



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи
2000–19

Воеводин Валерий Павлович

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯМИ
И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ
НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ИФВЭ**

01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2000

Работа выполнена в ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.Н.Беляев (МИФИ), доктор технических наук В.И.Беляков-Бодин (ИТЭФ), доктор физико-математических наук Ю.А.Чесноков (ИФВЭ).

Ведущая организация – Московский радио-технический институт (МРТИ РАН).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2000 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142284, г.Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 034.02.01

Ю.Г.Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. По мере развития вычислительных средств и программных технологий, более глубокого их проникновения в современную ускорительную технику возрастают роль и значимость проектирования системы управления в целом, ее структуры и принципов организации. К началу 90-х годов в мире в общих чертах определилась “стандартная трехуровневая архитектура” вычислительных и коммуникационных средств современных систем управления (СУ). Что касается программного обеспечения (ПО), то единого подхода в этой области до сих пор нет, несмотря на то, что предпринимаются серьезные усилия к унификации ПО и минимизации затрат на разработку и создание программных систем. Направления, наиболее актуальные в настоящее время, можно, например, определить из названий секций международных конференций ICALEPCS, посвященных исключительно системам управления ускорителями и большими экспериментальными установками: программные технологии, базы данных, графический интерфейс человек-машина и др.

В ИФВЭ в конце 70-х годов возникла задача создания интегрированной СУ как неотъемлемой части строящегося бустерного синхротрона У-1.5 с каналами ввода и вывода пучков. Бустерный синхротрон был первым в ИФВЭ ускорителем без средств ручного контроля и управления на большинстве технологических подсистем,

работа с которыми уже с этапа проектирования предполагалась исключительно через СУ. Параллельно, одновременно и согласованно велись разработки и ускорителя, и системы управления как неотъемлемой части бустера.

В 1994 г. были начаты работы по созданию новой единой системы управления всего действующего ускорительного комплекса ИФВЭ на энергию 70 ГэВ.

Проблема создания интегрированных систем управления приобретает особую актуальность для больших ускорителей и для совместно работающих комплексов из нескольких ускорителей, когда технологическое оборудование распределено по значительной территории и располагается в различных зданиях. Разработка и реализация программных систем управления ускорителями являются наиболее наукоемкой частью СУ, роль которой постоянно растет по мере развития информационных и программных технологий.

Цель диссертационной работы заключается в:

- 1) адаптации методологий и технологий науки программирования с целью внедрения их в ускорительную технику;
- 2) разработке модели программных систем контроля и управления ускорителями на основании результатов исследования технических особенностей и режимов работы ускорительного комплекса ИФВЭ с точки зрения их влияния на автоматизацию технологических процессов производства пучков заряженных частиц;
- 3) разработке в соответствии с моделью методов реализации программных систем, оптимизирующих требуемые бюджетные, вычислительные и кадровые ресурсы;
- 4) создании программных систем контроля и управления ускорителями по разработанным методам для конкретных реальных экономических, технических и технологических условий.

Научная новизна и результаты. В диссертационной работе предлагается разработанная автором модель программных систем контроля и управления ускорителями, построенная на принципиально новых концепциях и базовых принципах, решаются проблемы ее реализации на ускорительном комплексе ИФВЭ. Модель програм-

мных систем ориентируется на управление технологическим процессом производства пучков заряженных частиц, а не управление оборудованием ускорителя. Архитектура программного обеспечения как результат логического проектирования строится на базе информационной модели, отображающей текущее состояние технологического процесса. Разрабатываемые в диссертации методы реализации модели программных систем определяются из формализованных объектов информационной модели.

Первая реализация архитектурных узлов модели была выполнена в 70-80-х годах как интегрированная СУ бустера и его каналов ввода и вывода на базе центральной мини-ЭВМ и распределенных по каркасам КАМАК встроенных одноплатных микроЭВМ. Она находилась в эксплуатации до 1998 г.

С 1994 г. в ИФВЭ были начаты разработка проекта, а затем и создание новой единой интегрированной системы управления всего существующего комплекса ускорителей У-70. В целом проект СУ разрабатывался в сотрудничестве с CERN, каждое предлагаемое решение проходило экспертную оценку зарубежных специалистов из ряда ускорительных центров, имеющих богатый практический опыт в данной области. Предлагаемая модель программных систем была одобрена, легла в основу проекта в части, касающейся программного и информационного обеспечения, и была реализована на современных технических средствах и программных технологиях под руководством и при непосредственном участии автора.

Практическая ценность диссертации заключается в следующем: разработана модель программных систем контроля и управления ускорителями; осуществлена ее реализация в системе управления бустерным синхротроном, которая находилась в эксплуатации в течение 17 лет и показала практичность и надежность принятых решений; выполнена вторая реализация в новой распределенной СУ всего ускорительного комплекса У-70, которая в настоящее время вносит вклад в обеспечение проведения сеансов и физических исследований в ИФВЭ.

Автор защищает:

- Разработку модели программных систем контроля и управления ускорителями, в основе которой лежат новые концепции и принципы. Модель программных систем включает в себя концептуальную, архитектурную и информационную составляющие и ориентируется на управление технологическим процессом, а не оборудованием, как это принято в других моделях. Архитектура программного обеспечения как результат логического проектирования строится на базе информационной модели, отображающей текущее состояние технологического процесса.
- Разработку методов реализации модели программных систем, которые определяются: 1) из формализованных объектов информационной модели, 2) по результатам исследования технических особенностей и режимов работы ускорительного комплекса ИФВЭ, 3) с учетом внешних параметров реализации — бюджет, сроки, кадры.
- Непосредственную реализацию программных систем ускорительного комплекса У-70, которая включает в себя управление динамическими данными, организацию распределенной обработки информации, управление транспортировкой сообщений в неоднородной коммуникационной среде, ПО реального времени для микропроцессоров нижнего уровня СУ, графический интерфейс с пользователем и средства интеграции ПО обработки данных.

Апробация результатов и публикации. Основу диссертации составляют 38 печатных работ [1-38], опубликованных в виде препринтов, докладов и журнальных статей. Разработки и полученные результаты докладывались на всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и совещаниях.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 191 странице, состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 41 рисунок и список цитируемой литературы из 151 наименования.

Содержание работы

В первой главе обсуждаются особенности использования существующих методологий проектирования программного обеспечения для анализа и разработки программных систем контроля и управления ускорителями, которые формально рассматриваются как абстрактные логические конструкции. В соответствии с введенными фазами цикла жизни программных систем на первой стадии вырабатываются базовые требования к системе управления ускорительного комплекса ИФВЭ в целом и к ее программно-информационным составляющим. Далее выполняется этап абстрактного логического проектирования интегрированных программных систем.

Существующие модели программных систем зависят от организации работ и в зарубежных ускорительных центрах не включают в себя ПО обработки данных и ПО непосредственного взаимодействия с аппаратурой, а ускоритель в них описывается как установка в терминах логических устройств или логических каналов, что и определяет все дальнейшее построение архитектуры программных систем. В предлагаемом подходе программные системы рассматриваются как совокупность всех программных компонент — от обслуживания интерфейсной электроники до взаимодействия с оператором ускорителя. В его основе лежит технологический процесс производства пучков заряженных частиц, который для программных систем описывается конечным множеством параметров A . Каждому параметру соответствует конечное множество D_i , допустимых дискретных значений

$$\forall x_i \in A \exists D_i, \quad i = \overline{1, n(A)}.$$

Под состоянием S мы понимаем функцию, определенную на множестве A и принимающую значения в D_i :

$$\forall \chi_i \in A \exists y \in D_i S(\chi_i) = y.$$

Она ассоциирует параметр с его текущим значением. Множество текущих состояний всех параметров представляет собой **информационную модель** технологического процесса. Время, в течение которого это состояние устойчиво, т.е. модель адекватна текущему

состоянию ускорителей, зависит от динамики процессов и определяет необходимый темп переключения состояний информационной модели. Тогда каждое множество D_i является пространством состояний параметра $\chi_i \in A$, а декартово произведение $D_1 \times D_2 \times \dots \times D_{n(A)}$ определяет конечное пространство всех допустимых состояний информационной модели. Множество всех подмножеств множества A будем обозначать через $P(A)$, а его элементы назовем сообщениями. Отметим, что наше понимание функции состояния можно распространить и на $P(A)$, т.е. для сообщения $X \in P(A)$ $S(X) = \{y/y = S(x) \forall x \in X\}$.

Обозначим через $M \subset P(A)$ множество сообщений, которые имеют смысл в реальной программной системе. Будем говорить, что сообщение X порождает сообщение Y , если существует эффективный процесс, переводящий X в Y . Если X порождает Y , то X находится в отношении R_1 с Y , что записывается в виде XR_1Y . Отношение $\overline{R_1}$ является отрицанием R_1 , а запись $X\overline{R_1}Y$ означает, что X не порождает сообщение Y . Выделим подмножества $I \subset M$ и $O \subset M$ такие, что

$$I = \{i/i \in M \forall x \in M x \neq ix\overline{R_1}i\}, \quad O = \{j/j \in M \forall x \in M j \neq xj\overline{R_1}x\}.$$

Таким образом, множество I содержит все допустимые в СУ входные, а O — все выходные сообщения, внешние по отношению к ПО. Для программных систем управления ускорителями существуют по два внешних источника входной и получателя выходной информации:

- *человек* — в нашей модели вводит управляющие сообщения только в физических терминах ускорителя из множества $\Phi_1 \subset I$, а СУ представляет ему также физические параметры из множества $\Phi_2 \subset O$;
- *интерфейсная электроника* — измеренные технологические данные из множества $T_1 \subset I$, т.е. непосредственно считанные из аппаратуры, и управляющие технологические данные из множества $T_2 \subset O$, т.е. непосредственно записываемые в аппаратуру.

Одной из базовых задач прикладного ПО обработки данных является преобразование технологических параметров в физические и обрат-

но, что можно представить в виде двух встречных потоков управляющих и измеренных данных $ППО(\Phi_1) = T_2$ и $ППО(T_1) = \Phi_2$. Схема нашего подхода отображается рис.1.

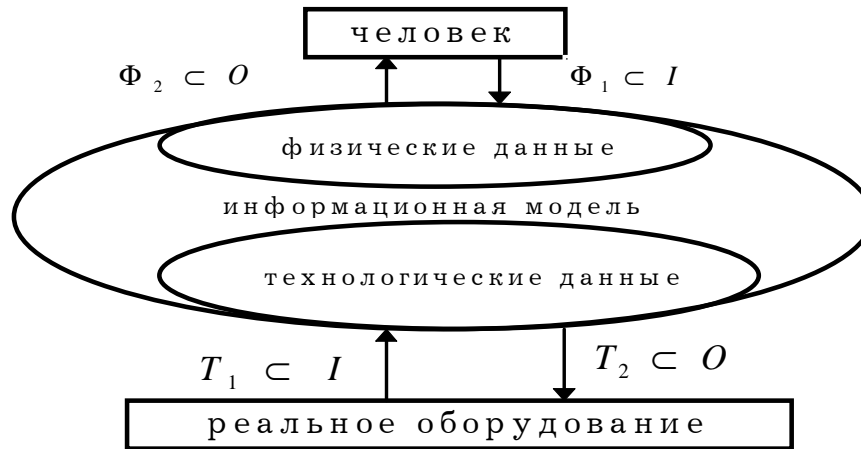


Рис. 1. Входные/выходные потоки данных.

Информационная модель наилучшим образом реализуется посредством технологий баз данных реального времени. Программные процедуры ввода/вывода значений физических параметров образуют пользовательский интерфейс, а процедуры ввода/вывода значений технологических параметров обслуживают аппаратуру. Остальные процедуры, входящие в программные системы, обеспечивают обработку данных и транспортировку сообщений. Таким образом определяется основная архитектура программных систем (рис.2) и базовых компонент, подлежащих детальному проектированию в последующих главах диссертации.

Из выведенной архитектуры следуют важные рекомендации для этапа детального проектирования:

- максимальное разделение данных и программ;
- отделение пользовательского интерфейса от остальных программ;
- отделение доступа к оборудованию от обработки данных.

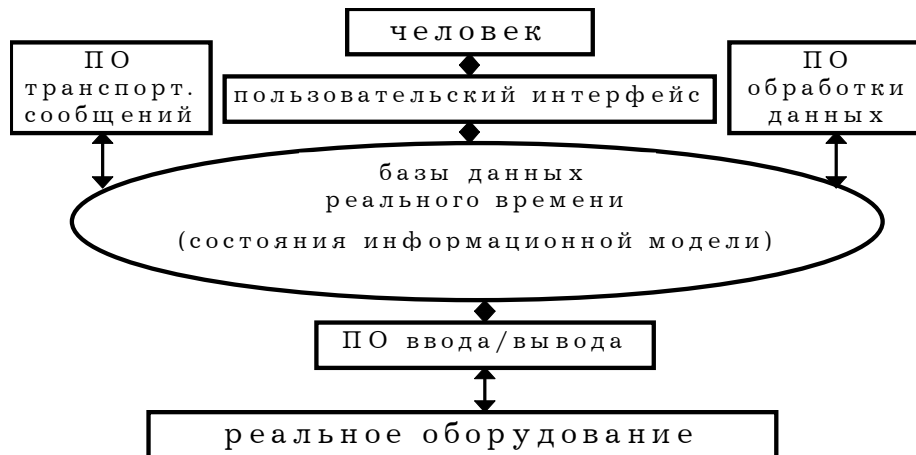


Рис. 2. Архитектурная модель программных систем.

Представленные на рисунке основные архитектурные компоненты программного обеспечения являются слабосвязанными через структуры и информацию баз данных и могут проектироваться и создаваться независимо друг от друга с применением методологий, наиболее подходящих для каждой задачи.

Во **второй главе** рассматриваются особенности ускорительного комплекса У-70; распределение главного (ГПУ) и местных пультов управления (МПУ) по зданиям; топология расположения оборудования и зданий (рис.3); анализируются режимы работы, влияющие на конкретное проектирование программных систем.

На стадии проектирования в программные системы закладывается возможность автоматического переключения режимов работы по внешним событиям или в соответствии с планом работы ускорительного комплекта и предполагается последовательная и/или одновременная отработка ряда логических установок, показанных на рис.4, реализующая любой технологический цикл всего ускорительного комплекта У-70, который мы называем суперциклом.

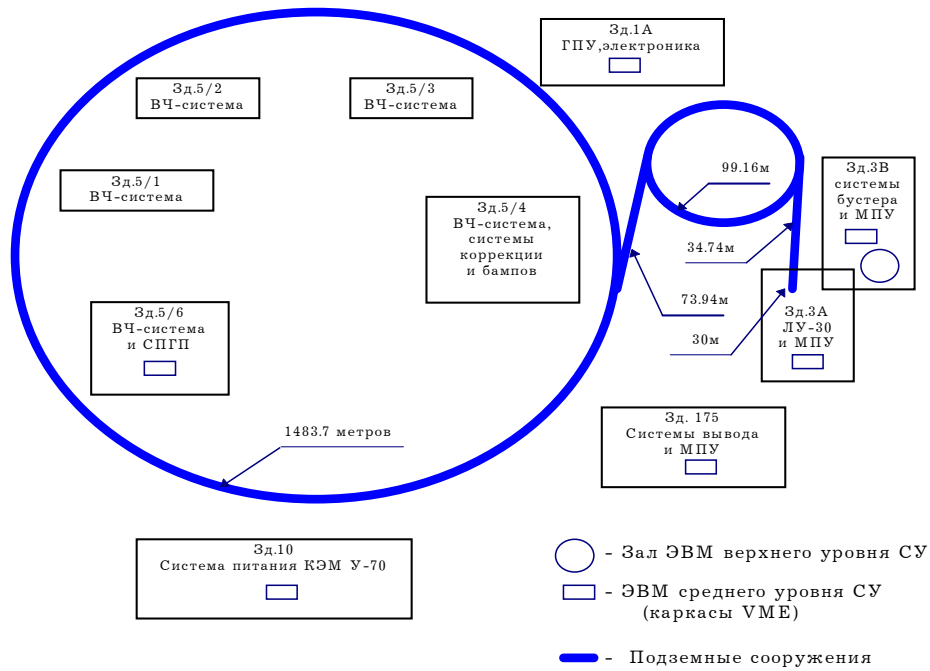
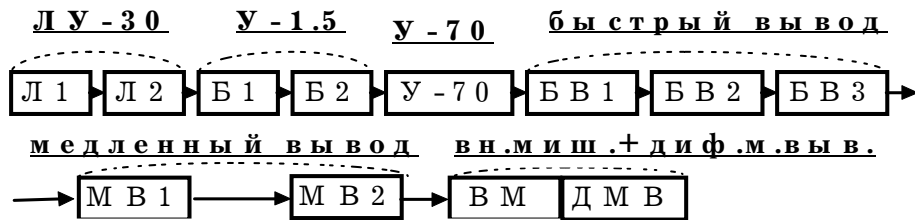


Рис. 3. Схема доступных СУ зданий и подземных сооружений.



Л 1, Б 1 - циклы ЛУ-30 и У-1.5 для обслуживания У-70
 Л 2, Б 2 - циклы ЛУ-30 и У-1.5 для локальных экспер.
 Б В 1 - Б В 3 - трехкратное срабатывание быстрого выв.
 М В 1 - М В 2 - двукратная работа медленного вывода
 В М, Д М В - внутр. мишени + дифракцион. медл. выв.

Рис. 4. Последовательность работы логических установок.

Было решено, что программные системы постоянно поддерживают для каждой логической установки до восьми возможных текущих режимов работы и библиотеку до тридцати спасенных режимов. Любой суперцикл комплекта У-70 описывается фиксированной последовательностью параметров $C = R_1, R_2, \dots, R_{12}, R_i - \bar{1}, \bar{8}$, каждый из которых определяет текущий режим работы одной логической установки и принимает значение номера режима от 1 до 8.

Автоматическое программное переключение режимов внутри суперцикла мы называем внутрипакетным программированием, а между суперциклами — межпакетным программированием.

Важную роль играют базовые параметры внешней среды реализации программных систем: бюджет, сроки, трудозатраты. Исследованы их взаимосвязи и влияние на процесс детального проектирования и принятие конкретных технических решений. И первая, и вторая реализации модели программных систем осуществлялись с учетом выбранной аппаратной архитектуры СУ, которая определялась соответствующими внешними условиями.

Далее разрабатывается центральный элемент архитектуры модели программных систем — управление динамическими данными в режиме реального времени. Исходя из коэффициента обновляемости данных и круга решаемых задач, определяется внешнее представление данных в форме трехмерных таблиц, где каждый элемент таблицы адресуется тремя целочисленными координатами x, y, z . Переходом от теории множеств к теории комплектов дается формальное определение трехмерных структур данных как расширение понятия “отношение” в реляционном подходе.

Из принятых решений следует, что единственными базовыми информационными объектами, которыми манипулирует все программное обеспечение, являются таблица, вектор (столбец таблицы) и структура (строка таблицы). Данное внешнее представление в значительной степени определяет дальнейшее проектирование программных составляющих архитектурной модели.

Разработаны две внутренние схемы хранения динамических данных с адаптацией к условиям реального времени, которые были реализованы в первой и второй реализациях модели программных си-

стем. Спроектирована и создана специализированная система управления распределенными базами данных реального времени ССУДА с полной инкапсуляцией распределения доступа и данных.

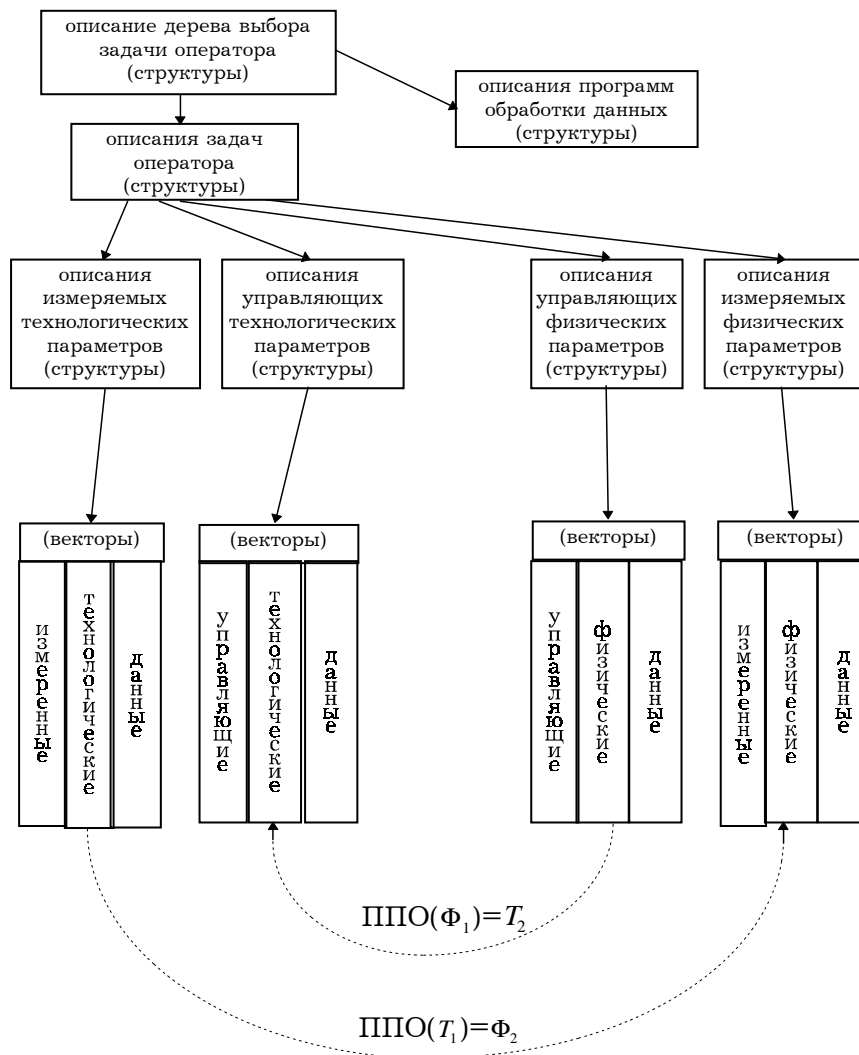


Рис. 5. Основные объекты информационной модели.

Распределение таблиц данных осуществляется как по вертикали, так и по горизонтали структуры системы управления. ССУДА реализована в Unix-подобных системах для процессоров Intel, DEC и Motorola. В терминах элементов ССУДА определены основные объекты информационной модели и их взаимосвязи (рис.5).

В настоящее время в СУ комплекта У-70 используются около 1500 ССУДА-таблиц, хранящихся в 12 базах данных, распределенных по дискам восьми ЭВМ и имеющих суммарный объем свыше 400 Мбайт. С развитием системы управления их количество соответственно увеличивается.

В **третьей главе** анализируются наиболее критические задачи реального времени и обсуждается ПО нижнего уровня системы управления, которое включает в себя один из узлов архитектурной модели программных систем — ПО ввода/вывода. Рассматривается программный интерфейс с аппаратурой, синхронизация с внешними событиями и особенности первой и второй реализаций. Схема организации ПО нижнего уровня (рис.6) однозначно следует из модели программных систем.

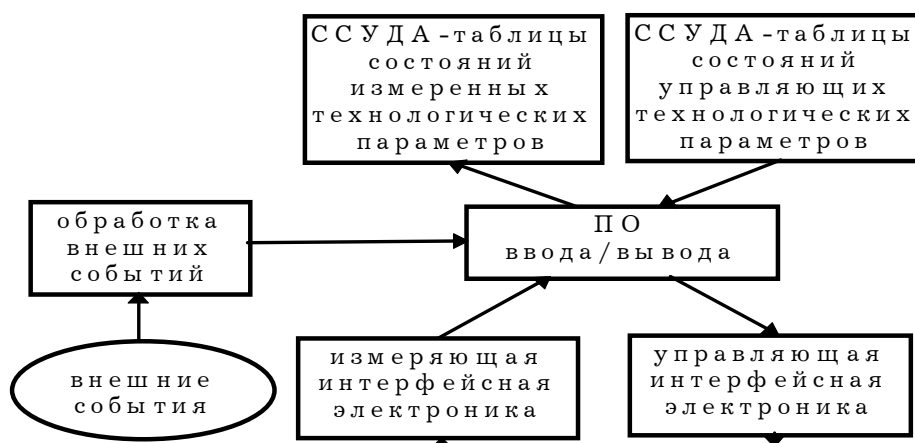


Рис. 6. Схема взаимодействий ПО нижнего уровня.

Пусть E — множество электронных адресов, т.е. адресное пространство электронной аппаратуры. Над каждым адресом из E можно выполнять определенные элементарные операции чтения/записи, которые обозначим RW . Тогда для любого технологического параметра t существует фиксированная последовательность операций RW над подмножеством электронных адресов $e \subset E$, которая реализует процесс ввода/вывода текущего состояния этого параметра, что можно представить в виде $t \Leftrightarrow RW(e)$, $t \subset T$, $e \subset E$.

Поскольку состояние каждого технологического параметра хранится в определенном месте соответствующей ССУДА-таблицы, то ему можно поставить в соответствие координаты элемента таблицы $t = (tabID, x, y, z)$. Отсюда зависимости между элементами таблиц БД и аппаратурой можно представить в виде

$$(tabID, x, y, z) \Leftrightarrow RW(e).$$

Синхронизированный с событиями технологического процесса обмен данных между ними и является основной функцией ПО ввода/вывода нашей модели программных систем. В режимах внутри-пакетного и межпакетного программирования для каждой из технологических подсистем ускорительного комплекса программное обеспечение нижнего уровня СУ должно выполнять процесс копирования текущего состояния четко определенного количества управляющих технологических параметров между ССУДА таблицами и аппаратурой за строго фиксированное время.

Выполнен анализ задач программирования микропроцессорной техники, и обосновывается применение в системе управления встроенных микроконтроллеров, ориентируемых на решение конкретных узко специализированных задач, и универсальных интеллектуальных контроллеров, решающих определенный класс задач и имеющих унифицированный интерфейс с верхним уровнем СУ.

Описывается разработанная и созданная специализированная многозадачная многотерминальная операционная система реального времени VPV для бездисковых микроЭВМ на базе микропроцессоров Intel 8086 и Intel 80186, используемая во всех контроллерах оборудования (КО) нижнего уровня СУ ускорительного комплекса У-70.

Она обеспечивает богатые возможности организации прикладных программ с синхронизацией по внутренним часам, с локальными и глобальными событиями технологического процесса (рис.7). При включении КО осуществляется автоматическая загрузка соответствующих ССУДА-таблиц и прикладных программ в память контроллера, тем самым восстанавливается последнее состояние оборудования перед выключением питания.

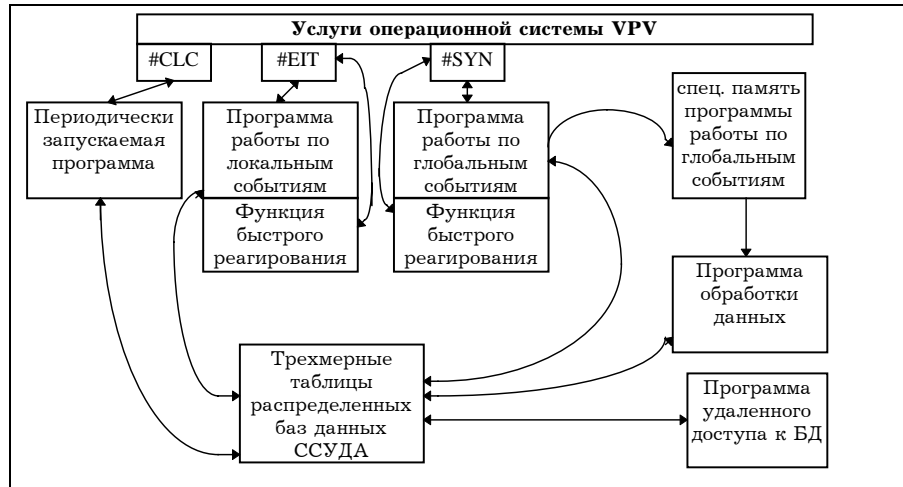


Рис. 7. Возможная организация прикладных программ в КО.

В нашей модели программных систем ПО ввода/вывода является единственным аппаратно-зависимым компонентом программной архитектуры, т.е. изменения аппаратуры приводят к изменениям только в данном слое ПО. Также только это ПО является и аппаратно-ориентированным, т.е. относящиеся к аппаратуре термини используются исключительно программами нижнего уровня системы управления.

Четвертая глава посвящена разработке следующего архитектурного узла модели — программного обеспечения транспортировки сообщений, а также организации распределенной обработки данных,

обсуждению средств повышения надежности и достоверности передачи информации в неоднородной среде, анализу времени доставки сообщений, Неоднородная коммуникационная среда СУ зависит от топологии расположения оборудования ускорителей и зданий и состоит из проблемно-ориентированной локальной вычислительной сети Ethernet (рис.8) и девяти магистралей MIL1553, соединяющих все контроллеры оборудования с шестью каркасами VME. В локальной сети используются линии связи 100 М и 10 М, магистрали MIL1553 обеспечивают 1 Мбит/с.

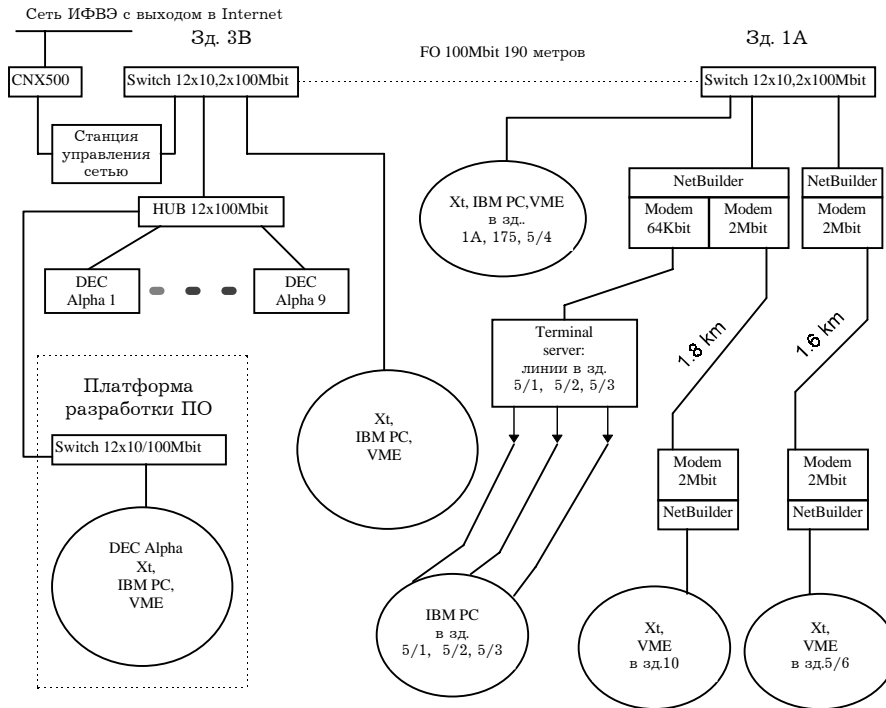


Рис. 8. Схема локальной вычислительной сети СУ У-70.

Разработаны и реализованы следующие проблемно-ориентированные специализированные прикладные протоколы:

- удаленного доступа к любой таблице баз данных ССУДА из любой точки системы управления;

- виртуального терминала контроллера оборудования;
- загрузки программ в память контроллеров оборудования;
- загрузки ССУДА-таблиц в память ЭВМ среднего уровня и КО.

На уровне локальной вычислительной сети используются стандартные протоколы NFS, UDP и TCP. Для магистралей MIL1553 разработаны и реализованы специализированные транспортные протоколы, построенные над разработанным в CERN пакетом QuickData для контроллера магистрали RTI. Надежность доставки и достоверность доставленных данных обеспечиваются адаптацией механизмов CRC, timeout, послышки/подтверждения, повторных передач для использования со специализированными транспортными протоколами.

Значительное внимание уделено разработке и созданию ПО ЭВМ среднего уровня СУ, т.е. обслуживанию каркасов VME под управлением операционной системы LynxOS, к которым подключаются магистрали MIL1553 с контроллерами оборудования (рис.9). Созданное программное обеспечение идентично для каждой ЭВМ среднего уровня и состоит из четырех программ, две из которых выполнены с применением технологий multithread. Основное функциональное назначение данного программного обеспечения заключается в обслуживании ССУДА-таблиц в своей памяти и перекоммутации пакетов вышеперечисленных прикладных протоколов между Ethernet (10 Мбит/с, размер пакета до 8 К) и MIL1553 (1 Мбит/с и длина пакета не более 256 байт, из которых 234 информационных).

Инициатором передачи данных по магистрали MIL1553 могут быть как программы на верхнем уровне СУ, так и программы в контроллерах оборудования. Общая пропускная способность по магистралям MIL1553 зависит от количества, частоты и порядка поступления запросов на передачу, времени реакции программы *fe_ec* и драйверов системы VPV, скорости взаимодействия других программ и т.д. Зафиксированный реальный максимум составляет 35 переданных по магистрали MIL1553 пакетов QuickData в секунду, из которых 14 были переданы в КО, а 21 — в обратном направлении.

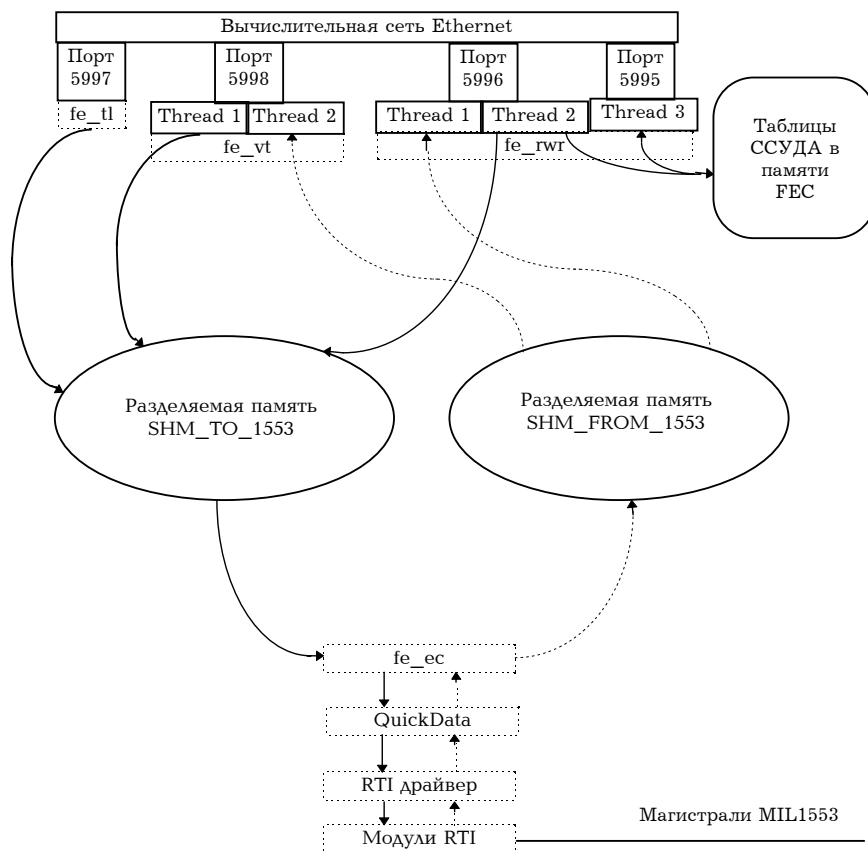


Рис. 9. Организация ПО в ЭВМ среднего уровня.

Таким образом, по девяти магистралям на верхний уровень СУ может поступать не более $9 \times 21 \times 234 \approx 40$ Кбайт/секунда измеренных данных. Время доставки end-to-end любого сообщения в вычислительной сети СУ аккуратно спроектированной топологии в худшем случае не превышает 15 мс. Время доставки любого сообщения по магистрали MIL1553 $T_v^u \approx 28.6N$ мс, где N — число пакетов QuickData, на которые фрагментируется сообщение. Тогда при решении конкретных задач в рамках системы управления комплекса У-70 время T транспортировки сообщения в коммуникационной сре-

де СУ можно оценивать следующим образом: $T \leq 15 + 28.6N$ мс, $N = \overline{0, 36}$.

Разработанное программное коммуникационное ПО в совокупности с используемыми стандартными средствами обеспечивает возможность практически неограниченного расширения системы управления по технологиям открытых систем.

В **пятой главе** рассматривается программное обеспечение верхнего уровня СУ, включающее в себя средства платформы разработки программного обеспечения и два узла архитектурной модели: пользовательский интерфейс и ПО обработки данных. Обсуждаются организация программной и вычислительной среды в первой и второй реализациях модели, инструментальные технологии и выполненные разработки с целью обеспечения условий для эффективного проектирования и создания программных систем.

Дано определение четырех возможных уровней обработки данных, определяющих достигнутый интеллектуальный уровень системы управления ускорителями. Предлагается один из практических способов унификации ПО обработки данных, который значительно сокращает трудозатраты, требуемые для реализации наиболее емкого программного обеспечения, интегрирует прикладное ПО в единую прикладную систему и минимизирует потребность в вычислительных ресурсах. Следуя выведенным из архитектурной модели рекомендациям по отделению от прикладных программ данных, пользовательского интерфейса и доступа к оборудованию, мы уже значительно сокращаем общий объем прикладного ПО (рис.10) и, как следствие, концентрируем внимание на его алгоритмической части.

Анализ применяемых методов обработки данных показывает, что значительное количество идентичных сервисных процедур и алгоритмов используются во многих приложениях, относящихся к различным ускорителям и технологическим системам. Они легко реализуются в форме хорошо формализованных процедурных модулей, выполняющих обработку объектов информационной модели. Тем самым достигается высокий уровень универсализма программных компонент обработки данных.

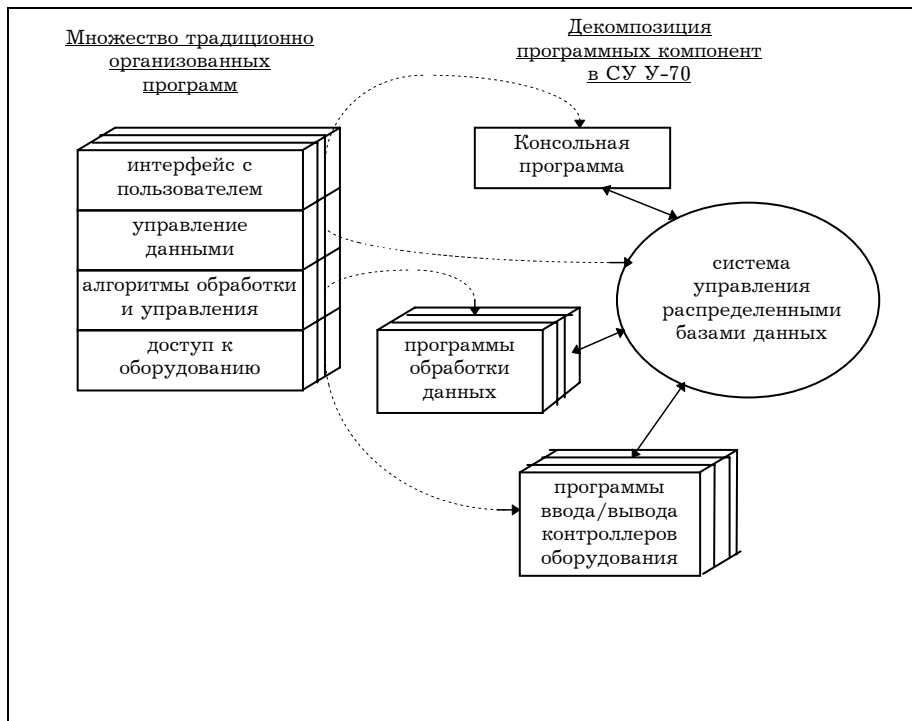


Рис. 10. Декомпозиция традиционной прикладной программы.

В соответствии с потоками данных прикладные программы делятся на управляющие и программы обработки измеренных технологических данных. Адекватность информационной модели технологическому процессу обеспечивают постоянно выполняющиеся программы обработки измерений, которые обновляют в БД состояния измеряемых физических параметров каждый суперцикл ускорительного комплекса. Тогда, сколько бы операторов ни подключалось к СУ в режиме наблюдения, программные системы организованы так, что при этом не инициализируются новые программы обработки данных, тем самым значительно сокращая потребность в вычислительных мощностях.

Интерфейс человек-система управления рассматривается как множество операций над объектами информационной модели, реализуемый в виде отдельной консольной программы, которая может быть создана на разных платформах с применением различных графических пакетов. В каждой реализации консольной программы принципы взаимодействия с оператором унифицированы и не зависят от конкретной установки и особенностей технологического процесса. С точки зрения пользователя, сессия работы с системой управления строится на четырех наборах основных операций:

1. Выбор установок, технологических подсистем и задач оператора. В настоящее время описанное в базах данных ССУДА дерево выбора содержит несколько тысяч вершин.
2. Операции редактирования, спасения, восстановления и др. над элементами экранной таблицы, отображающей текущие состояния параметров, относящихся к выбранной задаче оператора. Задачи оператора (конечные вершины дерева) составляют около 70% всего дерева выбора, а общее количество измеряемых и управляющих параметров информационной модели ускорительного комплекса У-70 исчисляется десятками тысяч.
3. Операции графического представления значений элементов экранной таблицы и их функциональных зависимостей.
4. Вывод специфической картинки, хранящейся в определенном файле и подготовленной прикладной программой.

Разработан и реализован механизм защиты от выполнения коррелирующих воздействий на одну установку или технологическую подсистему при одновременной работе любого числа операторов с различных консолей, независимо от места их расположения. Реализация данного механизма осуществлена посредством специального информационного и программного обеспечения.

Главу завершает обсуждение трех направлений возможного дальнейшего развития программных систем контроля и управления ускорителями. Эти направления тесно связаны с расширением информационной модели до полного отображения всех параметров технологического процесса, установок и самой СУ, развитием баз дан-

ных ускорителей, повышением интеллектуального уровня СУ путем развития алгоритмизации автоматической оптимизации параметров пучка.

В Заключении отмечается, что главным достигнутым итогом выполненной работы является вклад в обеспечение проведения физических сеансов на ускорительном комплексе ИФ-ВЭ, внесенный посредством адаптации методологий и технологий науки программирования для организации и осуществления контроля и управления ускорителями. Полученные при этом основные научные и практические результаты, вошедшие в диссертацию, можно сформулировать следующим образом:

1. Предложен принципиально новый концептуальный подход к проектированию и построению программных систем контроля и управления ускорителями как абстрактных логических конструкций с ориентацией на технологический процесс производства пучков заряженных частиц, а не на оборудование ускорительных установок. В процессе проектирования и разработки учитываются особенности автоматизации больших ускорителей и ускорительных комплексов научного назначения, а также специфика организации работы над крупными программными проектами.
2. Сформулированы базовые требования к СУ, осуществлено логическое проектирование и выведена архитектура программных и информационных составляющих модели программных систем, которые обеспечивают хранение и отображение текущих устойчивых дискретных состояний технологического процесса в физических и технологических терминах. Архитектура основана на анализе потоков данных и представляет собой пять основных слабосвязанных программно-информационных узлов.
3. На основе теории реляционных баз данных формально определено внешнее представление данных в форме трехмерных таблиц, разработана внутренняя схема организации их хранения и быстрого доступа. С учетом конкретных параметров внешней среды схема дважды реализовалась на ускорительном

комплексе У-70 как центральный информационный узел архитектуры программных систем с целью хранения динамических данных и обеспечения доступа к ним в режиме реального времени.

4. Разработана и создана специализированная система управления распределенными данными реального времени ССУДА, которая охватывает все иерархические уровни СУ, содержит и обслуживает информационную модель текущего состояния технологических процессов. На основе проектных решений ССУДА определены единые базовые типы абстрактных данных (вектор и структура) и информационных объектов (ССУДА-таблицы), над которыми осуществляют операции все программные компоненты системы управления ускорителями.
5. Решены задачи организации программного обеспечения нижнего уровня, удовлетворяющего требованиям синхронизации с технологическим процессом и реагируемости на внешние события. Унифицирован и формализован доступ к интерфейсной электронике. Показаны особенности применения на ускорительном комплексе У-70 в разных реализациях программных систем встроенных микроконтроллеров и универсальных интеллектуальных контроллеров, выполненных на базе микропроцессорной техники. С целью обеспечения работы в режиме реального времени интеллектуальных контроллеров на базе микропроцессоров Intel 8086 и Intel 80186 разработана и создана специализированная многозадачная, многотерминальная операционная система реального времени VPV.
6. Разработаны прикладные протоколы и программное обеспечение транспортировки сообщений в неоднородной коммуникационной среде системы управления комплекса У-70. Обеспечена реализация распределенной обработки данных в реальном масштабе времени по всем уровням СУ.
7. Исследованы возможности и предложены правила построения наиболее крупного архитектурного узла модели — программ обработки данных — как интегрированной прикладной программной системы, объединенной на принципах унифицирован-

ного доступа и единой организации обрабатываемой информации. Заложенные в исследованиях минимизация дублирования разработок, возможность многоцелевого использования разработанных прикладных программных компонент дают наибольший эффект в экономии трудозатрат и сроков создания прикладного ПО. Определены четыре интеллектуальных уровня СУ, достигаемых посредством программного обеспечения обработки данных.

8. Сформулированы базовые функциональности и организация графического интерфейса человек-система управления, осуществлена реализация интерфейса в виде отдельно выполняющейся программы на рабочей станции и на персональном компьютере. Принципы построения пользовательского интерфейса унифицированы и формализованы, вследствие чего они не ориентируются и не зависят от особенностей конкретного ускорителя или графического пакета.
9. Определены главные направления дальнейшего развития и модернизации программных систем контроля и управления ускорительного комплекса У-70 по мере создания новых аппаратных средств, появления новых программных технологий и разработки алгоритмов управления с целью автоматической настройки и оптимизации режимов работы ускорительных установок.
10. Разработанный подход к созданию программных систем позволил дважды успешно решить задачу управления ускорителями посредством средств вычислительной техники, мощности которой, по крайней мере, на порядок меньше в сравнении с зарубежными аналогами, что, соответственно, значительно снизило стоимость систем управления.

Список литературы

- [1] Воеводин В.П., Мамучашвили Н.Г. Специализированная файловая система для обслуживания сменных дисков ЭВМ ЕС-1010. — В сб.: Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по мини-ЭВМ. — Рига, 1978, с.51.
- [2] Воеводин В.П. Имитация внешних устройств в дисковом мониторе ЭВМ ЕС-1010: Препринт ИФВЭ 78-146, Серпухов, 1978.
- [3] Воеводин В.П. Новый пакетный режим на ЭВМ ЕС-1010: Препринт ИФВЭ 79-35, Серпухов, 1979.
- [4] Беляевская Л.В., Воеводин В.П., Калинин П.А. DISCOL — диалоговый язык в системе автоматизации настройки и управления бустером. — В сб.: Материалы II Всесоюзного совещания “ДИАЛОГ-79”. — Протвино, 1979, с.123.
- [5] Балакин С.И., Воеводин В.П. Банк данных на ЭВМ ЕС-1010 в автоматизированной системе управления бустером. — В сб.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по мини-ЭВМ. — Рига, 1980, с.36.
- [6] Балакин С.И., Богатырев С.Л., Брук В.Л., Воеводин В.П., Ломов А.П., Почтарев Г.Г., Тишин В.Г. Связь ЭФМ ЕС-1010 с системой АСИУ бустерного синхротрона ИФВЭ. — В сб.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по мини-ЭВМ — Рига, 1980, с.34.
- [7] Балакин С.И., Брук В.Л., Воеводин В.П., Почтарев Г.Г. Использование ЭВМ ЕС-1010 для наладки и тестирования аппаратуры АСИУ бустерного синхротрона: Препринт ИФВЭ 81-50, Серпухов, 1981.
- [8] Балакин С.И., Воеводин В.П. Информационные потоки и организация вычислений в системе автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 81-64, Серпухов, 1981.

- [9] Балакин С.И., Воеводин В.П. Препроцессор языка FORTRAN в системе автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 81-170, Серпухов, 1981.
- [10] Балакин С.И., Воеводин В.П. Программные диалоговые средства в системе автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 83-6, Серпухов, 1983.
- [11] Балакин С.И., Воеводин В.П. Роль и место программных диалоговых средств в системе автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном ИФВЭ. — В сб.: Материалы III Всесоюзной конференции “Диалог человек-ЭВМ”, Протвино, 1983, с.97.
- [12] Антипов В.П., Балакин С.И., Богатырев С.Л., Брук В.Л., Воеводин В.П., Говорун В.Н., Дунайцев А.Ф., Екимов А.В., Ермолин Ю.В., Мамаков П.В., Почтарев Г.Г., Рыбаков В.Г., Сытин А.Н., Тишин В.Г. Информационно-измерительный комплекс управления и контроля типовой технологической системой протонного синхротрона на базе микро-ЭВМ. — Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по модульным информационно-вычислительным системам, Иркутск, 1983, с.100.
- [13] Антипов В.П., Брук В.Л., Воеводин В.П. Межмашинные связи в системах автоматизации кольцевых ускорителей ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 84-181, Серпухов, 1984.
- [14] Воеводин В.П. Современные тенденции в программировании и системы контроля и управления ускорителями: Препринт ИФВЭ 84-104, Серпухов, 1984.
- [15] Антипов В.П., Балакин С.И., Богатырев С.Л., Брук В.Л., Воеводин В.П., Мамаков П.В., Миличенко Ю.В., Мязэ Э.А., Рыбаков В.Г., Сытин А.Н., Тишин В.Г., Троянов Е.Ф. Общая структура и организация системы автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном ИФВЭ. — В сб.: Материалы IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1985, т.1, с. 231.

- [16] Балакин С.И., Воеводин В.П., Детиненко А.Ф. Информационно-справочная система в автоматизации контроля и управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 85-37, Серпухов, 1985.
- [17] Балакин С.И., Воеводин В.П. Интеллектуальный графический интерфейс на базе микро-ЭВМ МЭ-80 в системе СУММА: Препринт ИФВЭ 85-38, Серпухов, 1985.
- [18] Балакин С.И., Брук В.Л., Воеводин В.П., Тишин В.Г. Автоматизированная система управления бустерным синхротроном ИФВЭ. – В сб.: Тезисы докладов XIX всесоюзной школы по автоматизации научных исследований, Новосибирск, 1985, с.11.
- [19] Воеводин В.П. Распределение ресурсов в двухмашинном вычислительном комплексе автоматизированной системы управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 86-64, Серпухов, 1986.
- [20] Воеводин В.П., Детиненко А.Ф. Элементы реляционной базы данных в автоматизированной системе управления бустерным синхротроном: Препринт ИФВЭ 86-63, Серпухов, 1986.
- [21] Балакин С.И., Воеводин В.П., Клименков Е.В. Средства унификации диалога с прикладными программами в системе автоматизации бустерного синхротрона: Препринт ИФВЭ 88-146, Серпухов, 1988.
- [22] Воеводин В.П., Детиненко А.Ф., Ковальцов В.И., Пузынин В.И. Проблемно-ориентированные трехмерные структуры данных в АСУ ТП: Препринт ИФВЭ 88-109, Серпухов, 1988.
- [23] Воеводин В.П., Детиненко А.Ф., Ковальцов В.И., Пузынин В.И. Специализированная система управления данными для быстрых технологических процессов. — М.: Наука, “Программирование”, № 5, 1989, с.91-95.
- [24] Воеводин В.П. Один подход к проектированию программных систем в автоматизации протонных кольцевых ускорителей: Препринт ИФВЭ 89-43, Серпухов, 1989.

- [25] Воеводин В.П. Концептуальная модель программной системы в автоматизации кольцевых протонных ускорителей: Препринт ИФВЭ 89-81, Серпухов, 1989.
- [26] Воеводин В.П., Дунайцев А.Ф. Автоматизация ускорительных установок. – В сб.: Труды международной школы по вопросам применения ЭВМ в физических исследованиях, Дубна, Д10-89-70, 1989, с.229.
- [27] Воеводин В.П., Клименков Е.В. Диалог “Человек-прикладные программы” в системе контроля и управления бустерным синхротроном ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 91-35, Серпухов, 1991.
- [28] Воеводин В.П., Клименков Е.В. Организация прикладных программ в системе контроля и управления бустерным синхротроном ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 91-36, Серпухов, 1991.
- [29] Воеводин В.П., Губаева М.М., Зайцев Л.Ф., Зенин В.А., Ивченко В.Е., Карлов Г.Д., Масаев А.Б., Медведев В.Ф., Павлычев В.В., Радомский Н.В., Рыжов А.И., Теняев С.А., Уточкин Б.А. Система автоматизации линейного ускорителя-инжектора ускорительного комплекса ИФВЭ. – В сб.: XIV совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994, т.2, с.137.
- [30] Komarov V., Sytin A., Trojanov E., Voevodin V., Yurpalov V. Upgrading of the U-70 complex control. — In: Proceedings of the ICALEPCS'95, Chicago, Illinois, USA, 1995, V.2, p.930.
- [31] Komarov V., Milichenko Y., Voevodin V., Yurpalov V. Draft design study for the control system of the U-70 complex. — IHEP&CERN, PS/CO/Note 96-26, Switzerland, Geneve, 1996.
- [32] Воеводин В.П. ССУДА — Специализированная Система Управления распределенными Данными реального времени. – В сб.: XVI совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1998, т.1, с. 135.

- [33] Балакин С.И., Воеводин В.П., Клименков Е.В. Организация прикладного программного обеспечения контроллеров оборудования в новой системе управления комплексом У-70. – В сб.: XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, т.1, с. 176.
- [34] Воеводин В.П., Елин А.П., Комаров В.В. Вычислительные средства системы управления ускорительного комплекса У-70. – В сб.: XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, т.1, с. 138.
- [35] Воеводин В.П., Кузьменко В.Г., Щербаков С.Е. Пользовательский интерфейс в новой системе управления ускорительного комплекса У-70. – В сб.: XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, т.1, с. 141.
- [36] Воеводин В.П., Комаров В.В., Миличенко Ю.В., Перриолла Ф. Система управления ускорительным комплексом У-70. // Приборы и системы управления, № 6, 1999, с.1-4.
- [37] Voevodin V. Software Architecture of the U-70 Accelerator Complex New Control System. In.: Proceedings of the ICALEPCS'99, Trieste, Italy, 1999, p.457.
- [38] Komarov V., Milichenko Yu., Voevodin V., Perriollat F. New Integrated Control System of IHEP Accelerators Complex. — In: Proceedings of the ICALEPCS'99, Trieste, Italy, 1999, p.639.

Рукопись поступила 29 мая 2000 г.

В.П.Воеводин.

Разработка модели программных систем контроля и управления ускорителями
и ее реализация на ускорительном комплексе ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 29.05.2000. Формат $60 \times 84/16$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,73. Уч.-изд.л. 1,56. Тираж 100. Заказ 128. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2000-19, И Ф В Э, 2000
