

## СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСКОРИТЕЛЯМИ В ИЯФ (Состояние и перспективы развития)

А.Н. Алешаев, А.М. Батраков, С.Д. Белов, В.В. Каргальцев,  
В.Р. Козак, Э.А. Купер, В.И. Купчик, Б.В. Левичев,  
А.В. Леденев, В.И. Нифонтов, Ю.И. Ощепков, Г.С. Пискунов,  
И.Я. Протопопов, С.В. Тарарышкин, Ю.И. Эйдельман  
Институт ядерной физики СО АН СССР  
Новосибирск, 630090

### История и принципы

Первые работы по использованию ЭВМ для целей автоматизации управления ускорителями были начаты в 1970 г. на накопителе ВЭПП-3, когда решалась задача повышения светимости накопителя с помощью перестройки магнитной системы экспериментального промежутка при наличии циркулирующего пучка, что требует высокой точности и согласованности изменения характеристик элементов магнитной структуры. При этом использовалась ЭВМ 2-го поколения «Минск-22», управляющая программа которой была написана в кодах ЭВМ. Однако очень скоро стало ясно, что для продолжения работ по управлению УНК рациональнее использовать не ЭВМ общего пользования, какой в то время являлась машина «Минск-22», а специальную ЭВМ. С 1972 г. начата активная работа по автоматизации как существовавших, так и вновь строящихся ускорительных установок: ВЭПП-2М, НАП-М (первая половина 70-х), ВЭПП-4 (вторая половина 70-х), «Сибирь-1», БЭП (начало 80-х) и др., при этом использовались достаточно разнородные ЭВМ: «Минск-22», М-6000, «Одра-1300», ЭВМ серии СМ «Электроника».

В первых работах по управлению была автоматизирована лишь одна из многих подсистем накопителя ВЭПП-3 — питание магнитной системы. В дальнейшей степени охвата установкой системой управления постоянно росла, причем в процессе этого роста отмечалось непрерывное уменьшение доли систем ручного управления. Так, система управления комплекса ВЭПП-4 проектировалась уже с ориентацией на полностью машинное управление. Затраты на дублирующие ручные подсистемы управления на комплексе такого масштаба оказываются весьма значительными. В то же время отсутствие возможности воздействия на систему без помощи ЭВМ приводит к специфичному требованию к аппаратуре управления — однажды заданные значения должны сохраняться в ней вне зависимости от работоспособности управляющей ЭВМ. На ранних этапах развития систем управления, когда надежность работы ЭВМ не была достаточно высокой, возможность продолжать работу комплекса в заданном режиме была очень полезной.

Такое отсутствие дублирующих подсистем управления является характерным для современных систем управления в ИЯФ, что дает возможность сформулировать следующий принцип: не следует делать «ручками с пульта» то, с чем прекрасно справляется система управления через ЭВМ.

При разработке самых первых версий системы управления ВЭПП-3 было решено, что работу по созданию программного обеспечения не следует поручать программистам-профессионалам, так как они, не

будучи специалистами в вопросах, касающихся работы конкретных узлов и подсистем комплекса, не сумеют написать программы, в должной степени учитывающие специфику задачи. В то же время сложность установок, экспериментальный характер их работы приводит к трудноформулируемым, расплывчатым спецификациям при постановке задачи. В этих условиях эффективнее поручить разработку прикладного программного обеспечения лицам, более осведомленным в вопросах, связанных с работой установки.

В настоящее время основные ускорительные установки ИЯФ имеют в составе систем управления ЭВМ серии «Одра-1300» или совместимые с ними. Выбор в 1972 г. для системы управления ВЭПП-3 ЭВМ «Одра-1304» был в значительной степени делом случая. Однако использование этой ЭВМ оказало существенное влияние на дальнейшее развитие систем управления в ИЯФ.

Машины серии «Одра-1300» являются аналогами известного семейства ICL-1900, разработанного во второй половине 60-х годов, т. е. практически одновременно с семейством IBM-360. Они относятся к классу так называемых универсальных ЭВМ и обладают существенно лучшими параметрами по сравнению с распространенными в 70-х годах мини-ЭВМ. Использование в системе управления достаточно мощной ЭВМ позволило сразу выйти на высокий уровень, качественно отличный от обеспечивавшегося доступными мини-ЭВМ. Значительный по тем временам объем оперативной памяти и высокое быстродействие дали возможность создавать необходимое программное обеспечение систем управления исключительно на языках высокого уровня, что, в свою очередь, и позволило привлечь к созданию программного обеспечения тех самых людей, которым предстояло им пользоваться в дальнейшем, — физиков, работающих на установке, инженеров, разрабатывающих аппаратуру и ведущих наладку комплекса, и даже студентов-практикантов.

Отмеченный здесь открытый характер наиболее динамичной компоненты систем управления — программного обеспечения, возможность его расширения и модификации персоналом, эксплуатирующим установку, является типичным для большинства систем управления в ИЯФ. Это позволяет сформулировать второй принцип построения систем управления: прикладное программное обеспечение таких систем должно создаваться теми людьми, которым предстоит с ним работать, а для этого весьма желательно обеспечить возможность использования языка высокого уровня в рамках доступной и простой в освоении системы подготовки программ.

В ходе создания и эксплуатации системы управления, естественно, приходится привыкать к активному использованию ЭВМ. Зачастую обнаруживается, что

машине доверено слишком многое, что автоматизация и компьютеризация начинают мешать работе. Поэтому чрезвычайно важно критически, с осторожностью относиться к новым возможностям, которые могут быть, в принципе, обеспечены ЭВМ. Задача автоматизации состоит прежде всего в освобождении оператора от рутинной и утомительной работы по занесению сотен значений режимов элементов и постоянному контролюрованию их, в рациональной организации удобных и эффективных измерительных процедур, в простом и доступном для оператора представлении информации на языке значений физических и технологических величин, в обеспечении средств визуализации протекающего на установке процесса. И лишь после этого следуют оптимизация режимов установки и введение обратных связей через ЭВМ. Успехи или неудачи многих систем управления в ИЯФ в значительной степени определялись тем, насколько рационально разработчики совмещали общность, универсализм подхода с конкретностью требований реальной жизни.

Таким образом, может быть сформулирован третий принцип, которым руководствовались создатели систем управления: универсальность, глобализм требований к системе управления часто исключают даже возможность ее создания, поэтому включение в систему на этапе проектирования возможностей, которые могут понадобиться лишь в необозримом будущем, чаще всего неоправданно. С другой стороны, система должна допускать возможность ее непрерывного расширения и модернизации без существенного изменения структуры и идеологии.

#### Структура аппаратных средств и выбор ЭВМ

При решении проблемы сопряжения ЭВМ с экспериментальным оборудованием был пройден ряд эволюционных этапов. На первом этапе при запуске системы управления ВЭПП-4 основное радиоэлектронное оборудование было выполнено в конструктиве «Вишня» в виде так называемых автономных функциональных узлов (АФУ). АФУ создавались для решения конкретных задач на основе стандартизированных плат: ОЗУ, автомат управления, интерфейс с последовательной системой связи, многоканальные АЦП или ЦАП.

АФУ непрерывно с циклом, связанным с циклом ускорителя, проводил измерения (или выдавал значения на выходах ЦАП) и складывал полученные значения в ОЗУ. Взаимодействие с ЭВМ сводилось к записи или чтению массива однородных данных. Накладные расходы на уровне ОС для организации такого обмена по каналу прямого доступа ЭВМ оказывали незначительное влияние на результирующее быстродействие, так как передавался сразу большой блок информации. Все устройства связывались с ЭВМ через последовательную систему передачи данных с трехступенчатой древовидной схемой коммутации.

По такой схеме была построена система управления ВЭПП-4. В ней использовалось 6 ЭВМ «Одра-1325»: по одной машине на каждую из подсистем комплекса: инжектор, промежуточный накопитель ВЭПП-3, канал транспортировки ВЭПП-3 — ВЭПП-4, основное кольцо накопителя ВЭПП-4, высокочастотный генератор Гирокон. Позднее была добавлена ЭВМ контроля технологических параметров всего комплекса (вакуум, температура, радиационная обстановка). В таком составе система функционировала в 1978—79 гг.

Время жизни ускорителя обычно составляет не од-

но десятилетие. Он непрерывно изменяется и модернизируется: реализуются новые идеи, возникают новые потребности. Система управления должна эволюционировать во времени вместе с ускорителем, причем этот процесс идет на фоне быстрого прогресса в области электроники. Необходимость непрерывной модернизации аппаратуры управления с расчетом на длительную перспективу потребовала перехода на более универсальный машинно-независимый стандарт. Единственным приемлемым стандартом в то время был КАМАК. Все оборудование, разработанное для ВЭПП-4, было полностью ориентировано на применение последовательной сети связи ВЭПП-4 и поэтому его использование в других системах было затруднено. Таким образом, еще одним стимулом для перехода на КАМАК явилась необходимость унификации аппаратных средств в рамках всего Института. Начиная с 1978 г., практически все электронное оборудование для решения задач управления разрабатывалось и выпускалось в стандарте КАМАК.

Сопряжение аппаратуры в стандарте КАМАК с универсальными ЭВМ сталкивается с некоторыми трудностями, обусловленными заложеной в стандарте высокой интерактивностью взаимодействия с ЭВМ. КАМАК по сути дела ориентирован на использование так называемого программного обмена. В нашем случае реализация программного обмена была практически невозможной, поскольку ЭВМ не рассчитана на работу пользовательских программ непосредственно с устройствами ввода-вывода—все обмены осуществляются при посредничестве операционной системы, что резко снижает быстродействие.

Первым шагом для решения этой проблемы была разработка специализированного контроллера крейта, подключаемого к системе последовательной связи и осуществляющего простейшие взаимодействия с модулями в крейте. В контроллере размещалось ЗУ, в которое предварительно заносилась управляющая информация: N, A, F, ожидание Q, LAM, переход на следующую ячейку ЗУ и т. д. Такой контроллер позволял генерировать необходимую информацию и передавать в ЭВМ лишь «чистые» структурированные данные. Этот контроллер позволял получать удовлетворительные временные характеристики при работе с оконечными устройствами, однако при многопрограммном режиме, характерном для систем управления, возникли проблемы организации взаимодействия «контроллер—программы».

Следующий шаг—использование интеллектуального контроллера крейта, представляющего собой 16-рядную ЭВМ, имеющую упрощенную систему команд и малую оперативную память. Его применение было связано с известными проблемами, характерными для многих систем конца 70-х годов: мини-ЭВМ на верхнем уровне и интеллектуальный контроллер, построенный на маломощном микропроцессоре, на нижнем уровне. Главный недостаток этих систем—сложность программирования контроллеров, требовавшего высокой квалификации, что часто приводило к необходимости привлечения профессионалов, а это противоречило сформулированному выше принципу: программное обеспечение разрабатывают физики, работающие на комплексе. Поэтому такие контроллеры нашли применение лишь в замкнутых системах с фиксированной задачей, в которых не требовалось модификации программ.

Радикальное решение было принято в конце 1981 г. — разработать интеллектуальный контроллер крейта с системой команд ЭВМ «Одра-1300». В 1983 г. такой контроллер, получивший условное название «Одренок», был разработан. Вначале «Одренок» использовался как подчиненный контроллер крейта. Летом 1985 г. мы отказались от дальнейшего использования ЭВМ «Одра» и в системах управления полностью перешли на «Одрят».

«Одренок» выполнен в виде контроллера крейта в КАМАК-модуле 2М. Это фактически 24-разрядная ЭВМ с системой команд «Одра-1300» (ICL-1900). Основные параметры:

- адресное пространство — 4 М слов;
- оперативная память — 64 К слов;
- быстродействие — около 250 тыс. оп/с по Гиббсону;
- наличие режимов супервизор/задача;
- мультипрограммность, быстрое аппаратное переключение контекста при смене задач;
- аппаратно реализованная арифметика с плавающей запятой;
- наличие интегрированных на уровне архитектуры средств взаимодействия с магистралью КАМАК.

Микропрограммная реализация дала возможность изменить в нужном нам направлении исходную архитектуру ICL-1900. Помимо введения в архитектуру средств для взаимодействия с магистралью КАМАК были сделаны еще некоторые важные усовершенствования, полезные в системах реального времени. Одним из таких нововведений является механизм переключения процессов. Дело в том, что наличие средств для мультипрограммирования является принципиально важным для ЭВМ, используемой в системах управления. Для систем управления ускорителем, который сам является не только инструментом, но и объектом исследований, характерны частая смена режимов, изменение конфигурации системы, наличие большого процента исследовательских задач. Наличие средств мультипрограммирования, традиционно рассматриваемых как принадлежность достаточно крупных машин, оказывается полезным и на уровне автономного контроллера крейта. С точки зрения ОС все программы, ожидающие сигнала прерывания от модулей в крейте, являются активными. При появлении ожидаемого события процессор на микропрограммном уровне сам запустит требуемую программу в соответствии с ее приоритетом. Таким образом, на микропрограммном уровне реализована наиболее критическая по времени выполнения часть ОС, что позволило получить быстрые времена реакции системы на внешние события.

Для оснащения систем управления ускорительно-накопительными комплексами в ИЯФ была разработана широкая номенклатура блоков в стандарте КАМАК. Непрерывно возрастающая сложность как самих ускорителей, так и проводимых на них экспериментов предъявляет часто специфические требования к параметрам и структуре разрабатываемых модулей. Так, их метрологические характеристики, быстродействие и помехозащищенность должны быть адекватны условиям работы установки. Вместе с тем структурные и схемные решения должны обеспечивать эффективное использование вычислительного потенциала ЭВМ, включенных в систему.

Например, при решении проблемы передачи опорных напряжений в системах стабилизации питания

традиционно используются цифро-аналоговые преобразователи, построенные на принципе широтно-импульсной модуляции (ЦАП-ШИМ). Расположенный в крейте 8-канальный блок вырабатывает широтно-модулированные сигналы, которые по коаксиальному кабелю передаются непосредственно к системе регулирования. После гальванической развязки цифровой сигнал управляет аналоговым узлом, встроенным в соответствующий источник. Таким способом при минимальных затратах реализуется точность управления порядка 0.01%. Для прецизионных систем регулирования разработан ЦАП-ШИМ с погрешностью порядка 0.001%.

Заметную часть в системах управления и технологического контроля обычно занимают многоканальные измерения постоянных или квазипостоянных напряжений. При этом источники сигналов зачастую размещены на значительные расстояния. Для обеспечения необходимого уровня подавления помех различного рода разработаны интегрирующие АЦП с переменным временем интегрирования входного сигнала. В зависимости от требуемой точности время измерения программным образом изменяется от 5 до 320 мс, шкала при этом изменяется от 13 до 20 двоичных разрядов. Погрешность АЦП около 0.01% в диапазоне температур 20—50° С, аналоговая часть изолирована от цифровой. Управление осуществляется через оптронные пары, а питание — через высокочастотные трансформаторы с минимальной проходной емкостью. АЦП имеет встроенную память на 256 слов. Для организации многоканальных измерений прибор комплектуется 64-канальными двухпроводными аналоговыми коммутаторами. Предусмотрена возможность управления коммутатором непосредственно от АЦП по передней панели, для чего информация об адресах каналов, подлежащих измерению, предварительно должна быть занесена в АЦП. После окончания измерительного цикла по сигналу прерывания производится считывание полученных результатов из встроенной памяти.

Необходимость анализа однократных импульсных сигналов вызвала появление нового класса приборов — регистраторов быстропротекающих процессов. Эти приборы состоят из достаточно быстродействующего АЦП, автомата управления, встроенной памяти и интерфейсной части, позволяющей оперативно управлять частотой дискретизации и изменять пределы измерений исследуемого сигнала. Регистрация и изучение формы импульсных сигналов в различных системах ускорительно-накопительного комплекса с последующей обработкой в ЭВМ позволила решить ряд важных задач:

- контролировать поведение (ток и координаты) пучка во время инжекции как на первом, так и на последующих оборотах и по результатам этих измерений вести оптимизацию режима перепуска;
- наблюдать сигналы малой амплитуды от датчиков, находящихся в условиях сильных электромагнитных наводок, путем предварительной регистрации наводки при отсутствии полезного сигнала и последующего вычитания ее из зарегистрированного рабочего сигнала;
- регистрировать и изучать развитие непредсказуемых по времени событий путем записи результатов измерений в циклический буфер с остановкой при возникновении события;
- фиксировать, обрабатывать и хранить в ЭВМ интересующую оператора информацию, работая с

регистратором как с программноуправляемым пультовым осциллографом и т. д.

Приведем основные параметры двух наиболее популярных регистраторов. АЦП-101С: разрядность 10 бит, минимальный интервал между измерениями 1 мкс, объем ОЗУ 4 К слов, полоса обрабатываемых частот 400 кГц. АЦП-850С: 8 бит, 50 нс, 1 К слов и 4 МГц, соответственно. Для создания многоканальных измерительных систем существуют модификации регистраторов со встроенными быстродействующими 4-канальными коммутаторами аналоговых сигналов. Количество измеряемых каналов определяется программно. Метрологические характеристики соответствуют АЦП-850С и АЦП-101С.

Наряду с вышеупомянутыми приборами разработано множество модулей, обеспечивающих функциональную полноту комплекта. Это генераторы временных интервалов, таймеры, измерители мгновенных значений импульсных сигналов, многоканальные модули для массового контроля таких параметров, как вакуум и температура, позиционные датчики, управляющие регистры, графические дисплеи и т. д.

### Программное обеспечение систем управления

Аппаратные средства, сколь бы совершенны они ни были, не могут сами по себе обеспечить функционирование всей системы управления. Без развитого программного обеспечения не может существовать и система управления ускорителем. При этом экспериментальный характер большинства ускорителей, сложность управляемых объектов, невозможность задания «жесткого» режима работы предъявляют особые требования к программному обеспечению систем управления такими установками. Одним из наиболее важных и в то же время наиболее трудно удовлетворяемых требований к программному обеспечению является требование высокой гибкости, адаптируемости к условиям конкретного эксперимента, конкретного режима на самых разных этапах существования ускорителя. Как уже отмечалось, на большинстве ускорительных установок ИЯФ управление отдельными узлами и подсистемами возможно только через ЭВМ. Следовательно, система управления вводится в строй одной из первых, обеспечивая как с аппаратной, так и с программной стороны режимы всего пуско-наладочного периода, периода интеграции отдельных узлов и подсистем в единый ускорительный комплекс. Если на этом этапе применяется практически то же самое оборудование, которое будет использоваться в дальнейшем в экспериментах, то с программным обеспечением ситуация иная. В процессе отладки отдельных узлов и подсистем комплекса требуется набор программ, обеспечивающих их проверку в динамическом режиме. Настройка и отладка взаимодействия отдельных установок, входящих в состав комплекса, требует другого набора программ. Наконец, вывод всего комплекса в рабочее состояние и его функционирование в этом режиме снова приводит к смене практически всего набора программ.

Поскольку на всех этапах ускоритель обслуживается большим количеством людей самой разной квалификации, программное обеспечение должно быть легко доступным, т. е. взаимодействие оператора с программным обеспечением необходимо сделать максимально простым, наглядным, удобным — реализовать так называемый «дружественный интерфейс».

Высокая сложность процесса управления, невозможность в деталях предвидеть поведение установки диктует необходимость обеспечения ведущей роли оператора и возможности его вмешательства в работу систем на любом этапе. Кроме соответствующих аппаратных средств, для выполнения этого требования необходимы и специальные программные средства, предоставляющие оператору информацию о состоянии установок комплекса в наиболее удобном для восприятия виде и позволяющие в достаточно произвольный момент времени изменить ход управляющих процессов в необходимом направлении.

Программное обеспечение систем управления можно разделить на две категории:

- собственно управляющие программы, образующие прикладное, проблемно-ориентированное программное обеспечение, которые создаются, как уже отмечалось, физиками и инженерами;
- программное обеспечение, служащее инструментом для создания и выполнения таких программ, т. е. собственно системное программное обеспечение, которое должно создаваться уже специалистами, обладающими соответствующими знаниями и навыками в области ОС, разработки языков программирования, написания трансляторов и т. д.

При создании автоматизированной системы управления необходимо выбрать язык, на котором будет написано прикладное программное обеспечение. Традиционные языки программирования высокого уровня, и в первую очередь Фортран и Бэйсик, зачастую кажутся разработчикам неподходящими кандидатами, поскольку в них не отражена специфика данной области применения. Встречающиеся версии этих языков, ориентированные на работу с аппаратурой, больше подходят для автоматизации небольших стендов. Неудивительно, что при разработке ранних систем управления большинство разработчиков изобретают свой собственный язык, хотя и известны случаи использования стандартного Фортрана.

После выбора языка (а чаще одновременно с выбором) возникает вопрос о его реализации, который в упрощенном виде может быть решен одним из трех способов:

- использование фирменных средств реализации языка;
- разработка интерпретатора для выполнения на данной ЭВМ программ, написанных на выбранном языке;
- разработка транслятора программ с выбранного языка в коды машины.

Возможность следовать первому способу следует рассматривать скорее как счастливую случайность, чаще возникает необходимость собственной реализации собственного языка. Поскольку интерпретаторы, как правило, несколько проще, то обычно, мирясь с определенной потерей эффективности, реализуют именно интерпретаторы, на которые возлагают еще и некоторые функции операционных систем.

Программное обеспечение первых систем управления ИЯФ (ВЭПП-3, 1973—77 гг.; ВЭПП-2М, 1974 г.; НАП-М, 1975 г.) базировалось на интерпретаторах. Интерпретатор системы управления ВЭПП-3 на ЭВМ типа «Одра» представлял собой сложную оверлейную программу, написанную на Фортране, которая реализовала, кроме функций исполнительской системы, так-

же функции редактора текстов исходных программ-«процессов», библиотекаря, поддержки ленточного архива и многие другие. Язык программирования, определяемый этим интерпретатором, несмотря на неуклюжесть синтаксиса, давал возможность организовать весьма сложные алгоритмы в процессах управления, использовать диалоговый режим и графический дисплей. Многие идеи по организации управляющего процесса не потеряли своей ценности до настоящего времени и в том или ином виде реализованы и в современных системах управления, созданных в ИЯФ.

Система управления комплекса НАП-М также использовала интерпретатор на ЭВМ типа «Одра», однако в данном случае написанный на Ассемблере, что позволило существенно повысить скорость его работы и отказаться от оверлея. Программы на входном языке этой системы для обеспечения максимальной эффективности исполнения могли содержать кодовые вставки.

Программное обеспечение системы управления комплекса ВЭПП-2—ВЭПП-2М, которая использует ЭВМ М-6000, также представляет собой одну большую программу, написанную на Ассемблере. В системе создан и применяется некоторый достаточно примитивный язык, позволяющий описать программу перехода комплекса из одного режима в другой. Комплекс может находиться в одном из четырех режимов: накопление или перепуск электронов, накопление или перепуск позитронов. Кроме интерпретатора, в управляющей программе можно выделить такие части:

- диспетчер организации работы параллельных процессов;
- система опроса внешних устройств;
- процесс изменения режимов работы;
- монитор общения с оператором.

В настоящее время эта система модернизируется и перестраивается для использования микро ЭВМ «Одренок».

Несмотря на относительную простоту реализации языка программирования системы управления на базе интерпретатора, этот подход неизбежно ограничивает возможности развития системы: доступ к системе управления становится ограниченным рамками единого экзотического языка, который, в силу своей специализации, может оказаться не адекватным возникающим новым задачам. Кроме того, интерпретация существенно замедляет выполнение рабочих программ.

Поэтому при разработке системы управления ВЭПП-4 от интерпретатора отказались и был выбран путь построения мультипрограммной ОС, в среде которой выполняются собственно управляющие программы. При этом исключается привязка возможностей системы к какому-либо конкретному языку, и в этих условиях могут использоваться как интерпретирующие, так и компилирующие системы программирования. В программном обеспечении системы управления есть интерпретаторы, но они используются, в основном, в качестве калькуляторов для выполнения сложных расчетов. Все программы, работающие в системе управления, написаны на фортраноподобном языке «Тран», компилятор с которого является одной из компонент системы подготовки программ.

Система подготовки программ включает в себя текстовые редакторы, систему компиляции, редактор библиотек и некоторые вспомогательные программы.

Редакторы текстов являются экранно-ориентированными текстовыми процессорами, позволяющими заносить

исходный текст программы в дисковый файл, модифицировать существующий текстовый файл, производя необходимые манипуляции над текстом с использованием редактирующих средств терминала, и т. д.

Система компиляции состоит из различных трансляторов, программы-консолидатора и программы-загрузчика. Все используемые трансляторы генерируют в процессе работы промежуточные коды, которые затем объединяются в единую программу консолидатором. На этом этапе возможно объединение в одной программе фрагментов, написанных на разных языках. Основным языком в системе является упомянутый ранее язык «Тран», являющийся расширенным подмножеством Фортрана. Вся система компиляции работает достаточно быстро, программа средних размеров (1.5—2 тыс. строк) транслируется около 30 с.

Система подготовки программ опирается на богатую библиотеку подпрограмм, которая предоставляет программисту большой набор математических подпрограмм и функций, а также набор подпрограмм для работы с устройствами системы управления, терминалами, графическими дисплеями, файлами, для реализации запросов к ОС.

ОС системы управления комплексов ВЭПП-3 и ВЭПП-4 реализует достаточно стандартный набор функций современных ОС реального времени: распределение памяти, разделение процессорного времени, организация доступа через систему связи к устройствам системы управления, ведение файлового хозяйства, синхронизация работы управляющих программ с работой установки через систему внешних прерываний, организация межпрограммных обменов.

Состав прикладного программного обеспечения системы управления комплекса ВЭПП-4 может быть проиллюстрирован набором программ, работающих в управляющей ЭВМ комплекса в стационарном режиме:

- работающая синхронно с внешним таймером программа, через которую все остальные программы организуют работу с устройствами;
- программа-процесс, обеспечивающая накопление частиц, подъем энергии пучка до энергии эксперимента с нужными параметрами пучков;
- программа «ручной» работы, позволяющая внести изменения в режим любого элемента накопителя;
- программа измерения светимости и поляризации пучков;
- программа, фиксирующая положение места встречи по углу и координатам.

Кроме этих программ, периодически раз в 5 минут запускается программа, проверяющая соответствие состояния элементов накопителя заданным значениям. Кроме этого, оператор может инициировать программы, позволяющие измерить интересующие в данный момент параметры, которые нет необходимости контролировать постоянно. Набор таких программ достаточно велик и индивидуален для каждой установки комплекса.

Важной особенностью упомянутых систем управления является их ориентация на использование единственной управляющей ЭВМ. С появлением в системе «распределенного интеллекта» в нескольких микро ЭВМ нижнего уровня обнаружились и определенные трудности в организации их эффективного использования. В подобных многомашинных структурах представляется затруднительным разделить функции комплекса управляющих программ на достаточно со-

держательные фрагменты, пригодные для выделения в отдельные процессоры, из-за существования сильных информационных зависимостей между всеми подсистемами. Вследствие этого «Одрята» использовались лишь в качестве вспомогательных процессоров нижнего уровня, занятых решением достаточно изолированных и информационно замкнутых задач.

По мере накопления опыта использования «Одрят» в прежних системах управления было отмечено, что при такой структуре системы затрудняется дальнейшее ее развитие и что переход к распределенным структурам становится неизбежным. Создание же распределенной системы выдвигает новые требования к системному программному обеспечению и приводит к некоторому перераспределению ответственности за поддержку тех или иных системных функций. Так, например, связи между программами в разных процессорах должны обеспечиваться единообразно, на уровне операционных систем, которые также организуют совместный доступ к общим базам данных и обеспечивают синхронизацию процессов в масштабе всей сети.

Иерархичность в распределенных системах может сохраняться, однако функции центральной ЭВМ определенным образом редуцируются до функций файловой машины сети, обеспечивающей периферийные ЭВМ такими ресурсами, как дисковая память, терминалы, принтеры, а также возможностью обращения к ленточному архиву. В этом случае выбор топологии сети, объединяющей ЭВМ системы, оказывает меньшее влияние на архитектуру системы в целом. Так, нами выбрана звездообразная конфигурация как более простая в реализации, хотя возможны и варианты с кольцевой или шинной организацией.

Новой, не реализованной в прежних операционных системах, является функция обеспечения межпрограммного взаимодействия для программ, работающих в разных процессорах нижнего уровня. Желательно обеспечить при этом максимальную унификацию программных интерфейсов периферийной операционной системы для различных типов обмена: межпрограммного в пределах одного процессора, межпрограммного для разных процессоров, программных обменов как с файлами, расположенными на накопителях данной ЭВМ (локальными файлами), так и с файлами, размещенными на носителях файловой машины.

Таким образом, программная среда, в которой должна выполняться программа в периферийном процессоре, существенно отличается от среды, которая обеспечивается как большинством стандартных ОС, так и семейством разработанных в Институте ОС систем управления первого поколения.

#### Текущее состояние и конечные цели

В настоящее время системы управления двух крупных ускорительно-накопительных комплексов Института (ВЭПП-2М и ВЭПП-4) находятся в стадии модернизации, которая предусматривает переход к распределенной системе управления на базе микро ЭВМ «Одренок». При этом переход на новую систему управления комплекса ВЭПП-2М происходит без остановки работ. Выше была дана краткая характеристика системы управления ВЭПП-2М на базе ЭВМ М-6000, возможности которой позволили автоматизировать только управление и контроль основных параметров установок, входящих в состав комплекса; при этом предпочтение отдавалось управлению в ущерб контро-

лю и измерениям. Поэтому внедрение новых микро ЭВМ пошло по пути ликвидации этого дисбаланса. Кроме того, реализована связь одного из «Одрят» с М-6000, что позволяет получать необходимые данные и выдавать управляющие воздействия на элементы, подключенные к ЭВМ М-6000. К данному моменту на микро ЭВМ «Одренок» реализованы следующие системы:

- система контроля за состоянием сверхпроводящей змейки;
- измерение токов и напряжений блоков питания магнитоэлектрических насосов;
- системы контроля за токами пучков в накопителе ВЭПП-2 и пучковые измерения (ток, время жизни, энергия, частота) в накопителе ВЭПП-2М;
- система синхронизации импульсных элементов комплекса и ряд других.

Остановка комплекса ВЭПП-4 для модернизации позволила отказаться от постепенного перехода к распределенной системе управления и сделать это сразу, минуя этап сосуществования новой и старой систем. К настоящему моменту новая система управления функционирует на части комплекса, включающей в себя инжектор в составе: линейный ускоритель с системой высокочастотного питания, импульсный синхротрон Б-4, каналы транспортировки пучка и промежуточный накопитель ВЭПП-3. По управлению эта часть комплекса разделена на две слабосвязанные подсистемы: управление инжектором и управление собственно накопительным кольцом.

Функции ЭВМ, образующих радиальную структуру, в настоящее время распределены следующим образом:

- Центральная ЭВМ верхнего уровня с внешней дисковой памятью порядка 50 Мбайт в настоящее время выполняет лишь роль файловой машины для периферийных процессоров системы. В ближайшее время ее функции будут расширены (через нее предполагается осуществлять обмен информацией между программами в разных периферийных ЭВМ, доступ с подключенных к ней терминалов ко всем машинам сети и т. д.).
- Периферийные ЭВМ являются управляющими машинами. В их крейтах содержатся, в основном, системные модули, обеспечивающие функционирование «Одренка» (ЗУ, модуль сетевого интерфейса, драйвер периферийных крейтов).
- К крейтам с «Одрятами» через специальный драйвер последовательной связи и простые крейт-контроллеры подсоединяются крейты с измерительной и управляющей аппаратурой.

Управление инжектором осуществляется тремя микро ЭВМ, между которыми существует следующее распределение функций:

- управление элементами инжектора;
- контроль параметров установок, входящих в состав инжектора;
- измерения характеристик пучков.

Аппаратура управления размещена в 12 КАМАК-крейтах. В настоящее время функционируют 260 каналов управления и 230 каналов контроля, причем количество каналов контроля будет в дальнейшем возрастать.

Прикладное программное обеспечение подсистем инжектора состоит из 5 постоянно работающих программ и некоторого набора вспомогательных программ, обращение к которым осуществляется по мере необходимости. Взаимодействие с аппаратурой контроля и управления сосредоточено в двух программах, работаю-

щих, соответственно, в микро ЭВМ контроля и управления. Остальные программы получают необходимую информацию от них или передают ее им по каналам межпрограммного обмена для последующей засылки в устройства.

Информация, необходимая оператору установки, выводится на терминал или на графические дисплеи. Диалог с оператором осуществляется через терминал.

База данных инжектора состоит из двух частей, первая из которых включает в себя описание установок, а вторая содержит таблицы режимов.

Управление накопителем ВЭПП-3 выполнено также на трех микро ЭВМ со следующим распределением функций:

- управление и контроль магнитной системы накопителя;
- управление и контроль ВЧ-систем;
- измерение характеристик и параметров пучков (токи, орбита, частоты бетатронных колебаний и др.).

Общий объем аппаратуры 8 крейтов КАМАК, количество каналов управления 70, контроля 170.

Прикладное программное обеспечение в данный момент включает в себя 8 основных программ. Принцип взаимодействия программ с устройствами контроля и управления тот же, что и в подсистеме инжектора. Ведущей ЭВМ является машина управления и контроля магнитной системы, в которой работает программа, осуществляющая начальную установку режима, переход с одного режима на другой, выдачу команд и параметров для ЭВМ, управляющей ВЧ-системами. Для подстройки режимов существует программа, позволяющая изменять «вручную» уставки элементов в пределах данного режима. Программа выполняет сравнение заданного режима и текущего состояния элементов накопителя.

Общий объем прикладного программного обеспечения подсистемы инжектора составляет около 7000 операторов языка «Тран», подсистемы накопителя около 5000 операторов, и он может значительно меняться по мере развития системы.

Структура базы данных накопителя ВЭПП-3 та же, что и у инжектора.

Поскольку опыт использования распределенных систем управления ускорительными установками еще невелик, в ближайшее время будут тщательно исследоваться возможности и эксплуатационные характеристики описанных систем для выявления возможных узких мест и определения направления их дальнейшего совершенствования и развития.

### Discussion

А.В. Самойлов. Используете ли Вы ЭВМ другого типа в ваших системах управления?

Г.С. Пискунов. Да, конечно. В институте есть большой парк мини-машин класса СМ-4, более ста микро-ЭВМ «Электроника-60». Эти машины используются в том числе и в системах управления ускорителями. Так, система управления синхротронного источника «Сибирь-1», построенного нами в г. Москве, базируется на традиционной двухуровневой схеме: «Электроника-100/25» — несколько микроЭВМ «Электроника-60». На комплексе ВЭПП-3—ВЭПП-4 применяются только «Одрята», и в дальнейшем предполагается развивать системы управления ускорителями на базе этой микроЭВМ.