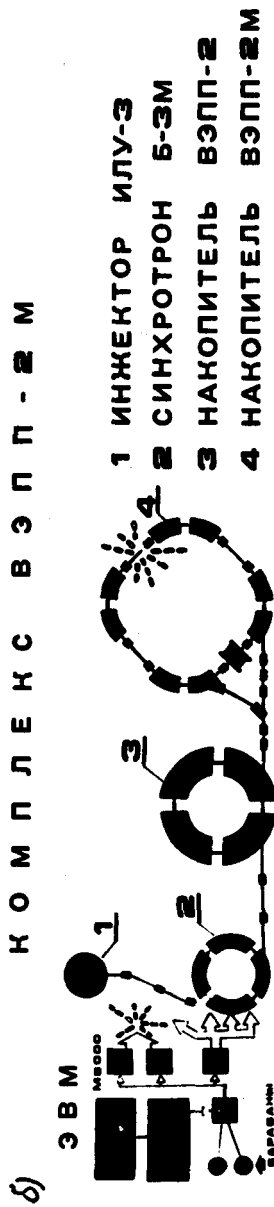
Силовое питание накопителя имеет 20 каналов управления. Это позволяет перестраивать структуру магнитной системы для получения оптимальных характеристик пучка. С помощью АЦП, связанных с ЭМ, осуществляется контроль токов и напряжений на обмотках элементов.

КОМПЛЕКС ВЭПП-4



- 1 ИНЖЕКТОР  $e^+, e^-$
- 2 СИНХРОТРОН Б-4
- 3 КОЛЬЦО ВЭПП-3
- 4 КАНАЛ ВЭПП-3 - ВЭПП-4
- 5 КОЛЬЦО ВЭПП-4
- 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПРОМЕЖУТОК ВЭПП-4
- 7 ГЕНЕРАТОР "ГИРОКОП"
- 8 ФИДЕР
- 9 РЕЗОНАТОР

КОМПЛЕКС ВЭПП-2М



- 1 ИНЖЕКТОР ИЛУ-3
- 2 СИНХРОТРОН Б-3М
- 3 НАКОПИТЕЛЬ ВЭПП-2
- 4 НАКОПИТЕЛЬ ВЭПП-2М

Рис. 1. Структурная схема системы управления установками ВЭПП-4 и ВЭПП-2М.

Коррекция равновесной орбиты и мультипольные коррекции содержат около 350 каналов, управляемых от ЭВМ посредством узлов с буферными запоминающими устройствами. Предусмотрен машинный контроль токов и напряжений обмоток коррекции.

Система измерения положения равновесной орбиты содержит 52 пикап-станции. Обработка сигналов с датчиков производится в четырёх обрабатывающих узлах, связанных с ЭВМ через буферные ЗУ.

Общий контроль включает:

- контроль температуры токонесущих шин - около 1300 точек,
- измерение вакуума в канале и кольце ВЭП-4 - около 300 точек,
- контроль положения пробников и вакуумных клапанов - около 50 точек,
- состояние источников питания и цепей управления - около 500 точек,
- измерение мгновенного значения импульсов - около 200 точек.

#### 5. Измерительная и управляющая аппаратура

Для осуществления многообразных функций по контролю и управлению элементами комплекса разработаны измерительные и управляющие устройства, такие как прецизионные аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (с погрешностью до 0,002%), измерители и датчики временных интервалов, аналоговые коммутаторы, измерители вакуума и температуры и другие специфические устройства, необходимые для контроля работы физических установок. Значительную долю в общем объёме аппаратуры составляют позиционные регистры для управления процессом включения или выключения отдельных элементов комплекса, а также позиционные регистры-датчики текущего состояния типа "включено-выключено". Такими приборами оборудованы цепи управления блокировкой и сигнализацией. Большая часть аппаратуры измерения и управления выполнена в виде автономных функциональных блоков, включающих обычно коммутатор, измеритель, запоминающее устройство (объёмом до 128 слов по 12 разрядов) и устройство управления и связи. Такой блок производит многоканальное измерение каких-то параметров объекта с накоплением информации в ЗУ. Управляющая ЭВМ получает данные от таких блоков согласно программе, считывая измеренные значения массивами непосредственно из ЗУ.

Разработка номенклатуры измерительных и управляющих устройств, их изготовление, настройка и проверка выливаются для

современного ускорительного комплекса в большую и сложную самостоятельную работу, от которой во многом зависят темпы работ по автоматизации эксперимента.

## 6. Структура системы передачи данных

Организация связи между ЭВМ и большим количеством исполнительных элементов и контрольно-измерительных устройств определяет для каждого конкретного класса ЭВМ соответствующий подход к структуре и конфигурации системы передачи данных.

При использовании мини-ЭВМ М-6000 целесообразно использовать стандартный ПВВ для мультиплексирования каналов на первой ступени иерархической структуры. Каждое конкретное устройство подключается к ПВВ через систему передачи данных стандартной интерфейсной картой. Дальнейшее разветвление измерительных и управляющих каналов осуществляется соответствующими специализированными коммутаторами. Особенностью системы управления на М-6000 является специально разработанный в ИЯФ СО АН СССР канал чтения из памяти, позволяющий независимо от программ осуществлять непрерывный вывод информации на объекты управления.

Управляющие каналы ЭВМ серии ОДРА оборудованы независимым от арифметического специализированным процессором ввода-вывода, который управляется операционной системой "EXECUTIVE". Для подключения к каналу ЭВМ используется программируемый блок-диспетчер и иерархическая система магистральных станций, осуществляющая разветвление каналов передачи данных вплоть до каждого измерительного или управляющего устройства. Станции, встроенные в многоканальные устройства, подключают через специализированные аналоговые или высокочастотные коммутаторы конкретный, измеряемый в данный момент канал.

Система передачи данных, разработанная в ИЯФ СО АН СССР, основана на принципе передачи информации в последовательном виде. Такая малопроводная система передачи данных обеспечивает высокую надёжность и помехозащищённость линий связи, возможность работы с большим количеством территориально разнесённых объектов.

Учитывая постепенный характер ввода различных объектов ускорительно-накопительного комплекса, система такого рода допускает непрерывную наращиваемость как по функциям, так и по числу и характеру присоединяемых к ней датчиков и устройств управления.



## 7. Особенности построения управляющей аппаратуры в стандарте КАМАК для ускорительных установок

Перспективы развития управляющих систем включают не только количественное изменение числа устройств, датчиков, элементов контроля и управления, но и введение новых конструктивных элементов, создание аппаратуры на основе современной микроэлементной базы. Сейчас в Институте ядерной физики ведутся работы по проектированию управляющей аппаратуры в стандарте КАМАК.

В настоящее время КАМАК имеет преимущественное распространение в ядерной физике как стандарт для связи ЭВМ с системами регистрации, накопления и обработки статистических данных и решения других сугубо экспериментальных задач. Идеология, основные принципы организации и номенклатура модулей подобных систем не всегда и не полностью применимы при проектировании систем управления ускорительно-накопительными установками в стандарте КАМАК. По-видимому, потребуется разработка целой серии специфических модулей, номенклатура и метрологические характеристики которых должны быть адекватны требованиям задач управления современным физическим комплексом. С другой стороны, должны быть максимально использованы привлекательные возможности стандарта КАМАК, такие как оперативная магистральная связь внутри крейта, широкие функциональные возможности камаковской магистрали и т.д.

Ниже приводится набор модулей, отличных от традиционной номенклатуры в стандарте КАМАК, создание которых является необходимым условием работы современных измерительно-управляющих систем:

1. Прецизионные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) интегрирующего типа и поразрядного взвешивания с погрешностью соответственно не хуже чем 0,001% и 0,01%, имеющие „подвешенный“ измерительный узел для организации трехпроводного измерительного контура с подавлением помех параллельного и последовательного вида не хуже 100+120 дБ. Такие АЦП должны быть скомплектованы высококачественными аналоговыми коммутаторами.

2. В цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП) должна быть решена проблема потенциальной развязки цифровой и аналоговой части. Весьма перспективна организация таких ЦАП на принципе

широко-импульсной модуляции (ШИМ). Такие ЦАП-ШИМ наряду с оперативным взаимодействием с ЭВМ через магистраль крейта позволяют осуществлять управление территориально разнесенными объектами (например, мощными генераторами тока) со стабильностью и линейностью не хуже 0,001%.

3. Необходимо разработать стандартизированные в системе КАМАК модули для массового контроля и управления такими параметрами, как вакуум, температура, позиционные датчики и управляющие регистры значений импульсных сигналов, многоканальные генераторы временных интервалов, специализированные измерители всякого рода неэлектрических величин.

4. Усложнившийся физический эксперимент требует создания измерительных устройств новых типов. Например, весьма гармонично реализуется в конструктивах КАМАК аппаратура для регистрации однократных процессов как в ускорительных, так и в плазменных экспериментах. Устройство типа "осциллографический канал" состоит из быстрого АЦП в комбинации с оперативным ЗУ объемом 1-2 килобита. Такой блок имеет информационный канал и программное управление через магистраль крейта с последующей обработкой массива данных в ЭВМ или их индикацией через дисплей.

#### 8. Структура системы управления на новом этапе

Некоторые особенности системы управления большими экспериментальными установками, такие как территориальная разнесенность объектов измерения и управления, функциональная обособленность отдельных измерительных систем (измерение вакуума, температуры, положения датчиков), делают рациональным создание автономных функциональных узлов, которые расположены вблизи объектов управления и достаточно редко обмениваются с ЭВМ массивами предварительно обработанной информации. Тенденция к децентрализации управляющих систем имеет вполне резонную альтернативу, и решение этого вопроса во многом зависит от конкретной структуры физической установки, от имеющегося парка ЭВМ, от других условий, характерных для данной лаборатории. Это достаточно объективные исходные данные, которые должны учитываться при решении проблемы. Но коль скоро речь идет о повышении качества управления, то такие факторы, как оперативность в организации прерываний, высокая скорость межимпульсного обмена, повышенная помехоустойчивость при передаче информации по внутренней магист-

рали и, наконец, быстрая реакция на аварийные ситуации в контролируемой системе, — все эти факторы говорят о том, что при соответствующем уровне микроэлектроники организация таких функционально-независимых узлов на базе стандарта КАМАК представляется весьма привлекательной и перспективной. Опыт управления крупными экспериментальными установками в ИЯФ показывает рациональность такого способа организации взаимодействия с массовыми объектами.

Набор стандартных измерителей, коммутаторов, таймеров и запоминающих устройств, которые могут быть оперативно связаны через магистраль крейта, обеспечивает построение всевозможных измерительных и управляющих конфигураций, если контроллер обладает некоторой функциональной самостоятельностью, обеспечивает программируемый набор функций и логики связи между модулями крейта. Такой контроллер может быть реализован на основе микропроцессоров или даже на базе схем средней степени интеграции и оснащен соответствующим ЗУ. По-видимому, целесообразно рассмотреть создание ориентированных на данную задачу контроллеров рационального объема и сложности <sup>17</sup>.

Такой подход определяет общую конфигурацию системы управления, реализованной в стандарте КАМАК. Каждый отдельный крейт при этом является не только и не столько механизмом развития машинного интерфейса, а становится системным средством организации функционально-самостоятельных узлов, в которых контроллер для частных задач выполняет функции мини-ЭВМ.

Темпы развития микроэлементной базы, микропроцессоров и роста объема оперативной памяти дают основания предполагать, что функциональная значимость таких узлов, объем массивов информации, степень их предварительной обработки будут возрастать. Возможно, что подобные измерительно-управляющие структуры будет рационально связывать непосредственно с большой универсальной ЭВМ, имеющей высокую производительность и каналы, обеспеченные операционной системой с координатором каналов. При такой организации периферийные узлы, взяв на себя рутинные задачи по массовой переработке информации, оставляют за центральной ЭВМ объемные вычислительные процессы и заботы о координации всей управляющей структуры.



Рис.2. Общий вид управляющего центра на базе ЭВМ серии ОДРА-1300

#### Л и т е р а т у р а

1. Б.А.Баклаков и др. Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, М., "Наука", 1973, стр.39.
2. В.А.Гусев и др. Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, М., "Наука", 1975, стр.202.
3. В.А.Гусев и др. Система автоматического управления и контроля ускорительно-накопительного комплекса ВЭШ-2М со встречными электрон-позитронными пучками . Доклад на У Совещании по ускорителям заряженных частиц. Москва, 1976.
4. В.А.Гусев и др. Препринт ИЯФ № 75-84, Новосибирск, 1975.
5. С.Д.Белов и др. Структура системы автоматизированного управления и контроля накопителя ВЭШ-4 . Доклад на У Совещании по ускорителям заряженных частиц. Москва, "Наука", 1976.
6. Ю.А.Болванов и др. ПТЭ № 4, с.40 (1976).
7. Г.А. Аксенов и др. Программируемый крейт-контроллер . Доклад на конференции по автоматизации научных исследований на основе применения ЭВМ. Новосибирск, 1977.