

**Программа "СуперКомпьютерная Инициатива Беларуси и России"  
(Программа СКИБР)**

---

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ИПС РАН  
профессор

**УТВЕРЖДАЮ**  
Генеральный директор  
ООО "Суперкомпьютерные  
системы"

\_\_\_\_\_  
А.К. Айламазян  
"\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г.  
М.П.

\_\_\_\_\_  
В.Ю. Татур  
"\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г.  
М.П.

**БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКАЯ СОВМЕСТНАЯ ПРОГРАММА  
ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И  
ПРИЛОЖЕНИЙ НА ИХ ОСНОВЕ**

**Описание Программы СКИБР**

**(Рабочий материал Института программных систем РАН и  
Предприятия "Суперкомпьютерные Системы")**

## Оглавление

<b>1. Предмет разработки .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Исполнители .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Приоритетность, актуальность разработки и ее научная и прикладная значимость .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Мировые тенденции в области разработки и использования технологий     высокопроизводительных параллельных вычислений .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 Планируемое воздействие реализации Программы на уровень     национальной безопасности, промышленного и научного потенциала     России и Беларуси .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Краткое техническое описание Программы, архитектурные и технические решения.....</b>	<b>9</b>
<b>4.1 Общая структура суперкомпьютера.....</b>	<b>11</b>
<b>4.2 Технические решения кластерного уровня суперкомпьютера .....</b>	<b>12</b>
4.2.1 Аппаратные средства кластерного уровня суперкомпьютера .....	13
4.2.1.1 Вычислительный узел .....	13
4.2.1.2 Аппаратные средства объединения вычислительных узлов в кластер.....	13
4.2.1.3 Конструктивное исполнение кластерного уровня суперкомпьютера.....	13
4.2.1.4 Оценка сложности технических решений в части аппаратных средств кластерного уровня суперкомпьютера .....	14
4.2.1.5 Сравнение уровня технических решений в аппаратной части кластерного уровня суперкомпьютера с мировым уровнем.....	14
4.2.2 Базовое (общесистемное) программное обеспечение кластерного уровня суперкомпьютера .....	14
4.2.2.1 Операционная система Linux .....	14
4.2.2.2 Т-система и ее сравнение с другими подходами .....	15
4.2.2.3 Т-ядро .....	16
4.2.2.4 Т-язык и система программирования .....	18
4.2.3 Прикладное программное обеспечение кластерного уровня суперкомпьютера .....	20
4.2.4 Сравнение уровня технических решений в части кластерного уровня суперкомпьютеров с зарубежными разработками.....	20
4.2.5 Сравнение уровня технических решений в части кластерного уровня суперкомпьютеров с другими российскими разработками .....	21
<b>4.3 Технические решения подсистемы ОВС суперкомпьютера .....</b>	<b>22</b>
4.3.1 Архитектура аппаратных средств уровня ОВС суперкомпьютера.....	22
4.3.1.1 ОВС—однородная вычислительная структура.....	22
4.3.1.2 Структура процессоров ОВЗС.....	24
4.3.1.3 Блок ОВС.....	25
4.3.1.4 Организация совместной работы блоков.....	26
4.3.1.5 Конструктивное исполнение уровня ОВС суперкомпьютера .....	27
4.3.1.6 Оценка сложности технических решений по аппаратной части уровня ОВС суперкомпьютера.....	28
4.3.1.7 Сравнение уровня технических решений по аппаратной части ОВС уровня суперкомпьютера с мировым уровнем.....	28
4.3.2 Базовое (общесистемное) программное обеспечение подсистемы ОВС суперкомпьютера .....	29
4.3.2.1 Математическая модель ОВС—Data Flow Graph .....	29
4.3.2.2 Элементы операционной системы.....	30
4.3.2.3 Инструментальные средства разработчика программного обеспечения для ОВС.....	30
4.3.2.4 Библиотеки стандартных функций для ОВС .....	31
4.3.3 Прикладное программное обеспечение ОВС суперкомпьютера.....	31

<b>4.4 Технические решения в части сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера .....</b>	<b>32</b>
4.4.1 Аппаратные средства сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера .....	32
4.4.2 Программные средства сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера .....	32
<b>4.5 Технические решения в части периферии суперкомпьютера (включая поддержку подключения к LAN/WAN/Internet).....</b>	<b>33</b>
<b>5. Тактико-технические характеристики моделей суперкомпьютера .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Тактико-технические характеристики базовых моделей кластерного уровня суперкомпьютера.....</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Тактико-технические характеристики базовых моделей подсистемы ОВС суперкомпьютера .....</b>	<b>36</b>
5.2.1 Параметры базовой модели ОВС—100Gips .....	36
5.2.2 Параметры базовой модели ОВС—1Tips.....	36
<b>6. Научный и практический задел исполнителей .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Задел в части кластерного уровня суперкомпьютера.....</b>	<b>36</b>
6.1.1 Оценка завершенности современной версии Т-системы.....	36
6.1.2 Аппаратно-программный прототипный образец кластерного уровня суперкомпьютера .....	37
6.1.2.1 Аппаратное обеспечение прототипного образца .....	37
6.1.2.2 Сетевой интерфейс прототипного образца: доступность прототипного образца из локальной сети ИПС РАН, других организаций из региональной сети (СТ “Ботик”) и из Internet.....	39
6.1.2.3 Программное обеспечение прототипного образца.....	41
6.1.2.4 Результаты опытной эксплуатации прототипного образца аппаратно-программного комплекса .....	41
6.1.2.5 Опыт создания других аппаратно-программных прототипных образцов с Т-системой .....	42
<b>6.2 Задел в части подсистемы ОВС суперкомпьютера.....</b>	<b>42</b>
6.2.1 Макет аппаратно-программного комплекса ОВС суперкомпьютера.....	42
6.2.1.1 Аппаратное обеспечение макета ОВС.....	43
6.2.1.2 Программное обеспечение макета.....	44
6.2.2 Результаты опытной эксплуатации аппаратно-программного макетного комплекса ОВС и оценка степени завершенности разработки .....	45
<b>7. Основные направления разработок по Программе, их реализуемость, оценка способности исполнителей выполнить эти работы.....</b>	<b>46</b>
<b>7.1 Разработка промышленной версии Т-системы .....</b>	<b>46</b>
7.1.1 Характеристика работ, которые необходимо выполнить по данному направлению.....	46
7.1.2 Исполнитель и его способность реализовать результат по направлению.....	47
7.1.2.1 Конкретные результаты, описание разработанных методов.....	47
7.1.2.2 О защите интеллектуальной собственности ИПС РАН на полученные результаты.....	47
7.1.2.3 Основные публикации по теме разработки .....	48
7.1.2.4 Время работы в данной области .....	49
7.1.2.5 Характеристика кадрового состава и квалификации коллектива разработчиков Т-системы.....	49
<b>7.2 Разработка аппаратного и программного обеспечения уровня ОВС суперкомпьютера .....</b>	<b>50</b>
7.2.1 Характеристика работ, которые необходимо выполнить по данному направлению.....	50
7.2.2 Исполнитель и его способность реализовать результат по направлению .....	50

7.2.2.1 Конкретные результаты, описание разработанных аппаратно-программных средств.....	50
7.2.2.2 Основные публикации .....	51
7.2.2.3 Хронология работ в данной области .....	51
7.2.2.4 Характеристика кадрового состава и квалификации коллектива разработчиков.....	51
<b>7.3 Полный перечень мероприятий по Программе .....</b>	<b>52</b>
<b>8. Экономическое обоснование Программы .....</b>	<b>57</b>
8.1 Оценка стоимости Программы.....	58
8.2 Экономический эффект от реализации Программы.....	58
8.2.1 Стоимостные характеристики суперкомпьютеров, создаваемых по Программе .....	62
8.2.2 Области потенциального применения разрабатываемых систем.....	62
<b>9. Список дополнительных материалов .....</b>	<b>63</b>

## Список рисунков

Рисунок 1. Два уровня общей архитектуры серии параллельных вычислительных комплексов, создаваемых в рамках Программы СКИБР .....	12
Рисунок 2. Структура поля ОВЗС .....	23
Рисунок 3. Структура процессора ОВС .....	24
Рисунок 4 Структура процессора ОЗС.....	25
Рисунок 5. Структура блока ОВС.....	26
Рисунок 6. Поле ОВЗС, образуемое несколькими платами ОВС.....	26
Рисунок 7. Организация совместной работы блоков .....	27
Рисунок 8. Структурная схема комплекса аппаратных средств мультипроцессора .....	38
Рисунок 9. Фотографии процессорных узлов прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера.....	39
Рисунок 10. Фотография макета ОВС.....	43
Рисунок 11. Фотография ТЭЗ макете ОВС.....	43
Рисунок 12. Интерфейс графического языка Ассемблер .....	44

## Список таблиц

Таблица 1. Укрупненная спецификация комплекса аппаратных средств мультипроцессора Т-системы .....	38
Таблица 2. Спецификация вычислительных узлов комплекса аппаратных средств мультипроцессора Т-системы .....	40
Таблица 3. Мероприятия, по программе СКИБР .....	52

## 1. Предмет разработки

**Предметом** предлагаемой Программы является разработка и организация производства ряда суперкомпьютеров и создания на их основе прикладных систем. В частности по Программе разрабатываются:

- **набор универсальных конструктивных блоков**, предназначенных для организации серийного производства моделей суперкомпьютеров;
- **единый архитектурный ряд суперкомпьютеров**, характеризующихся:
  - высокими уровнями производительности;
  - низким значением соотношения цена/производительность—по сравнению с имеющимися близкие уровни производительности зарубежными аналогами;
- **базовое (общесистемное) программное обеспечение**, поддерживающее эффективную разработку прикладных задач для суперкомпьютеров ряда;
- **прикладные системы**—на базе разработанных моделей суперкомпьютеров, базового общесистемного и прикладного программного обеспечения.

**Важнейшими задачами** Программы являются:

- разработка номенклатурного ряда суперкомпьютеров с параллельной архитектурой в рамках единой серии суперкомпьютеров, характеризующихся высокими показателями производительности и низким значением соотношения цена/производительность;
- обеспечение возможности технологического прорыва и создания базы для интенсивного развития промышленности, науки и инфраструктуры путем удовлетворения насущных потребностей в технических средствах и технологиях высокопроизводительных вычислений важнейших субъектов деятельности в областях конструкторской деятельности, химической промышленности, фармацевтики, медицины, перспективных наукоемких разработок (термоядерный синтез, безопасные энергетические реакторы, ускорители), геологоразведки, национальной обороны, управления и др.;
- обеспечение национальной безопасности как путем удовлетворения с использованием отечественных вычислительных средств потребностей этой области в суперкомпьютерных вычислениях, так и путем обеспечения независимости от монополизма американских, японских и европейских производителей суперкомпьютерной техники и ограничительной экспортной политики соответствующих государств;
- обеспечение возможности экспорта суперкомпьютеров и прикладных систем на их основе с целью получения валютного дохода;
- создание основы для дальнейшего развития отечественных перспективных разработок и наращивания отечественного потенциала в области производства высокопроизводительных средств вычислительной техники.

**Важнейшие целевые показатели** предлагаемой разработки:

- высокая производительность параллельных вычислительных комплексов;
- низкое соотношение цена/производительность;
- возможность развертывания серийного производства входящих в единый ряд моделей параллельных вычислительных комплексов на отечественных предприятиях;
- возможность реализации разнообразных прикладных систем, предназначенных для использования в различных областях деятельности на основе входящих в единый ряд моделей суперкомпьютеров;
- широкий набор базовых технических и программных средств.

## 2. Исполнители

Основными исполнителями работ по Программе являются:

- **от России:**
  - Институт программных систем Российской Академии Наук (ИПС РАН), г. Переславль-Залесский—*Координатор Программы от РФ*;

- Предприятие “Суперкомпьютерные системы” (СКС), г. Москва—*Головной исполнитель от РФ*;
- Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных Миннауки РФ (ИВВиБД), г. Санкт-Петербург—*Головной исполнитель от РФ*;
- Республиканский научный центр компьютерных телекоммуникационных сетей высшей школы, г. Санкт-Петербург (Вузтелекомцентр);
- Институт им. Курчатова, г. Москва;
- Институт Атомэнергопроект;
- Российский Федеральный Ядерный Центр ВНИИЭФ, г. Саров;
- МАК “ВЫМПЕЛ”, г. Москва;
- НИИ Космических систем—филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева (г. Королев);
- Научный центр нейрокомпьютеров Министерства экономики РФ, г. Москва;
- Военно-медицинская Академия, г. Москва;
- Росгидромет, г. Москва.
- ГУП “Дом Оптики” ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Москва;
- ОАО “Объединенный авиаприборостроительный консорциум” UNACON, г. Санкт-Петербург;
- Институт нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко РАМН, г. Москва;
- НПО Автоматики, г. Екатеринбург;
- НПП АО “Аэроэлектрик”, г. Москва;
- ГУП ОКБ “Электроавтоматика”, Санкт - Петербург;
- Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва;
- Фирма “Камов”;
- **от Беларуси:**
  - НИО “Кибернетика” НАН Беларуси—*Координатор Программы от РБ*;
  - ИТК НАН Беларуси—*Головной исполнитель от РБ*;
  - ИПЭ НАН Беларуси;
  - Институт математики НАН Беларуси;
  - Институт физики НАН Беларуси;
  - БГУ;
  - БГУИР;
  - АНК “Институт тепломассообмена”;
  - Институт кардиологии;
  - Институт повышения квалификации врачей;
  - Белгидромет;
  - Военная Академия РБ;
  - НИП “Информационные технологии”;
  - ГП “НИИЭВМ” Министерства промышленности РБ;
  - НИКТП “Белмикросистемы” Министерства промышленности РБ;
  - ГП “МПОВТ” Министерства промышленности РБ;
  - 3-д “КАЛИБР”;
  - КБ СП (г. Гомель);
  - Предприятие “ДЭЛС”.

### 3. Приоритетность, актуальность разработки и ее научная и прикладная значимость

#### 3.1 Мировые тенденции в области разработки и использования технологий высокопроизводительных параллельных вычислений

При любом уровне развития элементной базы ЭВМ всегда имеются задачи, относящиеся, как правило, к актуальнейшим областям исследований, промышленных разработок и технологического развития и требующие для своего решения использования вычислительной мощности, в десятки, сотни или тысячи раз превышающей ту, которая может быть реализована на одном процессоре. Удовлетворяющие эту потребность высокопроизводительные параллельные вычислительные системы—мультипроцессоры—и сопутствующие им разнообразные технологии параллельного программирования широко и успешно используются для целей:

- химической промышленности (поиск методов синтеза веществ с заданными свойствами);
- фармацевтики (конструирования новых лекарств);
- биологии (генетический анализ);
- медицины (анализ рентгенограмм, компьютерная томография, диагностика);
- разнообразных наукоемких технических применений (термоядерный синтез, ускорители);
- конструкторской деятельности (в системах автоматизации проектирования—САПР, для оптимизации проектно-конструкторских и технических решений, в частности для проектирования автомобильных и авиационных двигателей);
- геологоразведки (комплексный анализ результатов электро-, магнито-, и сейсморазведки);
- разведки (рабочие места аналитиков, поиск информационных связей, дешифрование);
- разнообразных военных приложений;
- управления (первичный анализ и отбор входной информации, поиск оптимальных решений).

Важность и высокая приоритетность ускоренного развития технологической отрасли высокопроизводительных вычислений официально признана руководящими кругами ведущих промышленно развитых стран:

- правительством США принята стратегическая инициатива по развитию вычислительных мощностей (Accelerated Strategic Computing Initiative /ASCI/), которая, как декларируется в программных документах, станет:
  - инструментом обеспечения национальной безопасности США;
  - основой для сохранения позиций США как мирового научно-технического и промышленного лидера, обеспечения конкурентоспособности американских товаров и усиления экономики США—в частности, за счет критического сокращения цикла разработки и производства опытных образцов и, как следствие, беспрецедентного повышения эффективности промышленного производства и сокращения затрат;
- в рамках европейской программы ESPRIT многочисленные европейские проекты по высокопроизводительным вычислительным и сетевым технологиям (High Performance Computing and Networking /HPCN/) ежегодно получают обильное финансирование правительств стран Европейского Союза. При этом отбор проектов, финансируемых в рамках ESPRIT, в сильной степени основывается на учете применимости в промышленности результатов реализации этих проектов и возможности передачи разработанных технологий промышленным компаниям и корпорациям с использованием специально выбранных организаций и компаний, играющих роль узлов передачи технологий (Technology Transfer Nodes /TTN/);
- правительство Японии, в соответствии с проводимой политикой целенаправленного развития информационно-коммуникационной инфраструктуры (Advanced Info-Communications Infrastructure /ICI/), создает правительственные лаборатории и поддерживает сотрудничающие с ними университетские центры, работающие в области параллельных супервычислений—в частности, путем предоставления приобретенных у фирм NEC, Hitachi и Fujitsu мультимпьютеров с массивно-параллельной архитектурой.

Понимание стратегического значения отрасли параллельных вычислительных технологий обусловлено осознанием того факта, что десятки или сотни современных мощных микропроцессоров, объединенных в единую вычислительную систему, дают новое качество—инструмент обработки информации, мощь которого сравнима с мощью человеческого мозга, а по некоторым параметрам (например, по скорости вычислений) во много раз превосходит его. Такой интеллектуальный ассистент становится незаменимым инструментом или даже мощным оружием в руках того, кто умеет изготовить, запрограммировать и применить его—оружием, способным дать значительное—если не подавляющее технологическое и военное превосходство и позволяющим гарантировать удержание развивающихся стран и других государств в позиции технологически зависимых аграрно-сырьевых приделков или доноров интеллектуального потенциала. Именно это и стало причиной проведения ограничительной политики в области экспорта высокопроизводительных параллельных вычислительных установок, проводимой правительствами индустриальных держав и соответствующими фирмами. Такая политика включает в себя:

- явные запреты на экспорт высокопроизводительных вычислительных систем;
- неявные ограничения, заключающиеся, например, в установлении сверхвысокого уровня цен на экспортируемые готовые параллельные суперкомпьютеры—уровня цен, который исключал бы возможность массовой закупки таких изделий, необходимой для активного использования параллельных суперкомпьютеров в различных отраслях промышленности и науки, для обеспечения национальной безопасности и т.д.

Многие развивающиеся страны (в лице их лидеров) осознают необходимость овладения технологиями высокопроизводительных параллельных вычислений—с целью освобождения от упомянутой выше зависимости и обеспечения развития промышленности этих государств. Явно выраженные усилия в этой области предпринимаются:

- правительственными кругами Бразилии—в рамках международного проекта Боливар;
- руководством Китая—в его непрекращающихся попытках установления контактов и налаживания сотрудничества с членами европейского сообщества HPCN и получения доступа к европейским технологиям параллельных вычислений;
- сирийским руководством, выдвинувшим официальную доктрину создания самостоятельной отрасли параллельных вычислений, независимой от политики индустриальных держав—доктрину, основывающуюся как на привлечении финансовых ресурсов арабского мира, так и на использовании интеллектуальных ресурсов и технологических наработок всех других заинтересованных сторон;
- руководством Индии, развернувшим и продолжающим реализацию проекта создания индийских технологий параллельных вычислений на базе специально созданной государственной корпорации C-DAC. Данная корпорация, в частности, разработала серию параллельных вычислительных систем под общим названием PARAM OpenFrame.
- и т.п.

**Рассмотренные выше мировые тенденции в области разработки и использования технологий высокопроизводительных параллельных вычислений показывают, что задача развития суперкомпьютерных вычислений является актуальнейшей задачей; для России и Беларуси экономический прогресс, политическая стабильность и национальная безопасность обеих стран существенно зависят от успехов в решении данной задачи.**

**Замечание.** Дополнительный анализ см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обзору белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта» в разделах "1. Анализ состояния проблемы", "1.1. Мировые тенденции развития высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой", "1.2. Высокопроизводительные вычислительные системы с параллельной архитектурой в России" и "1.3 Работы в области ВВСПА белорусских ученых".



### 3.2 Планируемое воздействие реализации Программы на уровень национальной безопасности, промышленного и научного потенциала России и Беларуси

В свете приведенного выше анализа, разработка и серийное производство единого архитектурного ряда суперкомпьютеров (характеризующихся высокими уровнями производительности и низким значением соотношения цена/производительность) позволят решить целый ряд актуальнейших и высокоприоритетных задач, в частности:

- **технологический аспект**—обеспечить технологический прорыв и создать базу для интенсивного развития промышленности, науки, образования и инфраструктуры органов управления путем удовлетворения насущных потребностей в технических средствах и технологиях высокопроизводительных вычислений важнейших субъектов деятельности в областях: конструкторской деятельности, химической промышленности, фармацевтики, медицины, перспективных наукоемких разработок (термоядерный синтез, безопасные энергетические реакторы, ускорители), геологоразведки, национальной обороны, государственного управления и др.;
- **национальная безопасность**—укрепить национальную безопасность, как путем удовлетворения потребностей этой области в суперкомпьютерных вычислениях—с использованием отечественных вычислительных средств,—так и путем обеспечения независимости от монополизма американских, японских, европейских и др. производителей суперкомпьютерной техники и ограничительной экспортной политики соответствующих государств;
- **социальный и внутривнутриполитический аспект**—поддержать отечественные предприятия--производители средств вычислительной техники путем обеспечения заказов на производство аппаратных средств высокопроизводительных вычислительных систем и их компонентов;
- **технологический и политический аспект**—создать основу для дальнейшего развития отечественных перспективных разработок и наращивания отечественного потенциала в области производства высокопроизводительных средств вычислительной техники, что обеспечит приоритет и престиж науки России и Беларуси, независимость от внешних поставок в области суперкомпьютерных технологий;
- **экономический аспект**—обеспечить экономию валютных средств за счет отказа от приобретения зарубежных готовых суперкомпьютеров в пользу гораздо более экономически целесообразной сборки суперкомпьютеров из импортных, а частично—отечественных компонентов и комплектующих,—с последующим переходом к более широкому использованию собственных комплектующих и в перспективе—к созданию изделий целиком на отечественной элементной базе;
- **экономический и политический аспект**—создать потенциал для экспорта суперкомпьютеров и прикладных систем на их основе (в том числе в страны, заинтересованные в суперкомпьютерных технологиях и испытывающие ограничения в доступе к таким технологиям со стороны развитых стран)—с целью получения валютного дохода.

**Замечание.** Дополнительный анализ см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта» в разделе "5. Сведения об ожидаемых экономических и социальных результатах".

## 4. Краткое техническое описание Программы, архитектурные и технические решения

В Программе СКИБР интегрированы лучшие разработки ИПС РАН и предприятия СКС в области суперкомпьютерных вычислений. Данные разработки сегодня могут быть оценены как *перспективные, соответствующие и по некоторым позициям превосходящие современный мировой уровень* суперкомпьютерной отрасли—в том числе и сегодняшние результаты, достигнутые по программе ASCI (США) в области аппаратно-программных суперкомпьютерных систем.

Превосходство над современным мировым уровнем обеспечено (сегодняшними результатами) по следующим позициям:

- **в части Т-системы:** обеспечивается автоматическое динамическое распараллеливание, и, таким образом, **достигается освобождение программиста от большинства аспектов разработки параллельных программ**, свойственных различным системам ручного статического распараллеливания (таким как PVM и MPI):

— обнаружение готовых к выполнению фрагментов задачи (процессов);

— их распределение по процессорам;

— их синхронизацию по данным.

Все эти (и другие) операции выполняются в Т-системе автоматически и в динамике (во время выполнения задачи). Тем самым достигается **более низкие затраты на разработку параллельных программ и более высокая их надежность**.

По сравнению с использованием распараллеливающих компиляторов, Т-система обеспечивает **более глубокий уровень параллелизма** во время выполнения программы и **более полное использование вычислительных ресурсов мультипроцессоров**. Это связано с принципиальными алгоритмическими трудностями (алгоритмически неразрешимыми проблемами), не позволяющими во время компиляции (в статике) выполнить полный точный анализ и предсказание последующего поведения программы во время счета.

Кроме указанных выше принципиальных преимуществ Т-системы перед известными сегодня методами организации параллельного счета, в реализации Т-системы имеется ряд технологических находок, не имеющих аналогов в мире, в частности:

— **реализация понятия "неготовое значение"** и поддержка корректного выполнения некоторых операций над неготовыми значениями. Тем самым поддерживается возможность выполнения счета в некотором процессе-потребителе в условиях, когда часть из обрабатываемых им значений еще не готова—не вычислена в соответствующем процессе-поставщике. Данное техническое решение обеспечивает обнаружение более глубокого параллелизма в программе;

— **оригинальный алгоритм динамического автоматического распределения процессов по процессорам**. Данный алгоритм учитывает особенности неоднородных распределенных вычислительных сетей. По сравнению с известными алгоритмами динамического автоматического распределения процессов по процессорам (например, с диффузионным алгоритмом и его модификациями), наш алгоритм имеет существенно более низкий трафик межпроцессорных передач. Тем самым, Т-система обеспечивает снижение накладных расходов на организацию параллельного счета и предъявляет более скромные требования к пропускной способности аппаратуры объединения процессорных элементов в кластер.

В Т-системе имеется еще и другие программные решения, не имеющие аналогов за рубежом.

- **в части ОВС:** архитектура ОВС позволяет использовать естественный параллелизм решаемой задачи вплоть до битового уровня, то есть уровня структуры обрабатываемых данных, а также позволяет строить конвейеры произвольной глубины. ОВС предоставляет возможность одновременной обработки множества независимых некогерентных потоков, а также обеспечивает удобную организацию ввода/вывода данных на вычислительную матрицу ОВС.

Фактически, при решении конкретной функции или самостоятельной задачи, на ОВС (за счет программирования—программного управления) организовывается спецпроцессор, реализующий решаемую функцию или задачу. На матрице ОВС одновременно могут решаться несколько независимых задач и функций, причем механизм перезагрузки сегментов ОВС позволяет перезагружать часть матрицы без остановки выполнения еще незавершенных задач. В качестве западного аналога ОВС могут выступать систолические структуры. Но, реализуя все возможности систолических структур, ОВС обладает значительно большей гибкостью и перестраиваемостью, а также рядом возможностей, позволяющих утверждать, что ОВС значительно превосходит западные аналоги. В частности, ОВС об-

ладает полной аппаратной и программной масштабируемостью, что позволяет строить на базе матрицы ОВС вычислительные системы с весьма большим быстродействием. В то же время, производительность ОВС, теоретически, растет линейно с увеличением рабочей частоты поля и площадью вычислительной матрицы.

ОВС позволяет создавать системы с высоким уровнем надежности и отказоустойчивости.

ОВС весьма успешно справляется с так называемыми задачами "реального времени".

За счет оригинальных технических решений в части ОВС достигаются наилучшие удельные объемные, массогабаритные и стоимостные характеристики изделий в части производительности и энергопотребления, в частности:

- минимальная потребляемая мощность на единицу объема;
- минимальные габариты и вес;
- наилучшее соотношение стоимость/производительность;
- максимальная производительность на единицу объема.

Также можно указать на тот факт, что архитектура ОВС, благодаря удачному объединению вычислительной и коммутационной матриц, позволяет весьма успешно моделировать нейрокомпьютеры.

- **в части суперкомпьютерной вычислительной системы в целом (с учетом обоих уровней—кластерного и ОВС):** вычислительная система, построенная на базе типовых сетевых и компьютерных решений, работающих под управлением Т-системы, а также на базе ОВС, предлагает пользователям уникальные возможности для оптимального решения прикладных задач. Фактически, подобная система позволяет реализовать все виды параллелизма и любые конвейерные решения. Такая вычислительная система успешно справится и с классическими вычислительными задачами—математической физики, линейной алгебры,—и с более узкоспециализированными задачами—обработка сигналов, моделирование виртуальной реальности, задачи реального времени.

Можно смело утверждать, что аналогов подобной системы за рубежом на данный момент нет.

**Замечание.** Дополнительный анализ см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта» в разделе "2. Цель работы. Основные технические параметры".

## 4.1 Общая структура суперкомпьютера

Архитектура всех моделей высокопроизводительных параллельных вычислительных систем, входящих в создаваемую в рамках Программы СКИБР единую серию суперкомпьютеров, имеет двухуровневую структуру (см Рисунок 1):

**1 уровень:** тесно связанная сеть (кластер) вычислительных узлов, работающих под управлением операционной системы Linux и использующих для организации параллельного выполнения прикладных задач Т-систему—разработанную в ИПС РАН программную систему, реализующую автоматическое динамическое распараллеливание программ.

**2 уровень:** синхронная однородная вычислительная среда (ОВС)—разработка предприятия СКС—синхронная сеть большого числа (десятки тысяч) простых одноканальных процессоров (выпуск обеспечен НПО "Интеграл"), позволяющая чрезвычайно эффективно реализовывать те задачи (фрагменты прикладных систем), которые сложно распараллеливаются на кластерном уровне суперкомпьютера.

Предпосылкой объединения двух подходов—Т-системы и ОВС—к организации параллельного счета в рамках одной архитектуры, является то, что эти подходы своими сильными сторонами компенсируют недостатки друг друга. Тем самым, в общем случае каждая прикладная проблема может быть разбита на:

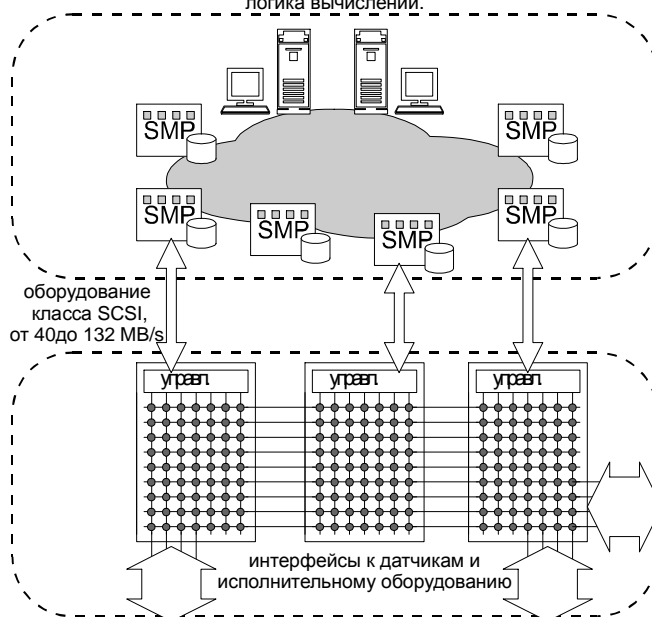
- фрагменты со сложной логикой вычисления, с крупноблочным скрытым (динамическим) параллелизмом—такие фрагменты эффективно реализовывать с использованием Т-системы, на кластерном уровне суперкомпьютера;
- фрагменты с простой логикой вычисления, с мелкозернистым явным параллелизмом, с большими потоками информации, требующими быстрой и несложной обработки “на пролете”—такие фрагменты эффективно реализовывать в ОВС.

Пропорции такого деления прикладной проблемы определяют:

- пропорции объемов программного обеспечения для нее в части Т-системы и ОВС;
- эффективный состав суперкомпьютерной установки для данной прикладной системы—сколько в ней будет узлов кластерной сети, сколько будет оборудования ОВС и т.п.

**1-й уровень: Тесно связанная сеть** (50..1000 Мбайт/с) из любого числа произвольных (в том числе: SMP-многопроцессорных) **рабочих Intel-станций с операционной системой Linux, Т-система**

**Характерные подзадачи:** средняя и крупная гранула параллелизма, средний и невысокий объем межпроцессорных передач, отсутствие строгих требований режима реального времени, возможно--сложная логика вычислений.



**2-й уровень:** синхронная однородная вычислительная среда (ОВС) с большим числом (десятки тысяч) простых однобитовых процессоров.

**Характерные подзадачи:** мелкая гранула параллелизма, высокий уровень межпроцессорных обменов, несложная логика вычислений, возможно--выполнение требований обработки в режиме реального времени.

**Рисунок 1. Два уровня общей архитектуры серии параллельных вычислительных комплексов, создаваемых в рамках Программы СКИБР**

Между собой два уровня суперкомпьютера связаны с использованием оборудования класса SCSI (модели от 40 MB/s до 132 MB/s—Fiber Channel). Программное обеспечение Т-системы и ОВС позволяет эффективно запускать из одного уровня суперкомпьютера фрагмент задачи для решения на другом уровне.

## 4.2 Технические решения кластерного уровня суперкомпьютера

Как уже было отмечено выше, первый уровень суперкомпьютера строится как тесно связанная сеть (кластер) вычислительных узлов, работающих под управлением операционной системы Linux, функционирующая как единая вычислительная система и использующая для организации параллельного выполнения прикладных задач Т-систему—программную систему, реализующую автоматическое динамическое распараллеливание программ. Ниже мы подробнее остановимся на описании технических решений, принятых к реализации в области аппаратных и программных средств на данном уровне суперкомпьютера.

## 4.2.1 Аппаратные средства кластерного уровня суперкомпьютера

### 4.2.1.1 Вычислительный узел

Реализация аппаратных средств отдельного вычислительного узла основывается на использовании готовых изделий массового применения, широко представленных на сегодняшнем компьютерном рынке.

В качестве базовой составляющей при создании аппаратуры вычислительного узла запланировано использовать:

- стандартные (монопроцессорные, 2-х и 4-х процессорные SMP) Intel-совместимые материнские платы;
- микропроцессоры класса Intel Pentium II Xeon и выше (или микропроцессоры изделия других фирм) с тактовыми частотами микропроцессоров 400MHz и выше;
- стандартные модули памяти—с объемом ОЗУ вычислительного узла порядка 1GB;

Каждый вычислительный узел снабжается собственным набором периферийных устройств—как минимум накопителем на жестком диске (“винчестером”) объемом 6GB и выше.

Некоторые вычислительные узлы кластерного уровня могут иметь развитый набор периферии и быть исполненными в стандартном конструктиве (системный блок, монитор, клавиатура и т.п.) IBM PC. Таким образом целесообразно организовать рабочие (терминальные) места суперкомпьютера.

Таким образом, на уровне аппаратных средств отдельный вычислительный узел в целом практически представляет собой полноценную самостоятельную монопроцессорную или SMP мультипроцессорную вычислительную систему.

**Замечание.** Все перечисленные выше комплектующие относятся к широкому рынку IBM PC и выпускаются во многих странах многими фирмами. Это определяет разумные цены на данные изделия. Кроме того, трудно себе представить, чтобы их поставку можно было бы “закрыть” усилиями какой-либо страны (или фирмы).

### 4.2.1.2 Аппаратные средства объединения вычислительных узлов в кластер

Для объединения в единый кластер отдельных вычислительных узлов, входящих в верхний уровень суперкомпьютера, планируется использовать стандартные изделия и комплектующие, предназначенные для организации кластеров класса IBM PC.

В настоящее время существует достаточно широкий спектр таких изделий и комплектующих, основанных на использовании различных сетевых технологий и обеспечивающих различные скорости интеграции процессоров вычислительной установки в кластер:

Сетевая технология	Скорость, обеспеченная доступными сегодня комплектующими
ATM	20..75..300 МБайт/с
HIPPI	100 МБайт/с
SCI	от 55 до 132 МБайт/с
SCSI	от 40 МБайт/с до 132 МБайт/с (Fiber Channel)
Gigabit Ethernet	50 МБайт/с
Fast Ethernet	10 МБайт/с

Все эти комплектующие относятся к широкому рынку IBM PC. Это определяет весьма разумные цены на данные изделия. Кроме того, трудно себе представить, чтобы их поставку можно было бы “закрыть” усилиями какой-либо страны (или фирмы).

### 4.2.1.3 Конструктивное исполнение кластерного уровня суперкомпьютера

Основным конструктивом при исполнении кластерного уровня суперкомпьютера является монтажный шкаф, оснащенный единым блоком (для всех процессорных узлов, периферии процессорных узлов и коммутационного оборудования кластера) питания и средствами вентиляции. Разработка конструктива осуществляется НИИ ЭВМ, имеющей большой опыт в данной области.

**Замечание.** На первом этапе для ускорения сборки изделий можно использовать в качестве конструктивов:

- стандартные монтажные 19-дюймовые шкафы (стойки) различных типоразмеров (19U, 33U, ... до 47U), снабженные средствами вентиляции (например, шкафы серии Vera);
- стандартные монтируемые в 19-дюймовую стойку системные блоки IBM PC, снабженные встроенными блоками питания и средствами вентиляции, индивидуальными для каждого процессорного узла.

#### 4.2.1.4 Оценка сложности технических решений в части аппаратных средств кластерного уровня суперкомпьютера

Разработка и изготовление аппаратной части кластерного уровня суперкомпьютера по сути связана с решением следующих задач:

- выбор готовых комплектующих для процессорных узлов (из большого числа предложений на рынке стандартных комплектующих для IBM PC);
- выбор готовых комплектующих средств объединения вычислительных узлов в кластер (из большого числа предложений на рынке сверхбыстрых сетевых решений класса IBM PC);
- разработка и изготовление монтажных конструктивов (на первом этапе допустимо выбрать готовые монтажные конструктивы, (см. выше раздел 4.2.1.3);
- сборка кластерного уровня суперкомпьютера из готовых комплектующих в монтажных конструктивах.

Таким образом, разработка и производство кластерного уровня суперкомпьютера не сопряжена с решением каких-либо сложных технических и технологических задач. Тем самым, разработка и производство кластерного уровня суперкомпьютера безусловно может быть выполнена силами НИИ ЭВМ, имеющего большой опыт решения подобных задач.

#### 4.2.1.5 Сравнение уровня технических решений в аппаратной части кластерного уровня суперкомпьютера с мировым уровнем

Большая часть современных суперкомпьютеров по сути является “сверхбыстрой сетью обычных рабочих станций”. Например (подробнее см. «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта»), суперкомпьютер Intel ASCI Red—на сегодня самый мощный в мире суперкомпьютер, разработанный по программе Министерства энергетики США ASCI—по сути является именно сверхбыстрой сетью из более чем 4,500 вычислительных узлов вида:  $2 \times$  Intel PPro-200, SMP, RAM 64 MB, HDD 2 GB, объединенных сетевыми средствами класса HiPPI.

Тем самым, предложенные технические решения по своему уровню полностью соответствуют передовому мировому уровню.

### 4.2.2 Базовое (общесистемное) программное обеспечение кластерного уровня суперкомпьютера

Набор базовых программных средств кластерного уровня суперкомпьютера включает в себя:

- ОС Linux;
- ядро T-системы (T-ядро)—набор программных компонент времени выполнения, обеспечивающий логическое объединение вычислительных узлов в кластер на уровне программного обеспечения;
- T-язык и систему программирования на T-языке—набор компиляторов, библиотек, средств трассировки и отладки, а также утилит,—являющийся, наряду с T-ядром, одной из двух основных компонент T-системы.

#### 4.2.2.1 Операционная система Linux

Операционная система Linux является клоном OS UNIX. Она распространяется *свободно*. Последнее означает, что:

- она распространяется бесплатно;
- она распространяется с исходными текстами—хорошая защита от отсутствия “тройных коней” и пр., хорошая возможность расширения функциональных возможностей операционной системы и утилит;

- она развивается огромной армией добровольных программистов-разработчиков (сегодня 7–10 миллионов установок в мире), что обеспечивает высокий темп развития системы, ее тестирования и исправления ошибок в исходных текстах;
- ее распространение не подвержено каким-либо ограничениям каких-либо стран или фирм—как всего лишь один пример: OS Linux включает поддержку динамической (например, OSPF-2) маршрутизации—технологии IP-маршрутизации, запрещенной к экспорту из США.

Операционная система Linux по праву считается одной из самых надежных, эффективных и перспективных операционных систем, которую сегодня многие коммерческие и государственные организации выбирают в качестве базовой для:

- приложений—например, она используется на серверах файлов и печати в фирме Cisco;
- перспективных разработок в области параллельных вычислений—например, она выбрана как базовая операционная система в суперкомпьютерном проекте *Beowulf* (США, NASA).

Операционная система Linux реализована не только для платформ класса IBM PC, но еще и для двух десятков других аппаратных платформ. Тем самым, несложно будет организовать производство суперкомпьютеров с ОС Linux и с T-системой на базе иных микропроцессоров, если это потребуется.

#### 4.2.2.2 T-система и ее сравнение с другими подходами

T-система—разработанное в ИПС РАН программное обеспечение для мультипроцессоров, реализующее концепцию “автоматическое динамическое распараллеливание программ”.

В отличие от других подходов, в T-системе достигается освобождение программиста от многих аспектов разработки параллельных программ, свойственных различным системам ручного статического распараллеливания (таким как PVM и MPI):

- обнаружение готовых к выполнению фрагментов задачи;
- их распределение по процессорам;
- их синхронизацию по данным.

все эти (и другие) операции выполняются в T-системе автоматически и в динамике (во время выполнения задачи). Тем самым достигается более низкие затраты на разработку параллельных программ и более высокая их надежность.

По сравнению с использованием распараллеливающих компиляторов, T-система обеспечивает более глубокий уровень параллелизма во время выполнения программы и более полное использование вычислительных ресурсов мультипроцессоров. Это связано с принципиальными алгоритмическими трудностями (алгоритмически неразрешимыми проблемами), не позволяющими во время компиляции (в статике) выполнить полный точный анализ и предсказание последующего поведения программы во время счета.

Отметим, что особенно эффективно использование T-системы в задачах с неявным параллелизмом, т.е. задачах, параллелизм которых в статике (в момент написания программы или ее компиляции) трудно выявить. Тем самым, применение иных подходов (MPI, PVM и др.) к данным задачам затруднен, а в некоторых случаях—невозможен. К такому классу можно отнести задачи, свойственные интеллектуальным системам (искусственный интеллект), компьютерной алгебры, сложные алгоритмы обработки нечисловой информации и др.

Отличительной чертой T-системы является также следующее свойство: программы, разработанные для T-системы без переработки и без перекомпиляции могут исполняться на мультипроцессоре с любым числом процессоров и с любой коммутационной архитектурой. Это позволяет:

- Без переработки системного и прикладного программного обеспечения расширять вычислительные установки (добавлять число процессоров в систему) и тем самым достигать ускорения счета прикладных программ.
- Без переработки системного и прикладного программного обеспечения исполнять задачи на частично неисправной установке (с вышедшими из строя компонентами). В принципе, возможно достижение более сильной устойчивости к отказам аппаратуры—достижение эффекта продолжения счета без перезапуска задачи после выхода из строя части оборудования, но это предмет дальнейшего развития T-системы.

Таким образом, T-система является инструментом распараллеливания программ, который во многих случаях существенно лучше других подходов. *Тем самым, уровень программных решений реализованных в T-системе превышает достигнутый мировой уровень программных систем поддержки параллельных вычислений.*

#### 4.2.2.3 T-ядро

##### Базовая вычислительная модель

T-ядро осуществляет поддержку времени выполнения вычислительной модели “авто-трансформация вычисляемой сети”—новой модели организации вычислительного процесса, предназначенной для реализации концепции автоматического динамического распараллеливания программ и основанной на:

- использовании качестве основной парадигмы *функционального программирования*. Программа представляет собой набор чистых (без побочных эффектов) функций. Каждая функция может иметь несколько аргументов и несколько результатов. В то же время *тела функций могут быть описаны в императивном стиле* (на языках типа FORTRAN, C и т. п.) Важно только, чтобы:
  - всю информацию извне функция получала только через свои аргументы;
  - вся информация из функции передавалась только через явно описанные результаты.
- использовании нетрадиционной семантики при выполнении вызовов функций (т.н. *сетевой вызов* функции). При сетевом вызове функции порождается новый *процесс*, его выходы становятся поставщиками соответствующих переменных, принимающих *неготовые (не вычисленные) значения*;

В данной вычислительной модели все процессы вычисления функций порождаются в состоянии “*готов к вычислению*”, и единственное событие, приводящее к *потере готовности (к засыпанию)* процесса—это попытка процесса выполнить с неготовым значением любую операцию, отличающуюся от операций передачи значений. Готовность заснувшего процесса будет восстановлена—*процесс будет разбужен*—в тот момент, когда соответствующее неготовое значение (причина засыпания) будет заменено поставщиком на обычное значение.

Таким образом, в каждый момент времени состояние вычисления представлено *вычисляемой сетью*, узлами которой являются запущенные процессы и структуры данных, а *дугами*—отношения поставщик-потребитель. В процессе выполнения программы *вычисляемая сеть автотрансформируется*: в моменты вызовов функций в ней появляются новые узлы, в моменты завершения вычисления всех потребляемых результатов функций узлы исчезают, при выполнении допустимых операции с неготовыми значениями появляются и исчезают дуги.

##### Основные функции T-ядра

В рамках описанной выше модели организации вычислений T-ядро поддерживает основные структуры данных и операции, связанные с реализацией данной вычислительной модели, в частности:

- сетевой вызов функции;
- рассылка вычисленного результата функции потребителям;
- операции работы с неготовыми значениями (передачи неготовых значений);
- поддержка механизмов неявной синхронизации процессов (засыпание, побудка и т. п.)
- внешнее планирование—механизмы запроса и передачи готового к исполнению процесса от одного соисполнителя другому, работающему на простаивающем процессорном элементе мультимпьютера.

##### Основные компоненты T-ядра

Текущая реализация T-системы с точки зрения её структуры состоит из трех относительно независимых компонент:

- TThreads—компонента, поддерживающая множественные потоки управления в рамках единого процесса ОС Linux;
- LMCE—компонента, обеспечивающая распределённый запуск соисполнителей, обмен сообщениями между ними и их согласованное завершение;



- Т-машина, реализующая вычислительную модель с использованием средств, предоставляемых TThreads и LMCE.

**TThreads.** С каждым процессом в Т-системе связан свой поток управления (в англоязычной терминологии—thread), в терминах вычислительной модели соответствующий выполнению каждой функции пользовательской программы. Поскольку процесс-родитель в момент порождения нового процесса не завершается, то в рамках одного соисполнителя, являющегося с точки зрения ОС Linux обычным пользовательским процессом, должны сосуществовать множественные потоки управления.

**LMCE.** Компонента LMCE реализует базовый уровень взаимодействия между соисполнителями. В состав LMCE входит набор программных модулей, включаемых в состав исполняемого файла задачи пользователя на этапе редактирования связей, и отдельный исполняемый файл, играющий роль программного коммутатора.

**Т-машина.** Реализуя основные функции Т-ядра, Т-машина для представления вычисляемой сети использует списковые структуры специального вида (Т-структуры). Т-структуры состоят из звеньев—тегированных фрагментов памяти. Звенья Т-структур расположены последовательно в выделенной для них области памяти соисполнителя—звеньевой памяти. В частности, каждому процессу Т-системы (Т-процессу), помимо потока управления, соответствует Т-структура, включающая в себя аргументы, результаты и локальные Т-переменные Т-функции, вычисляемой данным процессом.

Для управления памятью используется собственная дисциплина выделения памяти и сборка мусора.

Взаимодействие между Т-процессами и Т-машиной, которая функционирует как выделенный поток управления, осуществляется с использованием механизма “системных вызовов” компоненты TThreads. Каждому типу производимых Т-процессом атомарных действий по преобразованию вычисляемой сети, существенно изменяющих её состояние, соответствует отдельный системный вызов.

Текущее состояние Т-ядра и дальнейшие работы, планируемые в данном направлении

Являющаяся результатом проведенной в ИПС РАН многолетней разработки имеющаяся на сегодняшний момент опытная реализация Т-ядра способна обеспечить поддержку выполнения Т-программ на программно-аппаратной платформе “кластер вычислительных узлов на базе монопроцессорных и SMP мультипроцессорных IBM/PC-совместимых компьютеров, работающих под управлением ОС Linux”. Разработанные и реализованные в данной версии Т-ядра алгоритмы прошли обширную и достаточную проверку в процессе опытной эксплуатации аппаратно-программного прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера (см раздел 6.1.2 настоящего документа).

На этапе реализации Программы СКИБР существующая опытная версия Т-ядра должна быть доведена до первой промышленной версии Т-ядра, что в основном заключается в выполнении следующих работ:

- включение в Т-ядро ряда функций, предварительная проработка которых уже проведена:
  - поддержка парадигмы распределенных объектов и ресурсов—что среди прочего улучшает характеристики сопряжения Т-ядра с файловой системой и даст возможность эффективного взаимодействия с ОВС;
  - включение в Т-ядро механизмов, реализующих выполнение Т-задачи в режиме “повторение трассы выполнения”—с целью поддержки развития средств отладки Т-программ;
- выполнение ряда изменений в коде Т-ядра, связанных с оптимизацией реализации:
  - протокола LMCE (блокирование передаваемых пакетов);
  - алгоритма внешнего планирования (введение иерархии “бирж труда”);
  - алгоритмов управления памятью;
- выполнение ряда изменений в коде Т-ядра, связанных с повышением мобильности:
  - реализация поддержки протоколов транспортного уровня, отличных от UDP/IP—например, пакетного протокола, поддерживаемого аппаратными реализациями SCI;
  - реализация элементов поддержки современных и перспективных 64-битовых микропроцессорных архитектур (Alpha, UltraSparc II, Merced).

Опираясь на весьма значительный опыт, приобретенной сложившейся группой высококвалифицированных специалистов-разработчиков Т-системы в процессе разработки и реализации существующей версии Т-ядра, коллектив ИПС РАН безусловно способен справиться с разработкой промышленной версии Т-ядра в предусмотренные Программой сроки.

**Замечание.** Более подробное описание реализуемой Т-ядром вычислительной модели, а также функций и принципов реализации как Т-ядра в целом, так и его отдельных структурных элементов, приведено в «Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.» в разделах 1–3.

#### 4.2.2.4 Т-язык и система программирования

##### Языковой интерфейс Т-системы

Программы, разрабатываемые для исполнения в среде Т-системы должны быть написаны в функциональном стиле, и Т-программа является определением набора чистых (без побочных эффектов) Т-функций. Учитывая то обстоятельство, что сегодня императивные языки используются для разработки прикладных систем чаще, чем функциональные, при разработке языка программирования для Т-системы (рабочее название: *язык t2cp*) было принято решение использовать расширение языка Си небольшим числом новых конструкций (Т-конструкций).

Язык *t2cp* реализуется несложным препроцессором, преобразующим входную Т-программу в программу на языке Си: перечисленные выше Т-конструкции заменяются на соответствующие вызовы Т-системы; остальная часть программы остается без изменения. Результат препроцессорирования обрабатывается стандартным в ОС Linux компилятором языка Си и собирается с библиотеками Т-системы в исполняемый файл.

С точки зрения программиста, язык *t2cp* мало чем отличается от языка Си: большая часть текста Т-программы является обычным текстом на языке Си, и только небольшая часть—Т-конструкциями. Как показывает наша практика, во многих случаях хорошо структурированные программы на языке Си несложно переписать под Т-систему—во многих случаях для этого достаточно переоформить (записать в виде Т-конструкций) верхний уровень программы.

Использование чисто функционального стиля на верхнем уровне разработки программы влечет за собой все его достоинства и недостатки: данный уровень программы должен быть тщательнейшим образом спланирован и учитывать особенности исполнения разрабатываемых Т-функций в Т-системе. В частности:

- Необходимо следить, чтобы Т-функции реализовывали достаточно ёмкие (с точки зрения объема вычисления) фрагменты задачи.
- Если вычисление некоторой Т-функции может привести к выдаче большого потока<sup>1)</sup> данных и/или к выполнению большого количества вызовов Т-функций, приводящих к порождению большого числа Т-процессов, то возможно необходимо пересмотреть функциональное описание задачи. При этом, в большинстве случаев достаточно определить некоторые функции ленивыми (*lazy*) или ленивыми с потоковыми результатами<sup>2)</sup>.

**Замечание.** Поскольку из Т-задачи можно вызывать вспомогательные Си-функции с побочным эффектом, ограниченными рамками тела реализуемой Т-функции, то тем самым реализуется возможность вызова стандартных функций, входящих в состав:

- вычислительных библиотек;
- системных библиотек—ввод-вывод, телекоммуникационные примитивы и т.п.

**Замечание.** Описанный выше язык *t2cp* и его реализация отражают сегодняшний этап развития Т-проекта.

##### Отладка Т-программ

Отладка программ, реализованных в рамках Т-системы, на сегодняшний день в общем случае производится в три этапа:

<sup>1</sup> В Т-языке поддержано понятие *потоковый результат* Т-функции.

<sup>2</sup> В Т-языке поддержаны понятия *ленивая (lazy) Т-функция* и *ленивая Т-функция с потоковыми результатами*.

- На первом этапе с использованием обычных средств отладки—стандартных отладчиков класса gdb или ddd (входят в различные свободно доступные дистрибутивы ОС Linux, например Debian)—производится отладка программ в однопроцессорном режиме. Как правило, на данном этапе отладки удается обнаружить и устранить большую часть допущенных ошибок;
- На втором этапе производится отладка в специальном режиме, при котором с использованием возможностей X-Window System (широко распространенного графического интерфейса, реализованного для большинства клонов ОС UNIX, в том числе и для ОС Linux) на единый графический экран проецируются интерфейсы нескольких экземпляров отладчика ddd, запущенных в различных вычислительных узлах. Каждый из данных отладчиков управляет выполнением отдельного соисполнителя, которые, взаимодействуя, образуют единую среду выполнения Т-программы. Данный режим отладки позволяет, как правило, обнаружить и устранить значительную часть ошибок, не обнаруженных на предыдущем этапе.
- В случае, если обнаруживается, что из-за несовпадения динамики реального выполнения распределенной программы с динамикой, обеспечиваемой описанным в предыдущем пункте режимом отладки некоторые ошибки все-таки остаются не обнаруженными, используется режим тестирования программы с включенной фиксацией трассы исполнения. Использование данного режима позволяет с различной степенью подробности фиксировать последовательности событий, входящих в задаваемые программистом подмножества различных стандартных классов событий, происходящих в процессе выполнения программы в различных соисполнителях (т.е. в различных вычислительных узлах), в частности:
  - системные вызовы Т-системы, с которыми Т-приложение обращается к Т-ядру;
  - моменты передачи Т-процесса на выполнение, приостановки Т-процесса по неготовности запрошенного им значения и завершения Т-процесса;
  - этапы транзакций, связанные с функционированием механизма разъемов;
  - формирование транспортных форм данных и процессов;
  - моменты обменов данными между различными соисполнителями (отправление и получение LMCE-пакетов);
  - и т.д.

Анализ снятой трассы выполнения позволяет затем обнаружить и устранить практически любую ошибку, в том числе и ошибку базового программного обеспечения.

Текущее состояние Т-языка и средств программирования и дальнейшие работы, планируемые в данном направлении

Разработанные и реализованные в данной версии Т-системы компиляторы и средства отладки прошли достаточно длительный этап отладки и обширную и достаточную проверку в процессе опытной эксплуатации аппаратно-программного прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера (см раздел 6.1.2 настоящего документа).

Во время реализации Программы СКИБР существующая опытная версия компилятора с языка t2ср должна быть доведена до первой промышленной версии компилятора, что в основном включает в себя:

- введение модульности уровня Т-функций, то есть возможности отдельной компиляции различных модулей, включающих определения Т-функций с возможностью последующего их объединения в единое приложение на этапе редактирования связей;
- расширение языка новыми типами данных и операциями для работы с ними.  
Кроме того, планируется:
- реализовать компилятор с языка сТ—варианта Т-языка, являющегося диалектом (а не пре-процессируемым расширением) языка Си;
- реализовать набор стандартных библиотек Т-функций, реализующих различные классы алгоритмов;
- Реализовать систему автоматизированного анализа трассы выполнения, зафиксированной при тестовом запуске;

- реализовать систему распределенной отладки, способную, взаимодействуя с Т-ядром, обеспечить отладку Т-программ в режиме повторения трассы выполнения.

**Вывод.** Опираясь на проведенные проработки и результаты опытной эксплуатации описанных в предыдущих разделах программных средств, сложившийся в ИПС РАН коллектив специалистов-разработчиков Т-системы способен справиться с разработкой промышленной версии набора предназначенных для Т-системы средств программирования в предусмотренные Программой сроки.

Текущее состояние разработки документации на Т-ядро и средств программирования для Т-системы

Кроме собственно программных средств Т-системы, в настоящее время разработана и документация на эти программные средства

- Техническое описание ядра Т-системы (46 стр.);
- Средства программирования для Т-системы. Описание языка программирования T2CP (29 стр.)
- Средства программирования для Т-системы. Примеры T2CP-программ (38 стр.)
- Рабочее описание реализации прототипа комплекса аппаратных средств мультипроцессора для Т-системы (7 стр.)

#### **4.2.3 Прикладное программное обеспечение кластерного уровня суперкомпьютера**

Области и направления разработки прикладных систем, а также состав прикладного программного обеспечения уточняются на первом этапе работ по Программе СКИБР параллельно и в соответствии с ходом работ реализации аппаратных средств и базового общесистемного программного обеспечения суперкомпьютера.

Проведение разработки прикладного программного обеспечения кластерного уровня суперкомпьютера обеспечивается мощными и признанными коллективами специалистов в области разработки программного обеспечения, являющимися исполнителями работ по Программе СКИБР (см. Раздел 2, на стр. 5).

Опираясь на имеющийся серьезный теоретический и практический задел в области разработки программного обеспечения и прикладных систем в широком спектре различных прикладных областей, данные коллективов разработчиков способны выполнить разработку прикладного программного обеспечения кластерного уровня суперкомпьютера в предусмотренные Программой сроки.

**Замечание.** Дополнительный анализ см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта» в разделах "4. Научно-технический и производственный потенциал." и "4.6. Мероприятия по выполнению Программы".

#### **4.2.4 Сравнение уровня технических решений в части кластерного уровня суперкомпьютеров с зарубежными разработками**

Внимательный анализ информационных материалов, посвященных конструкторским решениям и передовым технологиям в области аппаратного обеспечения высокопроизводительных параллельных вычислений позволяет сделать однозначные выводы :

- *Подавляющая часть современных параллельных вычислительных установок строится как множество самостоятельных вычислительных узлов, объединенных в единую вычислительную систему с использованием высокоскоростной коммутационной сети;*
- *Для построения вычислительных узлов используются стандартные изделия широкого применения: микропроцессоры, системные платы или даже законченные компьютеры;*
- *Для организации высокоскоростной коммутационной сети используется широкий спектр сетевых изделий и технологий, разрабатываемых специализирующимися в этой области фирмами;*
- *Наблюдается сильная тенденция к “разделению труда” и ведущие производители суперкомпьютеров широко используют изделия и технологии, развиваемые другими фирмами. При этом часто создание суперкомпьютера по технологической сложности сравнимо с “отверточной сборкой” удачно подобранных компонентов.*

Эта тенденция пронизывает всю область разработки и производства параллельных вычислительных систем сверху донизу—от рекордных систем верхнего уровня, таких как суперкомпьютер Intel TeraFLOPS или вычислительные системы CRAY T3E-900/1200 вплоть до таких предназначенных для широкого использования различными предприятиями и организациями систем, как: NUMA-Q 2000 фирмы Sequent, системы серии Param OpenFrame индийской государственной корпорации C-DAC или построенные с использованием технологии ServerNET кластеры серверов фирмы Compaq. Каждая из этих систем построена по упомянутым выше архитектурным принципам и в той или иной мере основывается на готовых серийных компонентах, предназначенных для широкого рынка (и тем самым—дешевых компонентах)—будь то микропроцессоры, материнские платы в сборе, готовые самостоятельные компьютеры, готовые коммутационные технологии и изделия.

Аналогичная тенденция—стремление к унификации решений—в сильной степени проявляется и в области программного обеспечения параллельных вычислений. В частности:

- в качестве базовой операционной системы практически всегда используется клон ОС UNIX, дополняемый иногда использованием в части вычислительных узлов легковесного ядра, обеспечивающего необходимое для проведения вычислений подмножество стандартного операционного окружения, предоставляемого ОС UNIX. Ряд вычислительных установок, позиционируемых в качестве параллельных сетевых информационно-коммерческих серверов, может также поставляться с предустановленной версией ОС Windows NT фирмы Microsoft.
- в качестве базовых инструментальных средств разработки программ в рамках одного вычислительного узла используются компиляторы стандартных широко распространенных языков программирования—FORTRAN (Fortran77, Fortran90) C, и C++;
- для организации параллельных вычислений используются диалекты языка FORTRAN (чаще всего HPF), базовые библиотеки поддержки передачи сообщений—как правило MPI или PVM,—а также библиотеки поддержки организации выполнения и взаимодействия легковесных процессов, предоставляющих, как правило, интерфейс, стандартизованный как POSIX Threads.

**Замечание.** Использование данных унифицированных программных решений практически всегда приводит к реализации технологии *статического* (статического ручного или статического автоматизированного) распараллеливания, со всеми вытекающими недостатками данного подхода.

**Вывод.** По характеристике используемых аппаратных средств мультипроцессора и по характеру подходов к программным средствам предлагаемый на кластерном уровне суперкомпьютера подход соответствует передовым современным мировым тенденциям.

При этом, по сравнению с другими проектами, существенным преимуществом предлагаемого в T-системе подхода является реализованная концепция автоматического динамического распараллеливания программ (подробнее см. раздел 4, стр. 9).

#### **4.2.5 Сравнение уровня технических решений в части кластерного уровня суперкомпьютеров с другими российскими разработками**

В России многие научные организации ведут ряд работ в области суперкомпьютерных технологий. По результатам исследований:

- материалов последних российских конференций, посвященных аппаратным и программным средствам высокопроизводительных вычислений;
- документов, доступных в открытой печати;
- сведений из сети Интернет (сервер "Параллельные вычисления" <http://parallel.srcc.msu.ru/>, разделы "Россия/Суперкомпьютерные центры", "Россия/Персоналии" и Веб-проект "Карта параллельных вычислений в России" <http://www.botik.ru/~t-system/Parallel-Russia/>)

можно заметить следующую тенденцию: наряду с использованием отечественных аппаратных средств (MBC-100, параллельная плата-акселератор для ПЭВМ от НИИ MBC, Таганрог) и готовых суперкомпьютеров зарубежного производства (Cray T3D, Cray YMP C90, IBM RS/600 Sp, параллельные установки Parsytec, nCUBE 2) в области высокопроизводительных вычислений в последнее время бурно развивается интерес российских разработчиков системного

**программного обеспечения и прикладных систем к кластерным архитектурам** (тесно связанным сетям) из стандартных мощных рабочих станций или из стандартных одноплатных ЭВМ.

Большинство российских проектов (даже изначально ориентированных исключительно на МВС-100) сегодня переходят к поддержке таких архитектур:

- Проекты **Норма, DVM, GNS**, (ИПМ РАН, Москва)—изначально созданные под архитектуру МВС-100, с учетом спроса и мировых тенденций перенесены под кластерные архитектуры, включая сети рабочих станций с ОС Linux и MPI.
- Проекты **Java-DVM, mpC** (ИСП РАН, Москва) — разработаны изначально для сетей рабочих станций (Java-машин—для проекта Java-DVM).
- Проекты **ЛВК** (ВМиК МГУ, Москва), **ГРИФ** (ИВМ РАН, Москва), **V-Ray** (НИВЦ МГУ, Москва) — поддерживает любые параллельные архитектуры.

**Вывод.** Как и авторы Т-системы, большинство российских разработчиков программного обеспечения для высокопроизводительных вычислений одинаково понимают современные тенденции в области аппаратных средств (широкое использование кластерных архитектур, в том числе неоднородных сетей) и программных средств (использование ОС класса UNIX, использование дополнительных оригинальных средств поддержки параллельного счета—MPI, PVM,— использование специальных языков и диалектов, специализированных компиляторов).

При этом, по сравнению с другими проектами существенным преимуществом предлагаемого в Т-системе подхода является реализованная концепция (а) автоматического (б) динамического распараллеливания программ (подробнее см. раздел 4, стр. 9).

### 4.3 Технические решения подсистемы ОВС суперкомпьютера

Как уже было отмечено в разделе 4.1 стр. 11 данного документа, второй уровень суперкомпьютера—уровень ОВС (однородная вычислительная среда, разработка предприятия СКС)—представляет собой синхронную сеть большого числа ( $10^4$ – $10^7$ ) простых однобитовых процессоров (выпуск обеспечен НПО “Интеграл”), позволяющую чрезвычайно эффективно реализовать задачи, которые не всегда легко распараллеливаются на кластерном уровне суперкомпьютера.

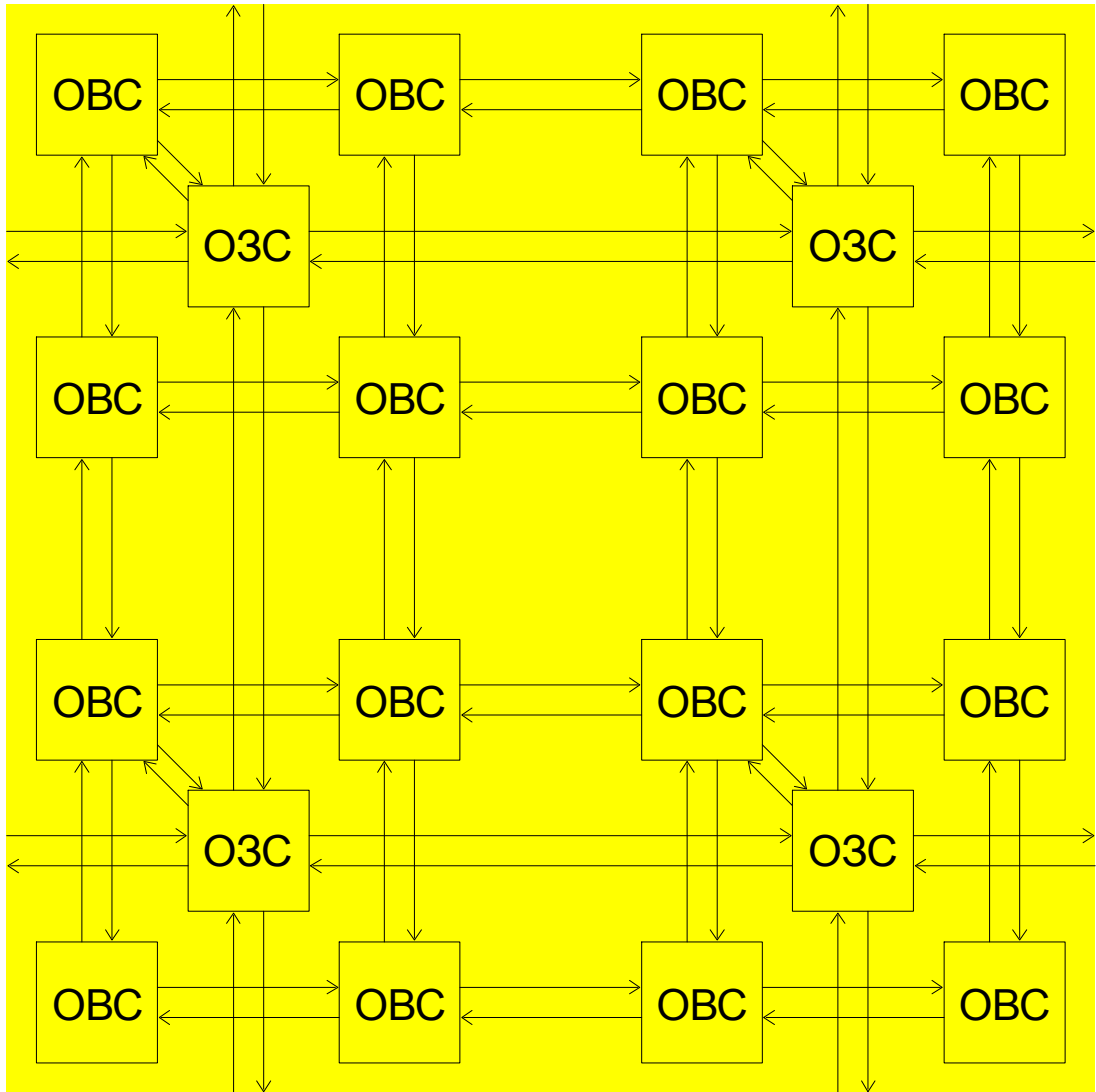
Характеристиками таких задач являются: большие потоки данных, относительно простая логика вычисления, необходимость обработки в реальном режиме времени информации от нескольких источников. ОВС позволяет реализовать различные уровни параллелизма, в том числе, мелкозернистый параллелизм, который не реализуется кластерным уровнем суперкомпьютера.

Ниже приводится более подробное описание технических решений, принятых к реализации в области аппаратных и программных средств на данном уровне суперкомпьютера.

#### 4.3.1 Архитектура аппаратных средств уровня ОВС суперкомпьютера

##### 4.3.1.1 ОВС—однородная вычислительная структура

Основой подсистемы ОВС суперкомпьютера, представляющей собой единый вычислительный комплекс, является двухслойная систолическая вычислительная структура—поле ОВЗС.



**Рисунок 2. Структура поля ОВЗС**

Основой подсистемы ОВС суперкомпьютера, представляющей собой единый вычислительный комплекс, является двухслойная систолическая вычислительная структура—поле ОВЗС.

Поле ОВЗС представляет собой систолическую вычислительную структуру. Процессоры составляют двухслойную прямоугольную решетку. Каждый слой состоит из однотипных процессоров.

ОВС—однородная вычислительная среда. ОЗС—однородная запоминающая среда. Каждый слой содержит процессоры определенного вида. В пределах слоя процессор связан с четырьмя соседями—слева, справа, снизу, и сверху. Связи однобитные дуплексные. Таким образом каждый процессор имеет четыре входа и четыре выхода в пределах слоя.

Плоскость ОВС содержит в 4 раза больше процессоров, чем плоскость ОЗС. Каждый процессор ОЗС имеет связь с одним процессором ОВС. Процессоры ОВС образуют ячейки 2x2, в каждой ячейке один процессор связан с процессором ОЗС.

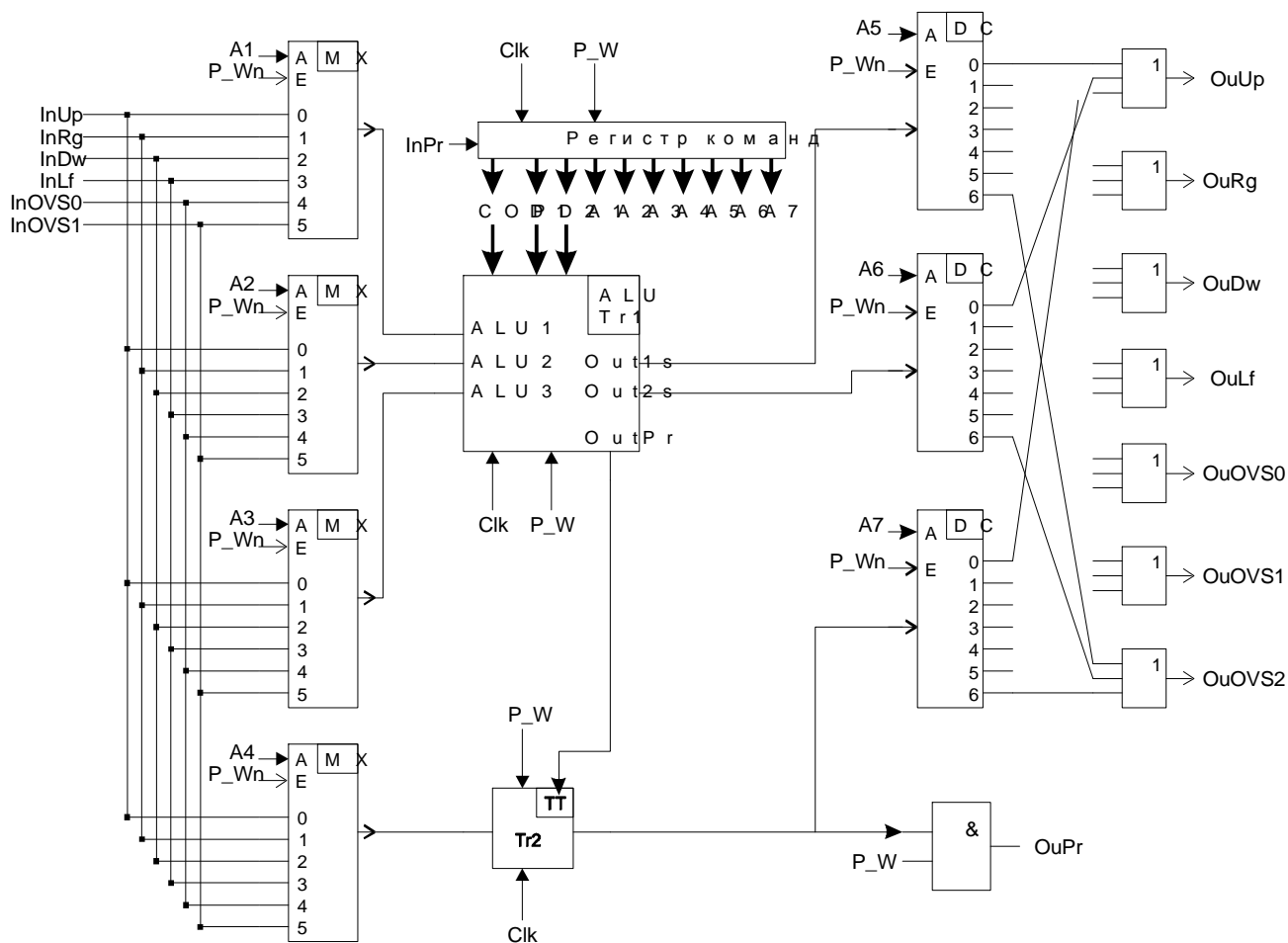
Такая пятерка образует модуль—наименьшую единицу двухслойного поля.

Данные по каналам связи передаются последовательно. За один такт по каналу передается 1 бит. На каждом такте на вход поступает очередной бит данных, над битами производится операция с учетом состояния процессора (например бита переноса), результат выдается на выход процессора и становится доступен его соседям на следующем такте. Обработка данных является принципиально конвейерной, процессор является минимальной неделимой единицей конвейера.

Поле ОВЗС реализует два способа управления обработкой данных. Основной режим работы ОВЗС—статический. После программирования поля, каждый процессор поля выполня-

ет заданную инструкцию на протяжении всего времени работы программы. Поле превращается в проблемно-ориентированный вычислитель, реализующий заданную потоковую программу. Управление обработкой производится потоками данных, проходящими через поле.

Динамический режим подразумевает перепрограммирование поля или отдельных его частей, то есть смену потоковой программы.



**Рисунок 3. Структура процессора ОВС**

#### 4.3.1.2 Структура процессоров ОВЗС

Структура процессоров ОВС и ОЗС в общем похожа. Процессоры имеют некоторое число входов и выходов (определяемое типом процессора) и внутренние каналы обработки. Входные мультиплексоры позволяют подать на вход канала сигнал с заданного входа процессора. Выходные дешифраторы выдают выходной сигнал канала на заданный выход процессора. Работа мультиплексоров и дешифраторов, а также способ функционирования каналов обработки определяются кодом записанным в регистр команды процессора.

Процессор ОВС (см. Рисунок 3. Структура процессора ОВС) представляет собой устройство, содержащее 3 канала обработки и передачи данных. Два из них являются линиями транзита и служат для передачи данных через процессор к его соседям без изменений. Третий канал представляет собой арифметическо-логическое устройство, позволяющее выполнять бинарные и тернарные операции над данными, поступающими на входы процессора. Любой вход канала может быть сопоставлен любому входу процессора. То же верно и для выходов. Если на один выход процессора направляются выходы нескольких каналов, то они объединяются по ИЛИ.

Процессор ОЗС (см. Рисунок 4 Структура процессора ОЗС) содержит два канала. Первый из них—линия транзита—служит для передачи данных. Второй представляет собой сдвигающий регистр, программируемой длины с программно-управляемым сдвигом.

Логически единое поле ОВЗС на уровне аппаратной реализации организовано как набор отдельных идентичных структурных единиц уровня ОВС суперкомпьютера—блоков ОВС.



Каждый из блоков ОВС включает в себя частичные сегменты (матрицы) описанных выше плоскостей ОВС и ОЗС и может функционировать как в самостоятельном режиме, так и в режиме совместной работы с другими блоками ОВС, входящими в состав данного уровня суперкомпьютера.

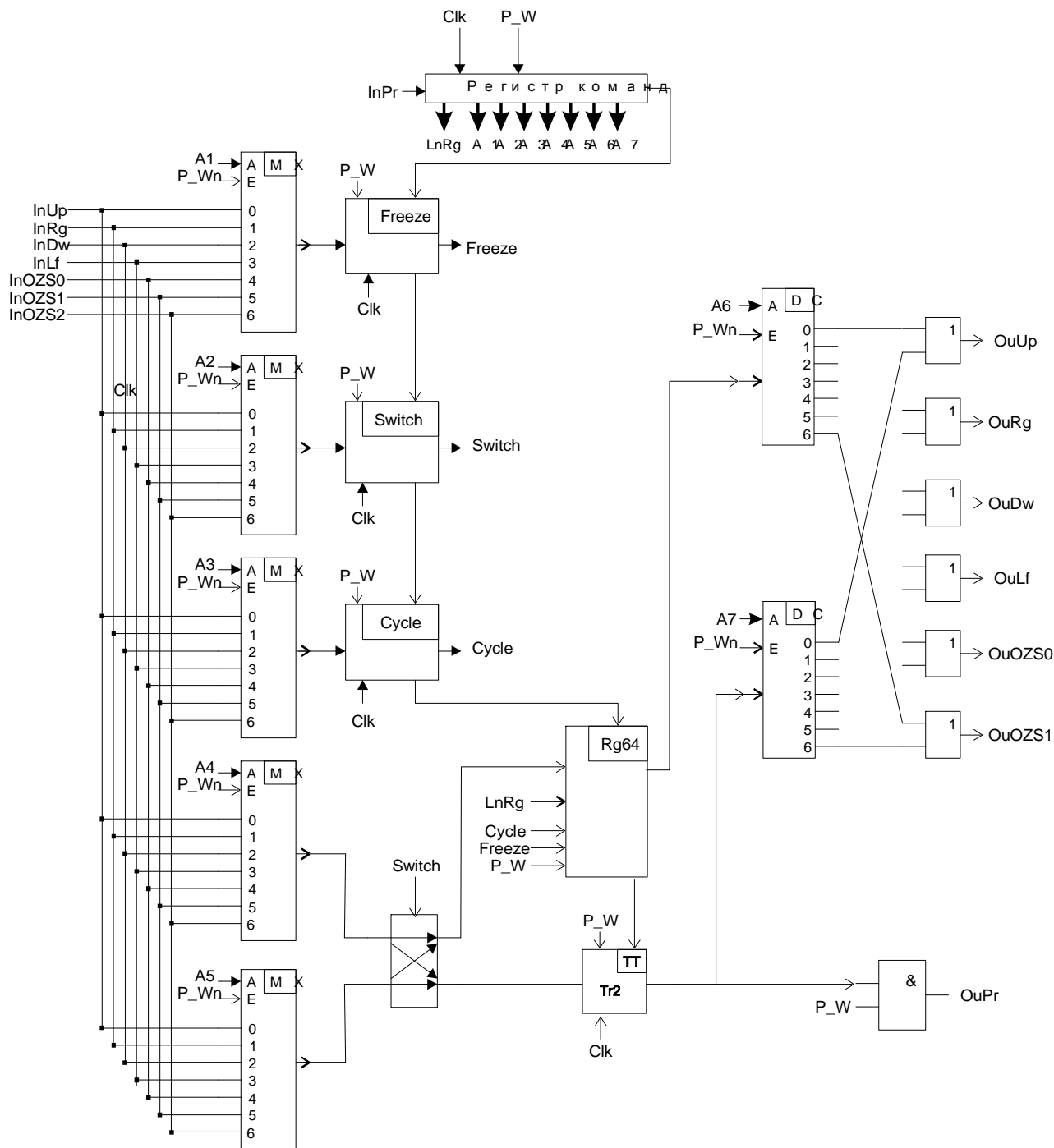


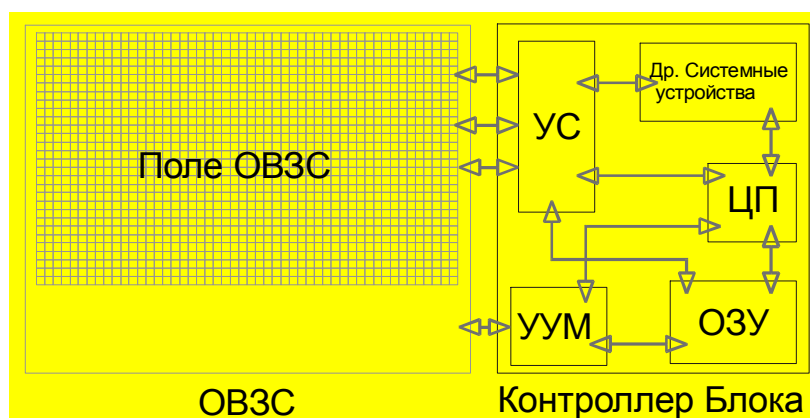
Рисунок 4 Структура процессора ОЗС

#### 4.3.1.3 Блок ОВС

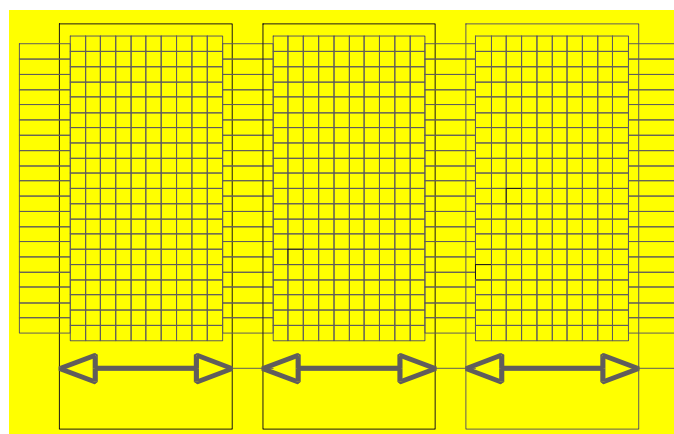
Блок ОВС является самостоятельной единицей, которая может функционировать как самостоятельно, так и в составе сложного вычислительного комплекса. Блок состоит из двух частей—однородной вычислительной структуры (ОВС) и Контроллера Блока (КБ).

ОВС предназначена преимущественно для решения вычислительных задач, КБ—для задач управления и обмена. Каждая из частей может быть реализована различным образом, однако интерфейс их взаимодействия остается одним и тем же. Это позволяет получать блоки ОВС с разными параметрами, комбинируя варианты исполнения ОВС и контроллера блока.

Подобная масштабируемость позволяет выпускать по единой технологии различные вычислительные устройства—от встраиваемых промышленных спецвычислителей до кластерных суперкомпьютеров.



**Рисунок 5. Структура блока ОВС**



**Рисунок 6. Поле ОВЗС, образуемое несколькими платами ОВС**

*Поле ОВЗС* состоит из набора одинаковых плат. Каждая плата содержит набор микросхем ОВЗС, формирующих двухслойную матрицу процессоров. Платы соединены между собой так, что образуют единую матрицу процессоров большего размера. Матрица ОВЗС делится на сегменты. В разные сегменты могут загружаться независимые процессы. Все процессоры ОВЗС синхронизируются импульсами общего тактового генератора, расположенного в КБ. Платы объединены шиной управления, подключенной к КБ.

*Контроллер блока* предназначен для решения задач управления и обмена на уровне блока. Он обеспечивает электрическое и логическое управление матрицей ОВС. КБ может содержать адаптеры внешних каналов. Помимо решения задач управления КБ может использоваться как самостоятельное вычислительное устройство, работая параллельно с ОВС, и, решая задачи, которые плохо реализуются на ОВС.

#### 4.3.1.4 Организация совместной работы блоков

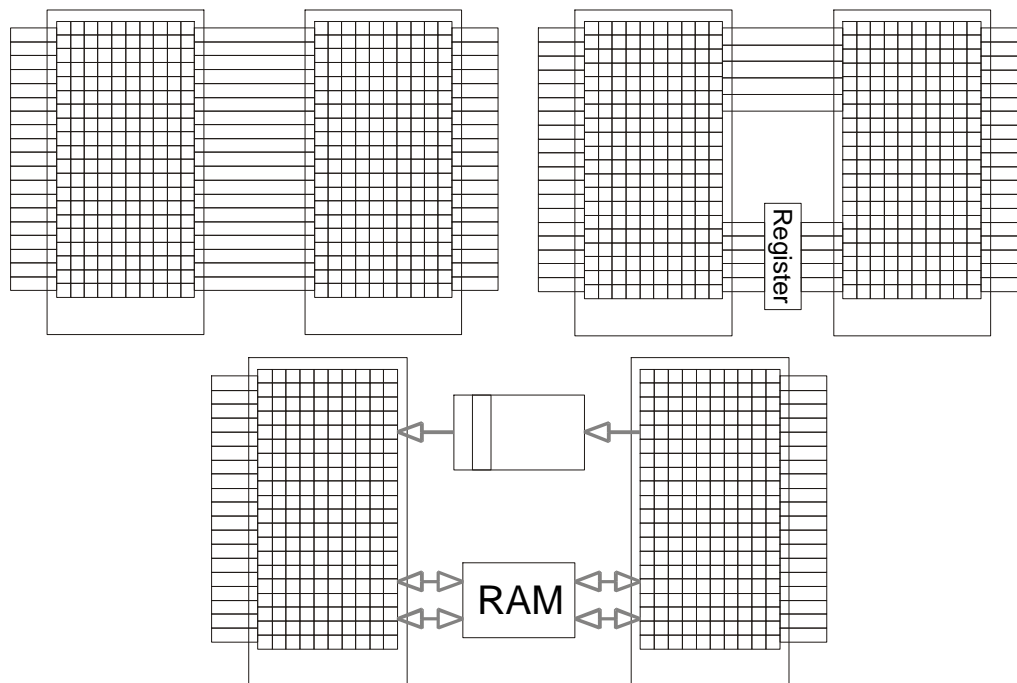
Блоки ОВЗС могут быть объединены в единое однородное синхронно работающее поле. В имеющемся макетном образце ОВС была реализована синхронная работа более 92000 ПЭ в составе 4х блоков на частоте 5МГц. Задача синхронизации большого числа процессоров на более высоких частотах может оказаться технически трудной, поэтому определенные ограничения на размер синхронного поля существуют.

Существуют следующие варианты объединения блоков для выполнения одной или нескольких связанных задач.

##### Синхронное однородное поле

ПЭ блоков соединяются полной системой связей. Гарантируется синхронная работа ПЭ блоков. Матрицы блоков объединяются в одну—большого размера. Вариант наиболее удоб-

ный для программирования и трудный для реализации. Накладывает жесткие ограничения по рабочим частотам и физическому расположению блоков друг относительно друга.



**Рисунок 7. Организация совместной работы блоков**

#### Синхронное неоднородное поле

Гарантируется синхронная работа ПЭ блоков. Задержка распространения сигналов между блоками составляет целое число тактов и не вносит асинхронности. Связи между ПЭ разных блоков не обязательно образуют сплошную решетку, число связей может быть меньше, чем ширина поля. Такое объединение технически проще реализовать.

#### Асинхронные поля

ПЭ блоков синхронизируются от разных генераторов. Взаимодействие производится при помощи буферов, в которых хранятся промежуточные результаты. Буферы могут представлять собой регистры, ОЗУ, очереди или комбинацию всего перечисленного.

Каждая из двух составляющих частей блока может иметь различную реализацию. Размеры матрицы ОВЗС могут варьироваться. КБ могут отличаться типом центрального процессора или вообще не иметь такового. В этом случае БМУ реализуется как автомат с жесткой логикой. Память может иметь разный размер и организацию.

Варианты исполнения блока ОВЗС:

БМУ	микропроцессор или автомат с жесткой логикой
Контроллеры ВУ в КБ	есть или нет
Задачи ЦП	Управление или управление + вычислительные задачи
Исполнение блока	Самостоятельное или несколько в стойке.
ПО блока	Специфическое или адаптированное стандартное.

Свобода в выборе исполнения тех или иных компонентов означает:

- Возможность использования стандартных программных и аппаратных компонентов.
- Возможность выполнить блок ОВЗС на отечественной элементной базе.

#### 4.3.1.5 Конструктивное исполнение уровня ОВС суперкомпьютера

Основным массовым элементом ОВС являются СБИС “МиниТера”. К данному моменту проведены разработка принципиальной схемы СБИС и программное моделирование. Разработка топологии и изготовление будут производиться на НИКТП “Белмикросистемы”. На первом этапе и для суперкомпьютеров общего назначения предполагается использование

СБИС в корпусном варианте. В дальнейшем предполагается для изделий специального назначения использовать МКМ-технологии бескорпусной сборки.

Основными конструктивами при исполнении уровня ОВС суперкомпьютера являются:

- ТЭЗ, на котором расположены СБИС ОВС;
- ТЭЗ контроллера блока ОВС;
- ТЭЗ устройств сопряжения;
- ТЭЗ памяти.

В зависимости от выбранной для реализации комплектации последние три ТЭЗа могут быть объединены. Это определяется в процессе разработки.

ТЭЗы собираются в монтажном шкафу, оснащённом блоками питания и средствами вентиляции. Разработка конструктивов осуществляется НИИ ЭВМ, имеющим большой опыт в данной области.

**Замечание.** На первом этапе для ускорения сборки макетных образцов возможно с целью унификации использовать в качестве конструктивов стандартные монтажные 19-дюймовые шкафы (стойки) различных типоразмеров (19U, 33U,... до 47U), снабжённые средствами вентиляции (например, шкафы серии Vera);

#### 4.3.1.6 Оценка сложности технических решений по аппаратной части уровня ОВС суперкомпьютера

Разработка и изготовление аппаратной части уровня ОВС суперкомпьютера предполагает решение следующих задач:

- Разработка и изготовление СБИС “МиниТера”.
- Разработка и изготовление ТЭЗ ОВС, контроллера блока ОВС, устройств сопряжения, памяти.
- выбор готовых комплектующих для ТЭЗ контроллера блока ОВС, устройств сопряжения, памяти;
- разработка и изготовление монтажных конструктивов (на первом этапе допустимо выбрать готовые монтажные конструктивы (см. выше раздел 4.3.1.5, стр. 27);
- сборка уровня ОВС суперкомпьютера из ТЭЗов в монтажных конструктивах.

Таким образом, разработка и производство уровня ОВС суперкомпьютера сопряжено с решением довольно сложных технических и технологических задач. Но стоит отметить, что НИКТП “Белмикросистемы” и НИИ ЭВМ имеют большой опыт решения подобных задач и, безусловно, в состоянии с ними справиться.

#### 4.3.1.7 Сравнение уровня технических решений по аппаратной части ОВС уровня суперкомпьютера с мировым уровнем

В распоряжении предприятия “Суперкомпьютерные системы”, являющегося правопреемником ЗАО “Мультикон, находится несколько экспериментальных образцов суперкомпьютера “Мультикон” (разработан по заказу Министерства науки и техники в 1993 г.), изготовленных при участии НПО “Интеграл” (сейчас НИКТП “Белмикросистемы” г. Минск). На этапе архитектурных проработок аппаратных решений данное изделие было успешно использовано в качестве полноценного макета аппаратных средств уровня ОВС суперкомпьютера. Проведенная с использованием данного макета апробация принятых в части аппаратных средств подсистемы ОВС суперкомпьютера решений (в частности см. приложение «Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера “Мультикон”» и «Приложение 4. ») показала, что несмотря на то что технологический уровень микроэлектроники в России и в Белоруссии значительно отстает от передового данные решения обеспечивают

- возможность достижения сверхвысокого уровня производительности;
- наилучшие удельные объёмные, массогабаритные и стоимостные характеристики в части производительности и энергопотребления, в частности:
  - максимальную производительность на единицу объёма;
  - минимальную потребляемую мощность на единицу объёма;
  - наилучшее соотношение стоимость/производительность;

- высокую технологичность и простоту сборки и эксплуатации подсистемы ОВС суперкомпьютера.

Опираясь на проведенные проработки и результаты опытной эксплуатации макета аппаратных средств уровня ОВС суперкомпьютера, сложившийся в предприятии СКС коллектив специалистов-разработчиков способен справиться с разработкой аппаратных средств уровня ОВС суперкомпьютера в предусмотренные Программой сроки.

#### **4.3.2 Базовое (общесистемное) программное обеспечение подсистемы ОВС суперкомпьютера**

Набор базовых программных средств уровня ОВС суперкомпьютера включает в себя:

- Элементы операционной системы.
- Инструментальные средства разработчика программного обеспечения для ОВС.
- Библиотеки стандартных функций для ОВС.

##### *4.3.2.1 Математическая модель ОВС—Data Flow Graph*

С точки зрения схемотехники ОВС—компьютер синхронной обработки информации, т.к. все процессорные элементы срабатывают одновременно от одного синхросигнала. Однако необходимо уточнить, что, учитывая особенности программирования, наиболее адекватной моделью для ОВС является модель Data Flow Graph, т.е. модель асинхронной обработки информации.

Рассмотрим подробнее данное утверждение. Хотя минимальной физической программируемой единицей ОВС является процессорный элемент, имеет смысл рассматривать логическую единицу программирования—макрос, также называемый блоком программы. Логически, макрос соответствует оператору либо функции языка высокого уровня. Для примера можно указать операцию умножения двух целочисленных значений, операцию преобразования из параллельного представления данных в последовательное, функцию медианного фильтра. В приведенном списке операций присутствуют как простейшие операции (умножение), так и сложные функции (фильтрация), но и те, и другие реализуются на ОВС в виде макросов.

В общем случае, макрос—это самостоятельный функциональный блок, с заданным набором входных и выходных параметров. При программировании на ОВС макрос выполняет роль самостоятельного конечного автомата, выполняющего заданную функцию, реализованного на группе процессорных элементов. Таким образом, в результате программирования для ОВС, мы получаем набор конечных автоматов, реализующих все функциональное множество исходной программы, объединенных между собой коммутационными каналами (трассами). Особенностью макроса является условие корректности выполнения выполняемой функции—одновременное поступление всех входных параметров на его входы.

В частном случае данное условие достигается глобальной синхронизацией графа решаемой программы (данный процесс будет описан подробнее ниже). Но такой подход не позволяет обрабатывать некогерентные потоки и применим лишь для синхронных потоков, что является серьезным ограничением прикладных возможностей ОВС. Поэтому в систему команд ОВС была введена специальная операция, позволяющая "замораживать" самостоятельные элементы потока данных на неопределенное число тактов. Иными словами, система команд ОВС позволяет организовывать локальную буферную память с неограниченной задержкой для любого входа макроса. Теперь условие корректного срабатывания макроса становится более гибким—выполнение операции, реализуемой макросом, по готовности всех входных данных. Применение локальной буферизации позволяет утверждать, что ОВС, в общем случае, применима, причем весьма успешно, для обработки некогерентных потоков данных. Вышеописанное условие корректности для макроса является основным условием для моделей асинхронной обработки данных под общим названием Data Flow Graph. Поэтому именно асинхронную модель необходимо рассматривать как наиболее полную и адекватную для описания возможностей ОВС.

#### 4.3.2.2 Элементы операционной системы

Так как ОВС может быть охарактеризована, как проблемно-ориентируемый спецпроцессор, то, очевидно, что для выполнения задач непосредственно на ОВС не требуется полноценной операционной системы. Для успешного функционирования ОВС достаточно опираться на набор программных инструментариев и функций, обеспечивающих бесконфликтную эксплуатацию вычислительной матрицы ОВС и внешних устройств, подсоединенных к матрице. Далее приведены список средств, необходимых для обеспечения вышеуказанного бесконфликтного выполнения программ на ОВС.

Диспетчер задач—является программным элементом, автоматически загружаемым в контроллер блока ОВС.

Компоновщик программ для матрицы ОВС—одной из задач компоновщика является раскладка программы на матрице ОВС. В ходе раскладки, в частности, решаются задачи присоединения к программе драйверов внешних устройств, необходимых для успешного выполнения программы, разделение доступа различных функций программы к одним и тем же внешним ресурсам, обеспечение корректной обработки некогерентных потоков данных, проектирование сценария динамического перепрограммирования матрицы ОВС.

Драйверы поддержки стандартных внешних устройств—обеспечивают взаимосвязь программы на ОВС с внешними устройствами, подключенными к матрице.

#### 4.3.2.3 Инструментальные средства разработчика программного обеспечения для ОВС.

Для разработки программ для ОВС предполагается применять следующие программные продукты и инструменты, соответствующие различным уровням абстракции:

- Графический язык Ассемблера.
- Графический язык Макроассемблера.
- Компоновщик программ для ОВС.
- Графовый язык визуального программирования.
- Язык процедурного программирования HPPF (high performance parallel fortran).

Рассмотрим подробнее каждый из выше перечисленных инструментов.

##### Графический язык Ассемблера

Позволяет программировать непосредственно поле процессоров ОВС при помощи специального графического редактора. Логические единицы программирования—процессорный элемент поля ОВС. Все работы по синхронизации обрабатываемых потоков, раскладке программы на матрице ОВС, коммутации модулей программы выполняет программист. Язык Ассемблера наиболее применим для разработки оптимальных макросов-функций, из которых в дальнейшем собирается программа.

##### Графический язык Макроассемблера

Позволяет программировать непосредственно поле процессоров ОВС при помощи специального графического редактора. Предлагает ряд автоматических функций работы с трассами—элементами коммутации программы. Обеспечивает режим ручной компоновки программы для ОВС. Логические единицы программирования—библиотечный макрос, библиотечный подграф, трасса.

##### Компоновщик программ для ОВС

Исполняет роль классического линкера программы из объектного кода. Обеспечивает синхронизацию исходной программы, раскладку на поле процессоров ОВС, оптимизацию программы под заданную конфигурацию ОВС, подготавливает данные под первоначальную загрузку ОВС. Фактически, компоновщик позволяет значительно упростить разработку компиляторов с языков высокого уровня, т.к. он берет на себя непривычные для разработчиков функции взаимодействия с ОВС. Также он обеспечивает программное масштабирование для ОВС. Логические единицы программирования—входной граф, библиотечный макрос, библиотечный подграф, трасса, кольцо, процессорный элемент.

##### Графовый язык визуального программирования

Позволяет создавать программы для ОВС с использованием удобных графических средств программирования, а также встроенного процедурного Паскаль подобного языка.

Программа задается ориентированным графом, вершинами которого являются либо стандартные библиотечные элементы, либо описательные модели, заданные текстом программы процедурного языка программирования. Логические единицы программирования—библиотечные функции, операторы процедурного языка программирования, вершина графа, ориентированная дуга графа.

**Язык процедурного программирования HPPF (high performance parallel fortran)**

Позволяет создавать программы для ОВС на диалекте процедурного языка Fortran, приспособленного под параллельную обработку данных. Логические единицы программирования—стандартные элементы языка HPPF.

#### 4.3.2.4 Библиотеки стандартных функций для ОВС

Библиотека функций для ОВС—это хранилище готовых программных модулей для ОВС, масштабируемых программных элементов, подграфов.

*Готовый программный модуль (макрос)*—это программный элемент, написанный на Ассемблере, готовый к переносу на поле процессоров ОВС. Макрос определяется следующими характеристиками:

- геометрические размеры (высота, ширина в процессорных элементах);
- координаты входов/выходов;
- синхронизирующие параметры для каждого входа/выхода;
- типы обрабатываемых данных.

*Масштабируемый программный элемент (макрос-шаблон)*—позволяет описывать макросы, вид которых зависит от параметров. Для заданных значений параметров шаблон позволяет получить код макроса на языке ассемблера. В качестве параметров может выступать разрядность слова, длина целой и дробной части, количество операндов и т.д.

*Подграф*—это программный элемент, написанный на Макроассемблере или на Графовом языке визуального программирования. Подграф определяется структурой связей между его вершинами, заданием вершин-входов, синхронизирующими параметрами для каждой вершины-входа, типами обрабатываемых данных.

Стандартные библиотеки облегчают процесс создания программ для ОВС, т.к. они скрывают самый сложный уровень программирования—написание элементарных функций, таких, как сложение, умножение и т.п.

В базовое программное обеспечение для ОВС входят следующие библиотеки:

- математическая библиотека;
- библиотека преобразования типов;
- библиотека логических функций;
- библиотека для обработки сигналов;
- библиотека стандартных драйверов внешних устройств;
- библиотека для работы со списками;
- библиотека для работы с графами.

### 4.3.3 Прикладное программное обеспечение ОВС суперкомпьютера

Области и направления разработки прикладных систем, а также состав прикладного программного обеспечения уточняются на первом этапе работ по Программе СКИБР параллельно и в соответствии с ходом реализации аппаратных средств и базового общесистемного программного обеспечения суперкомпьютера и требованиями заказчиков. Стоит отметить, что у предприятия “Суперкомпьютерные системы” есть хороший задел по ряду прикладных программ специального назначения. Среди них:

- обработка гидролокационных сигналов;
- управление адаптивной оптикой;
- моделирование нейроалгоритмов;
- сжатие и восстановление телевизионного сигнала в стандарте MPEG-2;
- обработка изображений.

Проведение разработки прикладного программного обеспечения ОВС суперкомпьютера обеспечивается коллективами специалистов в области разработки программного обеспечения, являющимися исполнителями работ по Программе СКИБР (см. раздел 2, на стр. 5).

Опираясь на имеющийся серьезный теоретический и практический задел в области разработки программного обеспечения и прикладных систем в широком спектре различных прикладных областей, данные коллективы разработчиков способны выполнить разработку прикладного программного обеспечения ОВС суперкомпьютера в предусмотренные Программой сроки.

**Замечание.** Дополнительный анализ см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта», в разделах "4. Научно-технический и производственный потенциал." и "4.6. Мероприятия по выполнению Программы".

## 4.4 Технические решения в части сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера

### 4.4.1 Аппаратные средства сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера

Между собой два уровня суперкомпьютера связаны с использованием оборудования класса SCSI (модели от 40 MB/s до 132 MB/s—Fiber Channel). Используются:

- в кластерном уровне суперкомпьютера—стандартные адаптеры PCI (интерфейсные платы) интерфейса SCSI;
- в ОВС—SCSI адаптер, входящий в состав каждого из контроллеров блоков ОВС;
- стандартные SCSI кабели сопряжения.

**Замечание.** По результатам исследований первого этапа Программы в части моделей суперкомпьютеров возможно использование других высокоскоростных стандартных технологий передачи данных.

### 4.4.2 Программные средства сопряжения кластерного уровня и подсистемы ОВС суперкомпьютера

Программные средства сопряжения *в части кластерного уровня* включают в себя:

- набор входящих в состав ядра ОС Linux стандартных драйверов широкой номенклатуры различных карт, реализующих интерфейс SCSI;
- базовую библиотеку стандартных примитивов обмена информацией и управления ОВС (сброс и инициализация ОВС, запись блока данных с кодом задачи, запись/чтение блока данных, инициализация выполнения операции, регистрация обработчика сигналов по запросам от ОВС и т.д.);
- библиотеку прикладных задач и подпрограмм, реализуемых с использованием ОВС. На ОВС реализуются фрагменты прикладных систем, которые:
  - оформляются как программные модули, включаемые в состав библиотек подпрограмм (библиотек функций и прикладных задач, реализуемых на ОВС) и имеющие стандартный для языка Си интерфейс вызова (обращения к подпрограмме);
  - выполняют передачу в ОВС загружаемого кода, реализующего данный фрагмент вычислений, передачу входных данных, считывание результата. При этом используется базовая библиотека примитивов обмена информацией с ОВС;
- структуры данных и программные механизмы T-ядра—уникальные идентификаторы ресурсов/объектов, распределенная объектно-файловая машина, возможность привязки T-процесса к ресурсу с конкретным идентификатором или классу ресурсов—обеспечивающие:
  - передачу T-процесса, из которого осуществляется взаимодействие с ОВС, в один из вычислительных узлов кластерного уровня, имеющих физический интерфейс с ОВС (см. замечание о том, что из T-программ можно вызывать Си-подпрограммы), либо
  - осуществление удаленного вызова функции/прикладной задачи из вычислительного узла кластерного уровня, не имеющего интерфейса с ОВС с использованием механизмов T-



ядра, предназначенных для распределенной работы с файлами—в этом случае обращение к ОВС производится из определяемого прикладным программистом на этапе реализации прикладной задачи обработчика удаленного вызова, включаемого на этапе компоновки задачи в состав распределенной файловой подсистемы.

*В части ОВС* программные средства сопряжения включают в себя реализованный в виде специализированной библиотеки набор предназначенных для загрузки из кластерной компоненты в ОВС фрагментов программного кода, каждый из которых непосредственно реализует в ОВС ту или иную прикладную задачу или фрагмент вычислений, в частности:

- получает из кластерного уровня наборы входных данных;
- организует и осуществляет выполнение в ОВС вычислений в соответствии с алгоритмом решения соответствующей прикладной задачи;
- передает из ОВС в кластерный уровень наборы данных, содержащие результаты вычислений.

Описанный набор программных средств, структур данных и механизмов поддерживает возможности:

- из Т-программы эффективно передать на вычисление в ОВС фрагмент решаемой задачи;
- вызвать в кластерной компоненте выполнение той или иной Т-функции либо Си-функции в качестве реакции на результат, возвращенный выполняющимся в ОВС фрагментом кода—то есть по существу из выполняемого в ОВС кода передать на выполнение в кластерную компоненту фрагмент решаемой задачи.

#### **4.5 Технические решения в части периферии суперкомпьютера (включая поддержку подключения к LAN/WAN/Internet)**

Использование в кластерном уровне суперкомпьютера широко распространенной операционной системы—ОС Linux и готовых изделий массового применения, широко представленных на сегодняшнем компьютерном рынке, обусловило возможность использования в архитектуре суперкомпьютера широчайшего спектра периферийных устройств, подключаемых к кластерному уровню суперкомпьютера с использованием различных стандартных интерфейсов и протоколов. В частности, в число таких устройств *поддержанных ОС Linux* входят:

- ***широчайшая номенклатура устройств внешней памяти***—от жестких дисков (IDE, SCSI и т.п.) до многотерабайтных RAID массивов и специализированных файл-серверов, подключаемых с использованием интерфейса FDDI;
- ***широчайшая номенклатура средств графического вывода***—видеоадаптеров, в том числе использующих 2-х и 3-х мерные графические ускорители и интерфейс AGP (Accelerated Graphics Port), как следствие—практически любые из доступных сегодня мониторов и устройств вывода 3-х мерных изображений "виртуальной реальности";
- ***широчайшая номенклатура средств сетевого сопряжения и удаленного доступа***—сетевых адаптеров, поддерживающих самые разнообразные сетевые протоколы, в том числе ARCNet; ATM; AX.25; DECNet; Ethernet; Fast Ethernet; Token Ring и т.п., а также адаптеры, поддерживающие интерфейсы Myrinet и SCI (Scalable Coherent Interconnect); самые разнообразные модемы (асинхронные и синхронные), а также одно- и многопортовые платы поддержки интерфейсов для их подключения;
- ***широчайшая номенклатура средств хранения (архивирования) сверхбольших информации***—разнообразные стримеры, ленточные накопители, одно- и многодисковые CD устройства (в том числе с однократной записью), устройства для магнитооптических накопителей и др. и библиотечные системы (с автоматической подачей и сменой носителей) на их основе;
- ***широчайшая номенклатура средств ввода-вывода видеоизображений***—цифровые видеокамеры, телевизионные тюнеры, устройства фиксации кадра (Frame Grabber), звуковые платы и другое мультимедийное оборудование;
- ***различные интерфейсы, предназначенные для цифрового ввода потоков данных с внешних датчиков;***

- **аппаратура поддержки непрерывного электропитания, контроля физических параметров в суперкомпьютерной системе и в окружающей среде, контроля работоспособности** вспомогательной аппаратуры и интерфейсы считывания показаний данной аппаратуры:
  - **современные UPS и комплексы на их основе** с "умным интерфейсом": сигналы о внешних параметрах—исчезновении внешнего электропитания, температура окружающего воздуха, емкость батарей, оценка гарантированного времени поддержки электропитания за счет батарей и т.п.,—и средства управления установкой из ОС Linux: переход на резервную линию, отключение батарей, запуск бензогенератора или иного оборудования (охлаждения и т.п.);
  - **аппаратура контроля за вычислительными узлами**—средства комплектующих класса ATX—контроль и управление из ОС Linux физическими параметрами материнских плат: температура основных микросхем, скорости вращения вентиляторов охлаждения микросхем и т.п.;
  - **широкий выбор аппаратуры класса WatchDog поддержанных в ОС Linux**—контроль за работоспособностью вычислительного узла (и аппаратуры, и ПО) и автоматический перезапуск (reset) вычислительного узла в случае сбоев (включая "зависания" по аппаратным или программным причинам).
- и т.д.

Как последний штрих, хочется отметить, что свободное (с текстами) распространение ОС Linux позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что даже для достаточно экзотических устройств возможна—в случае необходимости—самостоятельная реализация драйверов данных устройств, обеспечивающих возможность их полноценного использования другими программными компонентами, входящими в состав базового общесистемного и прикладного обеспечения суперкомпьютера.

В области программных средств ОС Linux предоставляет:

- **многопользовательский режим;**
- возможность работы в различных **графических многооконных средах**—в том числе и в X Window System, ставшей стандартом графического интерфейса для различных клонов ОС UNIX;
- **наборы разнообразных средств разработки программ**, включая компиляторы—в том числе и такой признанный и широко распространенный, как GCC, множественные наборы различных стандартных библиотек, разнообразные средства редактирования, отладки программ и поддержки разработки программных проектов (управление версиями, поддержка распределенного проектирования ПО коллективом программистов и пр.);
- **разнообразную поддержку всех стандартных для ОС UNIX средств удаленного доступа**, электронной почты и доступа к Internet (основывающуюся на использовании встроенной в ядро ОС Linux поддержки протоколов семейства IP)—в том числе и с использованием шифрования;
- **поддержку других протоколов сетевого и межсетевого уровня**, и в их числе—протокола IPX, стандартного для сетей класса Novel;
- **базы данных** (различных форматов и стандартов на СУБД), **офисные программы** (текстовые процессоры, электронные таблицы, графические редакторы, пакеты деловой графики—совместимые по форматам и более мощные по функциям, чем аналоги из ОС Windows'95/NT);
- **возможность использования тысяч различных других пакетов программ, реализующих самые разнообразные функции.**

**Вывод.** Выбор одной из самых развитых сегодня операционных систем—ОС Linux—определяет наличие готовой поддержки в кластерном уровне суперкомпьютера всех существующих (и возможных в будущем) требований в части:

- периферийных устройств (включая поддержку подключения к LAN/WAN/Internet;
- различных режимов функционирования (многопользовательский, удаленный, удаленный с криптографическими протоколами доступа, оконный интерфейс и т.п.);

- сервисных программных средств.

## 5. Тактико-технические характеристики моделей суперкомпьютера

Как сказано выше, в общем случае каждая прикладная проблема, для которой создается та или иная суперкомпьютерная система по данной Программе, может быть разбита:

- на фрагменты со сложной логикой вычисления, с крупноблочным скрытым (динамическим) параллелизмом—такие фрагменты эффективно реализовывать с использованием Т-системы на кластерном уровне суперкомпьютера;
- на фрагменты с простой логикой вычисления, с мелкозернистым явным параллелизмом, с большими потоками информации, требующими быстрой и несложной обработки “на пролете”—такие фрагменты эффективно реализовывать в ОВС;
- между собой два уровня суперкомпьютера связаны с использованием интерфейса класса SCSI. Программное обеспечение Т-системы и ОВС позволяет эффективно запускать из одного уровня суперкомпьютера фрагмент задачи для решения на другом уровне.

Пропорции такого деления прикладной проблемы определяют пропорции объемов программного обеспечения для нее в части Т-системы и ОВС, и эффективный состав суперкомпьютерной установки для данной прикладной системы—сколько в ней будет узлов кластерной сети, сколько будет оборудования ОВС и т.п.

И кластерный уровень суперкомпьютера (с Т-системой и ОС Linux) и ОВС (с программным обеспечением ОВС) поддерживают высокую масштабируемость обоих уровней суперкомпьютера и системы в целом. Тем самым из разрабатываемого по Программе **набора универсальных конструктивных блоков**, предназначенных для организации серийного производства моделей суперкомпьютеров и в рамках **единого архитектурного ряда суперкомпьютеров** возможно производство различных моделей систем с соответствующими прикладной области тактико-техническими характеристиками.

В следующих подразделах приводятся результаты расчета основных тактико-технических характеристик **базовых моделей кластерного уровня** (с производительностью 10GFlops, 50GFlops, 100 GFlops) **и подсистемы ОВС** (с производительностью 100GIps, 1 TIps) суперкомпьютера: технологическая база (спецификация основных используемых компонент), массогабаритные показатели, энергопотребление, себестоимость и другие экономические показатели.

### 5.1 Тактико-технические характеристики базовых моделей кластерного уровня суперкомпьютера

#### Параметры базовой модели ТКС-12

Производительность (теор. пик, плав. точка 64 разряда)— до 12.8 GFlops

Спецификация основных используемых компонент:

Pentium II Xeon 400MHz, Dolphin Interconnect CluStar Technology—

возможна замена используемых компонент, без ухудшения технических характеристик.

Объем оперативной памяти (GB)— до 8

Объем дисковой памяти (GB)— до 128

Энергопотребление (КВА)— до 15

Объем (дм3)— 4139

Габариты (ширина, глубина, высота, мм)— 1570×980×2690

Отпускная стоимость (без НДС)— до \$360,000

Основные тактико-технические характеристики серии возможных моделей приведены ниже в таблице (возможен выпуск моделей и с иными—промежуточными или более высокими—характеристиками до нескольких TFlops):

Тип установки	Цена (без НДС)	Число проц.	Т.пик. GFlops	RAM GB	HDD GB	Э/п КВА	Габариты (Ш×Г×В) мм	Объем дм <sup>3</sup>
ТКС-12	\$360,000	32	12.8	8	128	14.4	1570×980×2690	4,139
ТКС-50	\$1,584,000	128	51.2	32	512	57.6	6280×980×2690	16,556
ТКС-100	\$3,456,000	256	102.4	64	1024	115.2	12560×980×2690	33,112

## 5.2 Тактико-технические характеристики базовых моделей подсистемы ОВС суперкомпьютера

### 5.2.1 Параметры базовой модели ОВС—100Gips

Производительность (теор. пик, 64-х разрядные данные)—	100Gips (Gips—миллиард инструкций в секунду).
Технологическая база НПО “Интеграл”—	1.6 микрон.
Основная микросхема—	12 вычислительных ячеек (60 элементарных RISC-процессоров).
Размеры системы—	700×500×160 мм.
Объем системы—	56 дм <sup>3</sup> .
Энергопотребление—	3 КВА.
Масса—	25 кг.
Себестоимость—	\$55,000.

### 5.2.2 Параметры базовой модели ОВС—1Tips

Производительность (теор. пик, 64-х разрядные данные)—	1Tips. (Tips—триллион инструкций в секунду)
Технологическая база НПО “Интеграл”—	1.6 микрон.
Основная микросхема—	12 вычислительных ячеек (60 элементарных RISC-процессоров).
Количество микросхем в системе—	40,000 (90 плат размером 550×400 мм).
Количество вычислительных ячеек—	480,000.
Размеры системы—	900×700×700 мм.
Объем системы—	440 дм <sup>3</sup> .
Энергопотребление—	30 КВА.
Масса—	300 кг.
Себестоимость—	\$450,000.

Возможен также выпуск моделей и с иными—промежуточными или более высокими (производительность до нескольких Tips)—характеристиками.

## 6. Научный и практический задел исполнителей

### 6.1 Задел в части кластерного уровня суперкомпьютера

#### 6.1.1 Оценка завершенности современной версии Т-системы

На сегодняшний день этапы академических проработок и НИР в области методов реализации компонент Т-системы полностью завершены.

Разработанная в ИПС РАН версия Т-системы прошла длительный (более полугодя) этап опытной эксплуатации в составе аппаратно-программного прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера (см раздел "6.1.2 Аппаратно-программный прототипный образец кластерного уровня суперкомпьютера" на стр. 37 настоящего документа). В процессе опытной эксплуатации данная версия Т-системы:

- была использована для разработки значительного числа программ—как модельных, так и реальных задач из различных прикладных областей (см. «Приложение 3. Подборка статей

по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.»);

- продемонстрировала высокую степень надежности;
- продемонстрировала высокий уровень распараллеливания программ в процессе выполнения и высокие значения коэффициента утилизации вычислительной мощности мультипроцессора.

Таким образом, была на практике продемонстрирована высокая степень завершенности Т-системы и ее готовности к широкому использованию. Подробное описание (тексты программ, временные показатели и т.п.) экспериментов на прототипном образце с данными задачами приведены в «Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.».

Технические решения, лежащие в основе Т-системы, прошли апробацию в рецензируемых научных публикациях и на научных конференциях (см. раздел "7.1.2.3 Основные публикации по теме разработки", стр. 48)

Еще одним показателем высокой степени завершенности современной версии Т-системы являются факты ее передачи в опытную эксплуатацию заинтересованным потребителям данной технологии—НИЦЭВТ (г. Москва) и БГУИР (г. Минск)—см. раздел "6.1.2.5 Опыт создания других аппаратно-программных прототипных образцов с Т-системой", стр. 42 настоящего документа.

Дополнительная техническая информация приведена в следующих разделах настоящего документа:

- "Текущее состояние Т-ядра и дальнейшие работы, планируемые в данном направлении", стр. 17;
- "Текущее состояние Т-языка и средств программирования и дальнейшие работы, планируемые в данном направлении", стр. 19.

## **6.1.2 Аппаратно-программный прототипный образец кластерного уровня суперкомпьютера**

Для экспериментальной проверки и отработки найденных в процессе разработки и реализации Т-системы решений в ИПС РАН с начала 1998 года велись работы по созданию прототипного образца комплекса вычислительных средств мультипроцессора с Т-системой. К концу апреля 1998 года прототипный образец был введен в опытную эксплуатацию. Значительный опыт (более полугодя) эксплуатации прототипа и успешное выполнение на нем реальных и демонстрационных Т-программ на практике продемонстрировали надежность и высокую производительность комплекса, а также высокую степень готовности найденных технических и программных решений.

### *6.1.2.1 Аппаратное обеспечение прототипного образца*

Аппаратное обеспечение прототипного образца реализовано по схеме *мультикомпьютер*: быстрая локальная сеть мощных рабочих Unix-станций. В составе мультикомпьютера использованы традиционные (однопроцессорные) и SMP-мультипроцессорные PC-совместимые Unix-станции.

Структурная схема комплекса аппаратных средств мультипроцессора представлена ниже (Рисунок 8).

Основные технические характеристики комплекса в целом:

- пиковая теоретическая производительность комплекса— 5.5 GFlops;
- число вычислительных узлов— 9;
- число процессоров (PPro/200 и P2/266)— 24;
- оперативная память— 1,408 МВ;
- дисковая память— 70.4 GB.

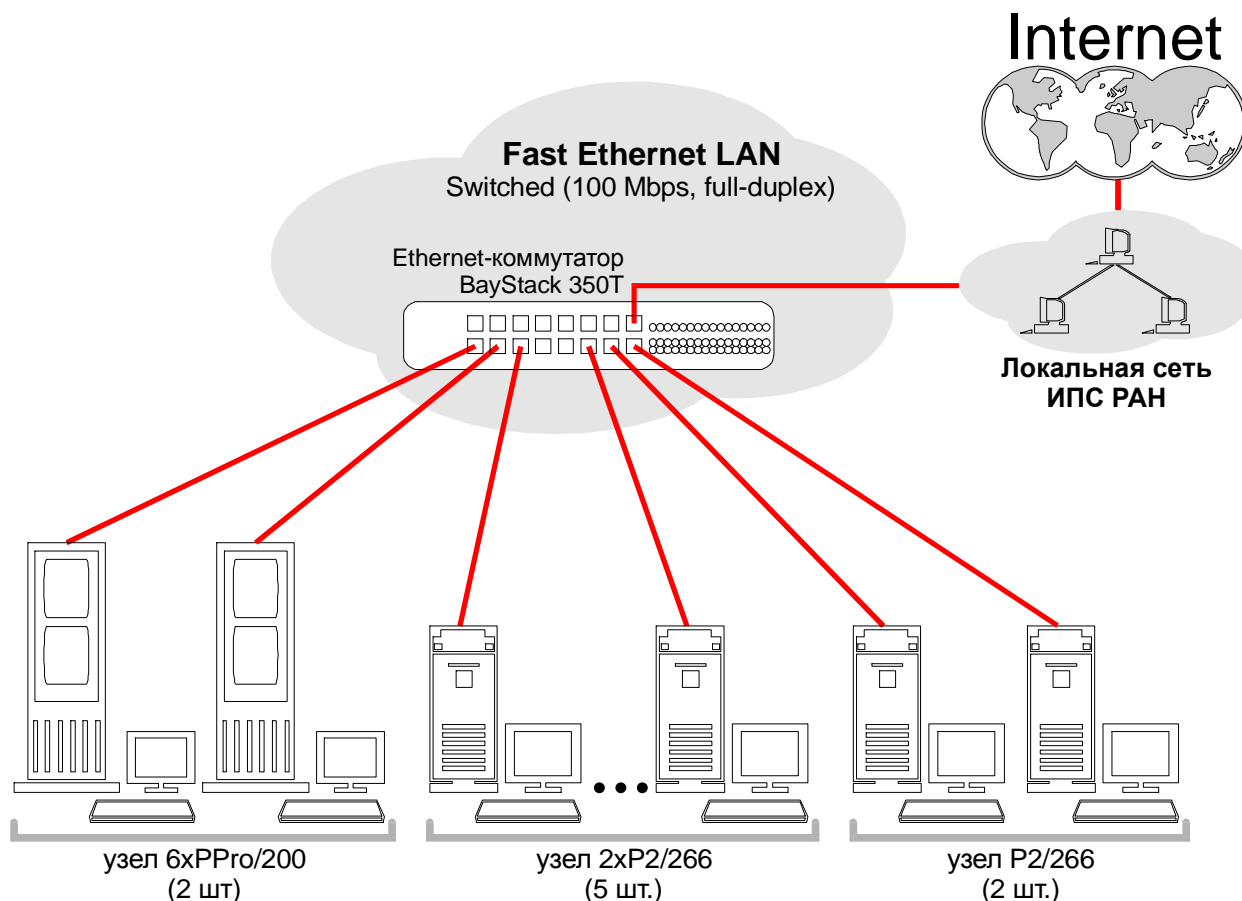


Рисунок 8. Структурная схема комплекса аппаратных средств мультипроцессора

Таблица 1. Укрупненная спецификация комплекса аппаратных средств мультипроцессора Т-системы

	Число узлов	Число процессоров в узле	Тип процессора	Теоретический пик процессора (MFlops)	Теоретический пик узла (MFlops)	RAM (MB)	HDD (GB)
узел 6xPPro/200	2	6	PPro/200	200	1,200	256	12.8
узел 2xP2/266	5	2	P2/266	266	532	128	6.4
узел 1xP2/266	2	1	P2/266	266	266	128	6.4
<b>ВСЕГО:</b>	<b>9</b>	<b>24</b>	—	—	<b>5,592</b>	<b>1,408</b>	<b>70.4</b>

Подробнее технические характеристики узлов и комплекса в целом представлены ниже (Таблица 1, Таблица 2).

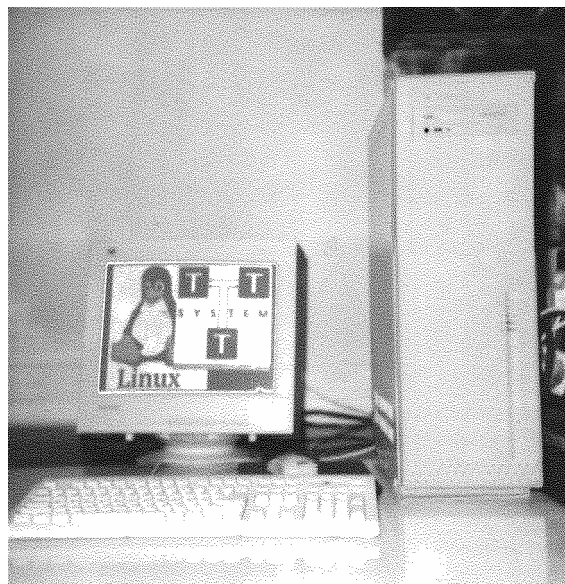
Коммуникационная сеть прототипа комплекса аппаратных средств мультипроцессора представляет собой современную локальную сеть на базе протокола Switched Fast Ethernet 100Base-TX. Кабельная система коммуникационной сети выполнена на основе фольгированной витой пары категории 5 (FTP Cat5). В качестве активного оборудования используется 16-портовый Ethernet-коммутатор (Ethernet Switch) BayStack 350T, имеющий следующие основные технические характеристики:

- наименование изделия—BayStack 350T Ethernet Switch with 16 10/100Mbps switched ports;
- 16 RJ-45 10/100Mbps коммутируемых портов;
- автоматическое распознавание скорости клиента (10/100Mbps)
- поддержка дуплексных операций на всех портах,
- автоматическое распознавание возможности дуплексных операций с клиентом
- способность коммутации—1.2Gbps, 1.6 миллионов пакетов в секунду
- поддерживается до 8192 MAC-адресов сетевых плат

- поддерживает приоритетную передачу для мультимедийных или других чувствительных к задержке потоков данных
- поддержка IEEE 802.1D Spanning Tree
- поддержка протокола telnet для локального управления
- различная поддержка протоколов управления коммуникационным оборудованием (включая SNMP и др.)



два шестипроцессорного узла 6×PPro/200  
(ALR Revolution 6x6)



двухпроцессорный узел 2×P2/266

### Рисунок 9. Фотографии процессорных узлов прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера

*6.1.2.2 Сетевой интерфейс прототипного образца: доступность прототипного образца из локальной сети ИПС РАН, других организаций из региональной сети (СТ “Ботик”) и из Internet*

Использование в составе прототипного образца стандартного коммутационного оборудования позволило—наряду с использованием ОС Linux (высококачественного клона ОС UNIX)—без значительных дополнительных усилий решить задачу организации удаленного доступа пользователей к ресурсам данной параллельной вычислительной установки в процессе ее опытной эксплуатации.

Каждый из вычислительных узлов получил статус узла сети ИПС РАН—с соответствующим выделением Internet-адреса. Регистрируя пользователя на одном из вычислительных узлов мультипроцессора, администратор прототипного образца предоставляет пользователю возможность использования вычислительной мощности аппаратных средств всей установки или ее части. Таким образом, удаленный доступ к прототипному образцу суперкомпьютера был обеспечен для пользователей компьютеров:

- **Входящих в состав локальной сети ИПС РАН** (10/100 Мбит/с, стандартные технологии классов: 100Base-TX, 10Base-T/2/5).
- **Подключенных к региональной сети Переславского региона (СТ “Ботик”)**—за счет обеспечения пользователей региональной сети возможностью подключения к локальной сети ИПС РАН с использованием высокоскоростных (100/10/2 Мбит/с) оптическим, радио- и витопарным линиям (стандартные технологии классов: 100Base-FX, 10Base-FL, RadioEthernet, 100Base-TX, 10Base-T/2/5). В региональной сети г. Переславля-Залесского (создана ИПС РАН) сегодня подключены все научные, образовательные и промышленные учреждения региона—постоянное высокоскоростное (не менее 2 Мбит/с) подключения более 400 компьютеров—что дает возможность использовать вычислительную мощность

прототипного образца и в образовательном процессе (Университет г. Переславля) и в промышленных исследованиях (АО “Славич”, ОАО “ЛИТ” и др.);

- **Подключенных к сети Internet**—за счет подключения локальной сети ИПС РАН к глобальной сети Internet с использованием канала спутниковой связи (128 Kb/s, Переславль узел RUNNet—С. Петербург/узел RUNNet) и наземного канала (28 Кбит/с, Переславль—Москва/Президиум РАН, узел EmNet/NIS).

**Таблица 2. Спецификация вычислительных узлов комплекса аппаратных средств мультипроцессора Т-системы**

Компонента	Описание
<b>Однопроцессорный узел P2/266</b>	
MB	ASUS P2PL97 ATX
CPU	Pentium2/266
RAM	128MB SDRAM 10ns
Video	Matrox Mistique 220 4MB
NIC	Intel EtherExpress PCI 10/100 Fast Ethernet
HDD	Quantum ST 6.4GB UDMA
CD-ROM	Creative 24x
FDD	1.44MB FDD
<b>Двухпроцессорный узел 2xP2/266</b>	
MB	SuperMicro P6DLE ATX
CPU	2 x Pentium2/266
RAM	128MB SDRAM 10ns
Video	Matrox Mistique 220 4MB
NIC	Intel EtherExpress PCI 10/100 Fast Ethernet
HDD	Quantum SE 6.4GB UDMA
CD-ROM	Creative 24x
FDD	1.44MB FDD
<b>Шестипроцессорный узел 6xPPro/200 (ALR Revolution 6x6)</b>	
CPU	6 x PentiumPro/200
RAM	256MB ECC
Video	CL5446 4MB
NIC	DEC21142/43 PCI 10/100 Fast Ethernet
HDD	2 x Western Digital Caviar-AC36400L 6.4Mb
CD-ROM	16x SCSI CD-ROM Drive
FDD	1.44MB FDD

**Замечание.** Существующий внешние каналы имеют скромную пропускную способность и дают ограниченную возможность эксплуатации (вне СТ “Ботик”) суперкомпьютерной установки ИПС РАН. Поэтому в рамках Программы предусмотрено выполнение работ (см. «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта», раздел “4.6. Мероприятия по выполнению Программы”, пункт “Мероприятие 16”) по разработке и реализации высокоскоростной выделенной телекоммуникационной сети, объединяющей участников совместной Программы.

**Замечание.** Заметим, что ИПС РАН (совместно с РосНИИ РП, РосНИИ РОС и ИППИ РАН) давно уже проработал (и предлагал в Миннауку РФ) проект построения собственного (не арендуемого, имеющего низкие ежемесячные эксплуатационные затраты) канала 2 Мбит/с Переславль-Залесский—Москва. Для реализации данного проекта требуется финансирование в объеме \$20,000. Таким образом, мы абсолютно уверены, что данный канал будет реализован:

- либо в рамках проекта № 2.21 “Создание научно-учебной компьютерной сети Переславль-Залесского региона” Межведомственной программы создания Национальной сети компь-



ютерных телекоммуникаций для науки и высшей школы” — материалы нашего проекта уже подавались в Министерство науки в 1998 г. и будут повторно подаваться в планы на 1999 год;

- либо в рамках Программы СКИБР.

#### *6.1.2.3 Программное обеспечение прототипного образца*

Текущая реализация Т-системы в качестве программно-аппаратной платформы использует мультимикомпьютер, построенный как сеть рабочих станций.

Каждый из процессорных элементов мультимикомпьютера представляет собой компьютер семейства IBM PC, работающий под управлением операционной системы Linux (различные версии ОС Linux—начиная с версии 2.0 и по 2.1.119 —на различных процессорных элементах)—клона ОС UNIX. В составе мультимикомпьютера сегодня в качестве процессорных элементов используются как монопроцессорные компьютеры семейства IBM PC Intel Pentium P-266, так и SMP-мультипроцессоры—симметричные мультипроцессоры класса IBM PC, удовлетворяющим спецификациям Intel SMP 1.1/1.4—двух типов: двухпроцессорные 2×Intel Pentium P-266 и шестипроцессорные ALR 6x6 6×Intel Pentium Pro-200.

В качестве сети, объединяющей процессорные элементы в единую вычислительную систему, используется локальная сеть с протоколом TCP/IP.

Для разработки Т-программ на прототипном образце реализована предварительная версия Т-языка (все алгоритмы задач, реально исполняемые на прототипном образце сегодня, написаны на этом языке). Сборка Т-программы на прототипном образце выполняется по следующей схеме:

- исходный текст на текущей версии Т-языка преобразуется в Си-программу—используется созданный нами специальный препроцессор *t2cp*, реализованным на языке Refal Plus (версия 2.7 для ОС Linux);
- полученная Си-программа обрабатывается стандартным Си-компилятором ОС Linux (GNU GCC версии 2.7.2);
- полученный объектный файл собирается с библиотекой Т-ядра текущей версии (разработана в ИПС РАН) и со стандартной Си-библиотекой *libc6*.

Таким образом экспериментальная версия Т-системы использует стандартные и разработанные коллективом ИПС РАН утилиты, что в дальнейшем позволит обеспечить перенос Т-системы на различные аппаратные платформы, для которых существует реализация ОС Linux.

Подробнее о сегодняшнем состоянии программного обеспечения прототипного образца (Т-системы) см. в «Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.» и «Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.».

#### *6.1.2.4 Результаты опытной эксплуатации прототипного образца аппаратно-программного комплекса*

За прошедший период (более полугода) опытной эксплуатации Т-системы на прототипном образце аппаратно-программного комплекса были реализованы и выполнены следующие задачи:

- **построения множества, заданного рекурсивным определением**—на примере программы расстановки ферзей на шахматной доске;
- **вычисления *sl*- и *so*-полиномов для 3-графов;**
- **построения качественных изображений трехмерных сцен методом трассировки лучей;**
- **фильтрации потока данных с динамическим порождением новых фильтров**—на примере программы построения списка простых чисел методом “решето Эратосфена”;
- **реализация игровых алгоритмов**—на примере программы игры в усложненный вариант игры “крестики-нолики”

- **обработка множеств, представленных битовыми шкалами**—на примере двух оригинальных алгоритмов вычисления множеств простых чисел;
- **комбинаторные задачи**—на примере построения множества всех перестановок из  $N$  элементов

Подробное описание экспериментов (тексты программ, временные показатели и т.п.) на прототипном образце с данными задачами приведены в «Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.».

*Обобщая результаты экспериментов на прототипном образце с данными Т-задачами (имеющими различную алгоритмическую природу и принадлежащими к разным прикладным областям), можно сказать, что для Т-системы практически продемонстрированы следующие свойства:*

- Т-система поддерживает высокую эффективность автоматического распараллеливания Т-программы в случае взаимодействия соисполнителей по протоколу IP (и еще более лучшие результаты—в случае SMP);
- Т-система обеспечивает более полное (по сравнению с другими подходами) освобождение программиста от большинства аспектов разработки параллельных программ—более низкие сроки (затраты) на разработку параллельных программ и более высокая их надежность;
- Т-система реализует более глубокий (по сравнению с другими подходами) уровень параллелизма, более полное использование вычислительных ресурсов мультипроцессоров;
- Т-система поддерживает возможность (без переработки и без перекомпиляции) исполнять программы, разработанные для Т-системы на мультипроцессоре с любым числом процессоров и с любой (в том числе неоднородной) архитектурой—то есть, возможность без переработки системного и прикладного программного обеспечения:
  - расширять вычислительные установки (добавлять число процессоров в систему) и тем самым достигать ускорения счета прикладных программ;
  - исполнять задачи на частично неисправной установке (с вышедшими из строя компонентами)—в принципе, возможно достижение более сильной устойчивости к отказам аппаратуры—достижение эффекта продолжения счета без перезапуска задачи после выхода из строя части оборудования, но это предмет дальнейшего развития Т-системы.

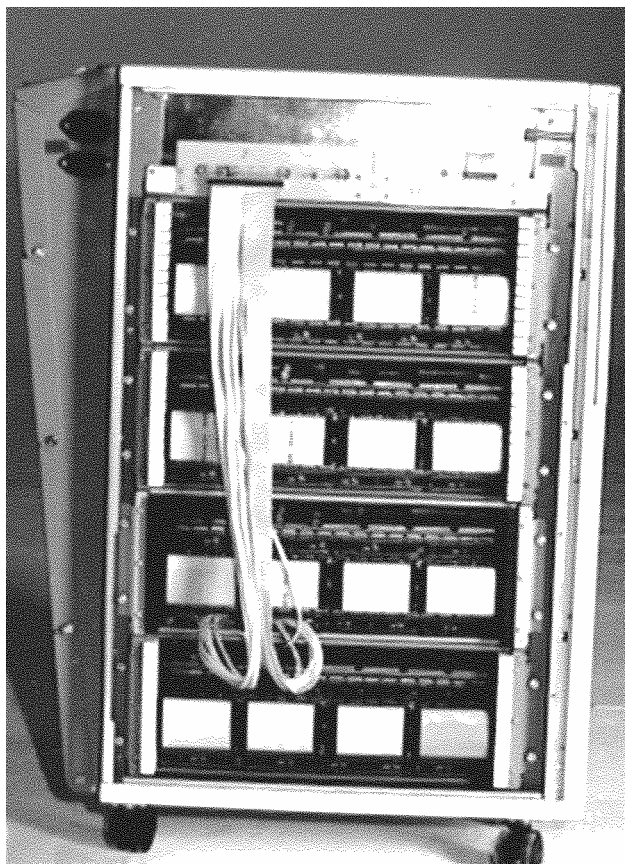
#### *6.1.2.5 Опыт создания других аппаратно-программный прототипных образцов с Т-системой*

В качестве еще одного показателя высокой степени завершенности Т-проекта упомянем факты передачи ИПС РАН экспериментальной версии Т-системы в опытную эксплуатацию заинтересованным потребителям данной технологии: в двух организациях—НИЦЭВТ (г. Москва) и БГУИР (г. Минск)—сотрудниками ИПС РАН уже произведено конфигурирование локальных сетей мощных ПЭВМ в вычислительные платформы класса "IP-сеть IBM/PC-совместимых рабочих станций, работающих под управлением ОС Linux" и установка на них текущей версии Т-системы.

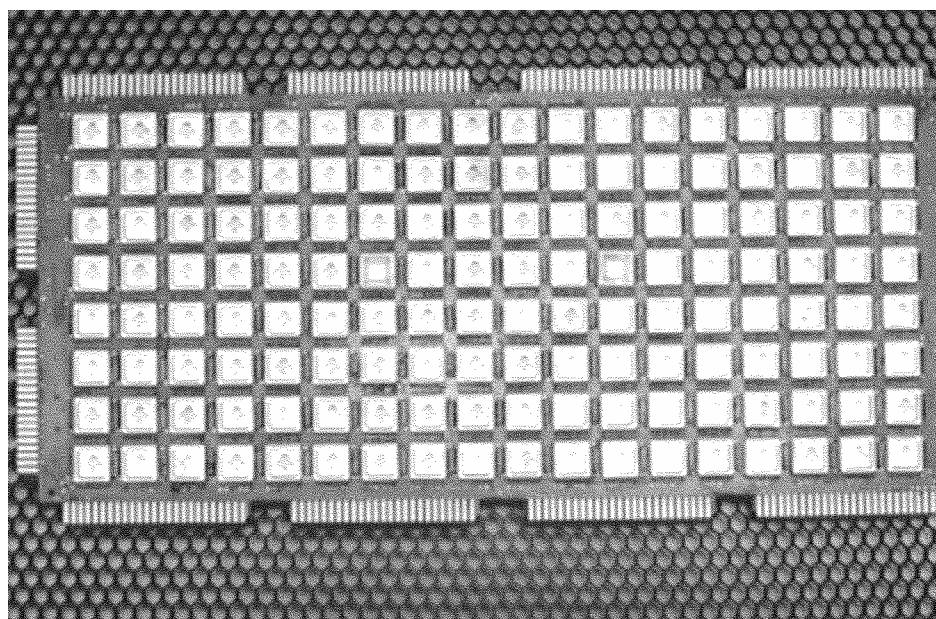
## **6.2 Задел в части подсистемы ОВС суперкомпьютера**

### **6.2.1 Макет аппаратно-программного комплекса ОВС суперкомпьютера**

Макетный образец представляет собой аналог экспериментального образца суперкомпьютера "Мультикон", который был разработан ЗАО "Мультикон" по заказу Министерства науки и техники в 1993 г. при участии НПО "Интеграл" (г. Минск).



**Рисунок 10. Фотография макета ОВС**



**Рисунок 11. Фотография ТЭЗ макете ОВС**

#### *6.2.1.1 Аппаратное обеспечение макета ОВС*

Макет ОВС (см. Рисунок 10) состоит из 4-х блоков, каждый из которых содержит контроллер блока, ППЗУ и ОЗУ, устройство сопряжения с РС по LPT-порту и 8 ТЭЗов БИС ОВС.

Контроллер блока, ППЗУ и ОЗУ выполнены в виде единого ТЭЗа (см. Рисунок 11). При конструировании и изготовлении использовались микросхемы серии 1533 для реализации контроллера блока, микросхемы статической памяти HN1001 1мбит×1 для ОЗУ общей емкостью 16 Мбит и микросхемы перепрограммируемой памяти с УФ-стиранием 512кбит×8 общей емкостью 1мбит.

ТЭЗ БИС ОВС содержит 144 микросхемы M1005, каждая из которых представляет матрицу 4×5 последовательных RISC процессоров, работающих на тактовой частоте 5 МГц. Таким образом блок содержит 23040 процессоров. Пиковая производительность блока составляет 2,5 млрд. операций в секунду.

Устройство сопряжения с PC по LPT-порту представляет из себя стандартный разъем, на ответную часть которого поставлены в качестве развязки микросхемы 1533 АП1.

Основным конструктивом для макета является типовая стойка PC “big tower”, доработанная с целью размещения нестандартного блока питания, 4-х вентиляторов и 4-х разъемов сопряжения с PC. Кроме того на стойке расположены 2 разъема для подключения мониторов и 2 видеокарты типа TRIDENT 8900.

Пиковая производительность макета составляет 10 млрд. операций в секунду.

Потребляемая мощность—250 Вт.

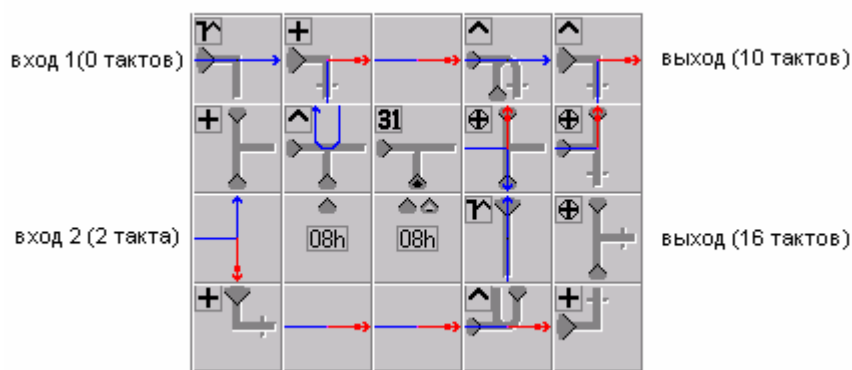
### 6.2.1.2 Программное обеспечение макета

Элементы программного обеспечения макета работают, частично, на ОВС (элементы ОС для ОВС—драйвер взаимодействия с IBM PC, драйвер оперативной памяти, драйвер видеокарты), частично на стандартной IBM PC под управлением OS Windows 95:

- графический язык Ассемблера;
- эмулятор матрицы ОВС;
- инструментальная оболочка;
- библиотеки стандартных функций.

#### Графический язык Ассемблера

Графический язык Ассемблера позволяет программировать непосредственно поле процессоров ОВЗС при помощи специального графического редактора. Логические единицы программирования—процессорный элемент поля ОВС. Позволяет выделять и выполнять ряд операций над отдельными макросами (блоками). Автоматически допрограммирует не полностью использованные процессорные элементы матрицы ОВС для обеспечения корректной коммутации элементов программы. В результате программирования получаем программный модуль, готовый к загрузке на матрицу ОВС.



**Рисунок 12. Интерфейс графического языка Ассемблер**

#### Эмулятор матрицы ОВС

Эмулятор матрицы ОВС позволяет эмулировать работу матрицы ОВС под управлением загруженной программы или нескольких программ. Позволяет вводить и снимать информацию с любой виртуальной точки матрицы ОВС. Результаты могут просматриваться с учетом сдвигов фаз входных потоков и с различными типами обрабатываемых данных.

#### Инструментальная оболочка

Инструментальная оболочка объединяет в себе язык Ассемблера и эмулятор, а также позволяет запускать программу на любом из подсоединенных к ПЭВМ блоках ОВС, сбрасывать частично или полностью программы, исполняемые на матрице ОВС, создавать и выполнять сценарии программ для ОВС, позволяющие выполнять несколько независимых задач одно-

временно и организовывать между ними корректное взаимодействие, загружать или считывать данные из оперативной памяти, подсоединенной к ОВС.

**Библиотеки стандартных функций**

Библиотека математических функций содержит готовые макросы для реализации операций для чисел с фиксированной и плавающей точкой.

Библиотека логических функций содержит готовые макросы для реализации логических операций.

Библиотека функций для обработки сигналов—содержит готовые макросы для реализации медианной фильтрации, БПФ и т.п.

**Элементы ОС для ОВС**

На ОВС реализованы следующие элементы:

Драйвер взаимодействия с IBM PC—обеспечивает пересылку данных из/в оперативную память ОВС, загрузку, запуск, сброс части матрицы ОВС.

Драйвер оперативной памяти—обеспечивает запись/чтение из ОЗУ в ОВС.

Драйвер видеокарты—обеспечивает вывод информации в память видеокарты и управляет работой видеокарты.

## **6.2.2 Результаты опытной эксплуатации аппаратно-программного макетного комплекса ОВС и оценка степени завершенности разработки**

Эксплуатация программно-аппаратного макетного комплекса в целом доказала возможность создания высокопроизводительных систем на базе ОВС. В процессе опытной эксплуатации был реализован ряд задач реального времени:

- быстрое преобразование Фурье;
- фильтрация изображения от помех
- расчет и отрисовка множеств Мандельброта и Жюлиа (фрактальная геометрия);
- управление элементами адаптивной оптики

Результаты ряда экспериментов проведенных на макете с задачами приведены в Приложении «Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера “Мультикон”».

При эксплуатации макетных образцов ОВС и программного обеспечения были получены следующие результаты:

- Проведены оценки и моделирование ряда задач с целью оценки эффективности применения ОВС.
- Выявлены пути повышения производительности ОВС.
- Сформулированы требования к перспективной модели.
- Разработана архитектура и принципиальные схемы перспективного процессора ОВЗС и проведено его моделирование.
- Получен опыт разработки и эксплуатации программного обеспечения, в том числе и реальных прикладных задач.
- Определены пути вычисления производительности ОВС на разных типах задач и критерии эффективности применения ОВС в различных областях.
- Сформированы требования к составу и свойствам системного ПО ОВЗС новой архитектуры.
- Разработана система подготовки и отладки программ для ОВЗС новой архитектуры на языке ассемблера.

Все это дает основания утверждать, что разработки уровня ОВС суперкомпьютера готовы к технической реализации.

## 7. Основные направления разработок по Программе, их реализуемость, оценка способности исполнителей выполнить эти работы

В данном разделе ИПС РАН и Предприятие СКС особое внимание уделили тем работам, от которых в сильной степени зависит успех Программы и для которых основными исполнителями являются ИПС РАН и Предприятие СКС. Этот материал изложен в разделах:

- 7.1 "Разработка промышленной версии Т-системы" (стр. 46);
- 7.2 "Разработка аппаратного и программного обеспечения уровня ОВС суперкомпьютера" (стр. 50).

Кроме того, в разделе "7.3 Полный перечень мероприятий по Программе" (стр. 52) приводится полный перечень мероприятий программы.

**Замечание.** Дополнительный анализ способности исполнителей выполнить мероприятия Программы (по всем исполнителям) см. в «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта» в разделе "4. Научно-технический и производственный потенциал".

### 7.1 Разработка промышленной версии Т-системы

#### 7.1.1 Характеристика работ, которые необходимо выполнить по данному направлению

Являющаяся результатом проведенной в ИПС РАН многолетней разработки имеющаяся на сегодняшний момент опытная реализация Т-системы, включающая в себя Т-ядро и Т-язык, способна обеспечить поддержку выполнения Т-программ на программно-аппаратной платформе "кластер вычислительных узлов на базе монопроцессорных и SMP-мультипроцессорных IBM/PC-совместимых компьютеров, работающих под управлением ОС Linux". Разработанные и реализованные в данной версии Т-системы алгоритмы Т-ядра и функциональное наполнение Т-языка прошли обширную и достаточную проверку в процессе опытной эксплуатации аппаратно-программного прототипного образца кластерного уровня суперкомпьютера (см раздел 6.1.2 настоящего документа).

Во время реализации Программы СКИБР существующая опытная версия Т-системы должна быть доведена до промышленной версии Т-системы, что в основном заключается в выполнении следующих работ:

- включение в Т-ядро ряда функций, предварительная проработка которых уже проведена:
  - поддержка парадигмы распределенных объектов и ресурсов—что среди прочего улучшит характеристики сопряжения Т-ядра с файловой системой и даст возможность эффективного взаимодействия с ОВС;
  - включение в Т-ядро механизмов, реализующих выполнение Т-задачи в режиме "повторение трассы выполнения"—с целью дальнейшего развития средств отладки Т-программ;
- выполнение ряда изменений в коде Т-ядра, связанных с оптимизацией реализации:
  - LMSE-протокола (блокирование передаваемых пакетов);
  - алгоритма внешнего планирования (введение иерархии "бирж труда");
  - алгоритмов управления памятью;
- выполнение ряда изменений в коде Т-ядра, связанных с повышением мобильности:
  - реализация поддержки протоколов транспортного уровня, отличных от UDP/IP—например, пакетного протокола, поддерживаемого аппаратными реализациями SCSI;
  - реализация элементов поддержки современных и перспективных 64-битовых микропроцессорных архитектур (Alpha, UltraSparc II, Merced);
- расширение Т-языка, предварительная проработка которого уже проведена:
  - поддержка парадигмы распределенных объектов и ресурсов—возможность пользователю создания и методов работы с собственными объектами;
  - внесение в Т-язык интерфейса связей между различными модулями Т-программы;
- доработка системы программирования:

- редактор связей и библиотека стандартных функций;
- описания Т-языка, руководство пользователя (по ЕСПД);
- промышленная версия Т-ядра, программная документация Т-ядра (по ЕСПД).

Таким образом, в прототипной версии Т-системы полностью выполнен научный поиск и найдены все основные технические решения, являющиеся ключевыми для реализации Программы. Тем самым разработка промышленной версии Т-системы—не более чем тщательная работа по выполнению эффективной программной реализации (в контексте одной системы) ранее найденных решений, прошедших в том числе и этап опытной проверки.

### **7.1.2 Исполнитель и его способность реализовать результат по направлению.**

#### *7.1.2.1 Конкретные результаты, описание разработанных методов*

У исполнителя работ по данному направлению—сложившегося в ИПС РАН коллектива разработчиков Т-системы—в настоящее время накоплен большой задел по предлагаемым в Программе работам. Конкретными результатами в этом заделе являются:

- Результаты научных поисковых работ, приведшие к разработке основных принципов реализации Т-системы, изложенные в научных публикациях и рабочих материалах (подробнее см. раздел 7.1.2.3 настоящего документа).
- Реализованная предварительная версия Т-системы—программная система, поддерживающая концепцию автоматического динамического распараллеливания программ—программный комплекс из (подробнее см. «Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.»):
  - s Т-ядра—компонент поддержки времени исполнения программы (run-time support);
  - s языковых средств Т-системы—языка программирования (Т-языка), компилятора, редактора связей, библиотеки стандартных подпрограмм.
- Реализованный неоднородный мультипроцессор с кластерной архитектурой (24 процессора двух типов Intel Pentium Pro-200 и Intel Pentium II-266; девять вычислительных узлов трех типов: монопроцессорные, SMP-двухпроцессорные и SMP-шестипроцессорные; теор. пик 5.5 GFlops, ОЗУ 1,408 МВ, объем дисков 70.4 GB), подробно описанный в «Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.» и «Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.»).
- Результаты полугодовой опытной эксплуатации: на указанном мультипроцессоре под управлением Т-системы выполнялись демонстрационные и решались прикладные задачи, требующие высоких объемов вычислений. Результаты опытной эксплуатации подтвердили перспективность заложенных в Т-систему научных и технических разработок и были изложены в последних публикациях по проекту (см. раздел 7.1.2.3 настоящего документа и «Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.»).

#### *7.1.2.2 О защите интеллектуальной собственности ИПС РАН на полученные результаты*

ИПС РАН не проводил работ по патентованию решений, найденных в процессе работы по Т-системе. В то же время можно отметить, что часть полученных по данному направлению на сегодняшний день результатов является потенциально патентоспособной. В первую очередь это относится к:

- конкретным методам отображения абстрактных понятий вычислительной модели в структуры данных и алгоритмы, примененным в Т-системе и определившим ее эффективность;

- элементам реализации понятия "неготовое значение" и поддержки корректного выполнения некоторых операций над неготовыми значениями (подробнее см. стр. 8 данного документа);
- элементам реализации оригинального алгоритма динамического автоматического распределения процессов по процессорам (подробнее см. стр. 8 данного документа).

Таким образом, с принципиальной точки зрения, проведение деятельности в области патентования полученных сотрудниками научного коллектива ИПС РАН результатов по Т-проекту может быть организовано уже в настоящее время и будет несомненно выполнено в рамках Программы.

### 7.1.2.3 Основные публикации по теме разработки

1. [1988-MDA] Абрамов С.М., Барбан А.П., Михнушев Д.П., Сибиркова Л.А. *Программное обеспечение комплекса ЕС ЭВМ/машина динамической архитектуры*//В сб.: "Вопросы РЭ", тематический сборник, серия ВТ № 7 стр. 1–25, 1988
2. [1989-MDA] Абакумов А.А., Абрамов С.М., Адамович А.И., Нестеров И.А., Пименов С.П., Рядченко А.В., Хаткевич М.И., Шевчук Ю.В. *Концепция разработки ПО МДА*//В сб. Всесоюзная конференция молодых ученых и специалистов по проблемам кибернетики и вычислительной техники. Тезисы докладов. Москва—Переславль-Залесский, 1989
3. [1991-PS] Abramov S.M., Adamowitch A.I., Nesterov I.A., Pimenov S.P., Shevchuck Yu.V. *Principles of software tools implementation for multiprocessor with automatic dynamic parallelizing*// In: Proceedings of 16th international school Programming'91, Sofia, Bulgaria, 1991
4. [1993-NATUG] Abramov S.M., Adamowitch A.I., Nesterov I.A., Pimenov S.P., Shevchuck Yu.V. *Autotransformation of evaluation network as a basis for automatic dynamic parallelizing*//In: Proceedings of 6th NATUG meeting., Vancouver, Canada, IOS Press 93, pp. 333-344, 1993  
Доступна в Internet: <ftp://ftp.botik.ru/pub/local/RCMS/SSPA/AENADP-93-tifs.tar.Z>
5. [1993-TR] Абрамов С.М., Нестеров И.А., Шевчук Ю.В. Т-язык. *Предварительное описание*//Технический отчет, ИПС РАН, 1993
6. [1994-AT] Абрамов С.М., Адамович А.И., Нестеров И.А., Пименов С.П., Шевчук Ю.В. *Автотрансформация вычислительной сети—основа для автоматического и динамического распараллеливания*//В сб. "Теоретические и прикладные основы программных систем", Переславль-Залесский, ИПС РАН, стр. 103-124, 1994
7. [1994-TL] Abramov S.M., Nesterov I.A., Shevchuk Yu.V. *T-language. Preliminary description*//RCMS Tech. Report #09/18/1994  
Доступна в Internet: <ftp://ftp.botik.ru/pub/local/RCMS/SSPA/>  
файлы: tlp.ps, или tlp.ps.Z, или tlp-ps.zip.
8. [1995-PACT] Adamovich A.I. cT: an Imperative Language with Parallelizing Features Supporting the Computation Model "Autotransformation of the Evaluation Network // Parallel computing technologies. proceedings / PaCT-95, St. Petersburg, Russia. Springer, September 12—25, 127-141, 1995  
Доступна в Internet: <ftp://ftp.botik.ru/pub/local/RCMS/SSPA/>,  
файлы: cT-95.ps.Z или ct-95-ps.zip.
9. [1995-SIAM] I.A.Nesterov, I.V.Suslov., *Towards programming of numerical problems within the system providing automatic parallelizing*//Proceedings of 7th SIAM conference on parallel processing for scientific computing, p.716, San-Francisco, CA, 1995.
10. [1999-T] С.М. Абрамов, А.И. Адамович, Р.В. Позлевиц *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: Юбилейный сборник трудов Института программных систем. Под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.  
Доступна в Internet: <http://www.botik.ru/~t-system/docs/T-system.doc>
11. [1999-F] А.И. Адамович, А.В. Митин *Реализация в Т-системе задачи фильтрации потока данных—на примере программы построения списка простых чисел методом "решето Эратосфена"*//Принята к публикации: Юбилейный сборник трудов Института программных систем. Под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН,



1999 г.

**Доступна в Internet:** <http://www.botik.ru/~t-system/docs/t-filter.doc>

12. [1999-GI] С.В. Дужин, А.И. Каишев *Реализация в Т-системе программы вычисления  $sl$ -и  $so$ -полиномов для 3-графов*//Принята к публикации: Юбилейный сборник трудов Института программных систем. Под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.

**Доступна в Internet:** <http://www.botik.ru/~t-system/docs/t-polynoms.doc>

13. [1999-Q] А.И. Адамович, А.П. Коньшев, Ю.В. Шевчук *Реализация в Т-системе задачи построения множества, заданного рекурсивным определением—на примере программы расстановки ферзей на шахматной доске*//Принята к публикации: Юбилейный сборник трудов Института программных систем. Под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.

**Доступна в Internet:** <http://www.botik.ru/~t-system/docs/t-q.doc>

14. [1999-RT] А.И. Адамович, М.Р. Коваленко, А.П. Коньшев *Реализация в Т-системе программы построения качественных изображений трехмерных сцен методом трассировки лучей*//Принята к публикации: Юбилейный сборник трудов Института программных систем. Под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.

**Доступна в Internet:** <http://www.botik.ru/~t-system/docs/t-ray.doc>

15. [1999-TS] С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко *Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ*//Принята к публикации: журнал "Программирование" № 2, 1999 г.

#### 7.1.2.4 *Время работы в данной области*

Работы ИПС РАН в области суперкомпьютерных систем с параллельными архитектурами были начаты в 1987 году и выполнялись без перерыва до сего дня (**11 лет**).

ИПС РАН (подразделение ИЦМС РАН) участвовал в следующих работах:

- **1987-1992 годы:** работы по созданию ПО для мультипроцессоров МДА ЕС-2704 и ЕС-2740 из серии спецпроцессоров ЕС ЭВМ);
- **1992-1996 годы:** инициативные работы ИПС РАН, использующие опыт, полученный в работе по проекту МДА и направленные на научные поисковые работы, приведшие к разработке основных принципов реализации Т-системы и к первым программным реализациям фрагментов Т-системы. Часть работ выполнялась в рамках международного (ЕС) гранта ИНТАС, где ИЦМС РАН работал совместно с фирмой Imos (разработчик и производитель транспьютеров).
- **1997-1998 годы:** инициативные работы ИПС РАН, частично поддержанные грантом РФФИ 97-01-00172, направленные на реализацию сегодняшней версии Т-системы, неоднородного мультипроцессора с кластерной архитектурой (с поддержкой от НТИМИ Миннауки), реализацию демонстрационных и прикладных программ, проведению опытной эксплуатации Т-системы и исследованию реальных свойств прикладных программ, исполняемых под управлением Т-системы.

#### 7.1.2.5 *Характеристика кадрового состава и квалификации коллектива разработчиков Т-системы*

Состав данного научного коллектива сложился в процессе проведения работ по Т-системе, осуществлявшихся в ИПС РАН в течение продолжительного периода времени. В частности, значительная часть сотрудников, входящих в состав коллектива, работает в данном направлении с момента начала работ в 1987-м году (в течение 11 лет). Все сотрудники данного коллектива принимали активное участие в работах по Т-системе, обеспечив:

- получение ряда важных научных результатов, изложенных как в выступлениях на научных конференциях, так и в научных публикациях, выполненных в отечественных и зарубежных научных изданиях;
- успешное выполнение значительного числа НИР и НИОКР, создавших основу для реализации данного Программы.

**Вывод.** Исполнитель работ по данному направлению обладает коллективом, который по численности, квалификации и опыту работы по теме Программы безусловно обеспечит выполнение работ, предусмотренных Программой.

## **7.2 Разработка аппаратного и программного обеспечения уровня ОВС суперкомпьютера**

### **7.2.1 Характеристика работ, которые необходимо выполнить по данному направлению**

Существующий макетный образец позволил отработать методы разработки программных продуктов на ОВС и помог выявить пути улучшения вычислительных характеристик ОВС.

Во время реализации Программы СКИБР необходимо выполнить следующие работы:

- В области аппаратных средств:
  - Разработать СБИС новой архитектуры на основе разработанных принципиальных схем, работоспособность которых подтверждена в результате моделирования;
  - Разработать контроллер блока;
  - Разработать конструктивы ТЭЗов, блоков, стоек;
  - Разработать устройство сопряжения с другими вычислительными и периферийными устройствами;
- В области программного обеспечения и инструментальных средств программирования:
  - Реализация в полном объеме трехуровневой системы программирования, а именно:
    - \* макроассемблера, обеспечивающего возможность ручной компоновки программ на матрице ОВС;
    - \* линкера-компоновщика, обеспечивающего автоматическую компоновку программы на матрице ОВС, а также отвечающего за оптимизацию исходной программы;
    - \* компилятора графового языка программирования высокого уровня, позволяющего быстро и со всеми удобствами программировать на ОВС;
    - \* компилятора параллельного фортрана HPPF.
  - Разработка стандартных библиотек функций для ОВС: математическая, обработка сигналов, библиотека логических функций, библиотека стандартных драйверов внешних устройств, библиотека для работы с графами и списками.
  - Разработка комплекса программ для тестирования матрицы ОВС, соединений с внешними устройствами.
  - Разработка комплекса программ и драйверов для взаимодействия с уровнем Т-системы.
  - Разработка средств отладки программ под ОВС и программ под объединенную систему—Т-система и ОВС.

Учитывая высокий уровень существующего задела (см. раздел 6.2 на стр. 42 настоящего документа), готовность макета ОВС и ПО макета, опыт и квалификацию исполнителей, можно быть уверенным, что данные работы будут выполнены в сроки, предусмотренные Программой СКИБР.

### **7.2.2 Исполнитель и его способность реализовать результат по направлению**

#### *7.2.2.1 Конкретные результаты, описание разработанных аппаратно-программных средств*

У исполнителя работ по данному направлению—сложившегося в предприятии "Суперкомпьютерные Системы" коллектива—в настоящее время накоплен большой задел по предлагаемым в Программе работам. Конкретными результатами в этом заделе являются:

- результаты ряда НИР, приведшие к разработке основных принципов реализации ОВС суперкомпьютера, изложенные в научных публикациях, заявках на патенты и рабочих материалах (подробнее см. раздел "7.2.2.2 Основные публикации" на стр. 51 настоящего документа);
- разработка системы подготовки и отладки программ для макетного образца ОВС суперкомпьютера, поддерживающей концепцию статического распараллеливания программ (подробнее см. раздел 4.3.2 на стр. 29 настоящего документа и «Приложение 4. »);

- разработка макетного образца ОВС, содержащего 8000 последовательных RISC-процессоров, а затем и макетного образца уровня ОВС суперкомпьютера, состоящего из 4-х блоков ОВС, содержащих 92000 последовательных RISC-процессоров (подробнее см. раздел 6.2.1 на стр. 42 настоящего документа и «Приложение 4. »);

Результаты опытной эксплуатации прототипа и макета ОВС суперкомпьютера на ряде демонстрационных и практических задач, требующих высокого быстродействия в режиме реального времени приведены в «Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера “Мультикон”». Результаты опытной эксплуатации подтвердили перспективность заложенных в аппаратные и программные средства ОВС суперкомпьютера научных и технических решений и послужили основой для предлагаемого проекта.

#### 7.2.2.2 Основные публикации

1. Богачев М.П. и др. **Ячейка однородной вычислительной структуры**//Авторское свидетельство СССР № 691846 Кл. G 06 F 7/00 1979г.
2. Богачев М.П. и др. **Однородная вычислительная структура**//Авторское свидетельство СССР № 684986 Кл. G 06 F 15/00 1979г.
3. Богачев М.П. **Архитектура вычислительной системы с однородной структурой**//В кн. Однородные вычислительные среды. Архитектуры и реализации. Львов, 1981, с.15-21.(Препринт/АН УССР. Физ.-мех. Ин-т; №41)
4. **Вычислительные системы, структуры и среды для решения задач большой размерности** Том 3. Под ред. В.В. Грицыка//Киев : Наукова Думка,1986.-288с.
5. Бачериков Г.И., Геворкян В.И. **Параллельный процессор с перепрограммируемой структурой**//Патент РФ № 2110088 Кл. G 06 F 15/16, 15/00 (БИ №12 1998г.)
6. Бачериков Г.И., Геворкян В.И., Крохин В.М. **Однородная вычислительная среда с двухслойной программируемой структурой**//Кл. G 06 F 15/16 Заявка на патент №98115676 от 25.08.98

#### 7.2.2.3 Хронология работ в данной области

Работы по реализации данного подхода к разработке процессоров на основе однородных вычислительных сред для решения задач реального времени в ряде специальных применений были начаты в 1976 г. в НПО "Астрофизика" и продолжались на других предприятиях с сохранением костяка коллектива и преемственности концепций:

- **1976–1990 годы:** Работы велись в НПО "Астрофизика" г. Москва. Была разработана концепция ОВС компьютера. В НПО "Альфа" г. Рига разработали БИС ОВС- М1005. Сначала с использованием ЕС ЭВМ, а затем и IBM-совместимых компьютеров разработана кросс-система подготовки и отладки программ на основе ОВС-макроассемблера. Работы закончились созданием прототипа ОВС суперкомпьютера, содержащего 8000 последовательных RISC-процессоров, на базе которого была решена задача управления гибким адаптивным зеркалом мощного лазера с целью коррекции волнового фронта излучателя.
- **1991–1993 годы:** Велись инициативные работы по созданию макетного образца ОВС суперкомпьютера, состоящего из 4-х блоков ОВС, содержащих 92000 последовательных RISC-процессоров. Была разработана система подготовки и отладки программ на основе языка графического ассемблера с использованием IBM-совместимых компьютеров в качестве рабочего места программиста. С целью демонстрации работоспособности были реализованы несколько демонстрационных задач.
- **1993–1998 годы:** Велись инициативные работы по разработке демонстрационных и тестовых задач, оценке и анализу результатов эксплуатации, разрабатывалась система тестирования. В этот период проводился анализ задач, предложенных рядом предприятий с целью определения области наиболее эффективного применения ОВС суперкомпьютера. По результатам этих работ была переработана архитектура процессора ОВС и выдвинута концепция двухуровневой архитектуры "ОВС + мультипроцессор с кластерной архитектурой".

#### 7.2.2.4 Характеристика кадрового состава и квалификации коллектива разработчиков

Состав сотрудников предприятия "Суперкомпьютерные системы" сложился в процессе работ по однородным вычислительным средам, осуществлявшихся в течение последнего пе-

риода времени. Ведущие специалисты, входящие в состав коллектива, работают в данном направлении с момента начала работ. Благодаря целенаправленной подготовке студентов в Московском Энергетическом институте в коллективе есть группа талантливой молодежи. Все сотрудники данного коллектива принимали активное участие в работах по ОВС суперкомпьютеру, обеспечив:

- получение ряда важных технических результатов, изложенных как в выступлениях на научных конференциях, так и в научных публикациях;
- успешное выполнение работ, создавших основу для реализации данной Программы.

**Вывод.** Исполнитель работ по данному направлению обладает коллективом, который по численности, квалификации и опыту работы по теме Программы в состоянии обеспечить выполнение работ, предусмотренных Программой.

### 7.3 Полный перечень мероприятий по Программе

Ниже (см. Таблица 3) приведен полный перечень мероприятий по Программе, в котором отражены организации-исполнители и длительность работ, а также объемы финансирования—по годам и суммарно—как по каждому из мероприятий Программы, так и по всей Программе в целом.

**Таблица 3. Мероприятия, по программе СКИБР**

Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
1. Провести предпроектные исследования и разработки (IV кв. 1998 г.)	От РБ—НИО «Кибернетика» и Институт технической кибернетики (ИТК) НАН Беларуси От РФ—ИПС РАН, Предприятие СКС, ИВ-ВиБД	3						
2. Разработать и освоить в серийном производстве СБИС процессорных элементов для моделей первого ряда семейства суперкомпьютеров.	От РБ—НИКТП «Белмикросистемы» От РФ—Предприятие СКС	20	255,0	175,0				430,0
3. Разработать и освоить в производстве базовые конструктивные модули первого ряда семейства суперкомпьютеров	От РБ—ГП «НИИЭВМ», ГП «МПОВТ», НИО «Кибернетика», ИТК От РФ—ИПС РАН, Предприятие «Суперкомпьютерные системы»	30	850,0	1200,0	750,0			2800,0

Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
4. Разработать общесистемное программное обеспечение семейства моделей суперкомпьютеров	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, ГП «НИИ-ЭВМ», КБ СП (г. Гомель) От РФ—Предприятие «СКС», ИПС РАН	30	800,0	1500,0	900,0			3200,0
5. Провести исследования, определить требования и разработать технические предложения по созданию перспективных моделей семейства суперкомпьютеров.	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, ГП «НИИЭВМ», НИКТП «Белмикросистемы», ГП «МПО ВТ» От РФ—ИПС РАН, предприятие «СКС»	18		150,0	100,0			250,0
6. Разработать и освоить в производстве перспективные модели семейства суперкомпьютеров на новой элементной базе.	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, НИКТП «Белмикросистемы», ГП «НИИЭВМ», ГП «МПО ВТ» От РФ—ИПС РАН, Предприятие «СКС»	36		300,0	1080,0	1830,0	600,0	3810,0
7. Организовать и осуществить подготовку кадров и обеспечить проведение фундаментальных и прикладных научных исследований в области разработки и использования новых информационных технологий на базе суперкомпьютеров	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, ГП «НИИ-ЭВМ», БГУИР, БГУ, ВАРБ От РФ—ИПС РАН, Предприятие «СКС»	18	50,0	100,0	500,0	500,0	615,0	1765,0

Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
8. Разработать и внедрить систему для обработки радиолокационных и оптических сигналов с использованием вычислительных модулей ОВС.	От РБ—КБ СП (г. Гомель), НИО «Кибернетика», ИТК, БГУИР, ВА РБ От РФ—ИПС РАН, Предприятие «СКС», МАК «ВЫМПЕЛ», ОКБ "Электроавтоматики", ОАО "Объединенный авиаприборостроительный консорциум", ГУП "Дом оптики" ГОИ им. С.И. Вавилова, НИИ Космических систем	24		50,0	350,0	150,0		550,0
9. Разработать систему для автоматического распознавания и селекции целей в реальном масштабе времени на базе вычислительных модулей ОВС.	От РБ—КБ СП, БГУИР, ВАРБ, ИТК От РФ—Предприятие «СКС», МАК «ВЫМПЕЛ», Научный центр нейрокомпьютеров Министерства экономики РФ	20			100,0	450,0		550,0
10. Разработать аппаратно-программные средства для обработки и отображения данных в реальном масштабе времени в кардиологическом комплексе нового поколения на основе встраиваемых вычислительных модулей ОВС.	От РБ—Институт кардиологии, НИО «Кибернетика», ИТК, Институт повышения квалификации врачей От РФ—ИПС РАН, Предприятие «СКС», Военно-медицинская Академия	30	100,0	300,0	300,0	250,0		950,0

Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
11. Разработать экспериментальную систему с программным обеспечением на базе вычислительных модулей ОВС для распознавания символьных изображений.	От РБ—БГУИР, НИО «Кибернетика», ИТК	24		100,0	50,0	100,0		250,0
12. Разработать и провести испытания опытного образца аппаратно-программного комплекса на базе моделей семейства суперкомпьютеров для функционально-параметрического диагностирования радиоэлектронной аппаратуры вооружения и военной техники при проведении ремонтно-восстановительных работ.	От РБ—ВА РБ, З-д «КАЛИБР», НИО «Кибернетика», Предприятие «ДЭЛС»	30	50,0	100,0	200,0	100,0		450,0
13. Разработать новые и адаптировать существующие программные средства для моделирования и расчетов нестационарных и аварийных процессов в ядерных реакторах атомных электростанций с использованием суперкомпьютеров.	От РБ—ИПЭ НАН Беларуси От РФ—Институт им. Курчатова, Институт Атомэнергопроект, Российский Федеральный Ядерный Центр ВНИИЭФ, г. Саров	24		50,0	280,0	170,0		500,0

Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
14. Разработать новые и адаптировать существующие программные средства для оперативного и долгосрочного прогнозирования погоды, мониторинга чрезвычайных ситуаций и глобальных изменений климата на территории Союза с использованием суперкомпьютеров.	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, Белгидромет От РФ— Росгидромет	24		50,0	100,0	100,0		250,0
15. Разработать на основе многопроцессорной рабочей станции с гибридной архитектурой автоматизированное рабочее место командира группировки ПВО.	От РБ—ВА РБ, НИО «Кибернетика», ИТК, Предприятие «ДЭЛС»	30	50,0	50,0	100,0	100,0		300,0
16. Разработать и реализовать программно-технические решения с использованием суперкомпьютеров и создать на их основе высокоскоростную выделенную телекоммуникационную сеть, объединяющую участников совместной Программы Беларуси и России.	От РБ - НИО «Кибернетика», НИП «Информационные технологии» От РФ—ИПС РАН, ВУЗТЕЛЕКОМ, ИВ-ВиБД	инсталлировать: 3; поддержка: 57	685,0	500,0	500,0	500,0	500,0	2685,0
17. Разработать и внедрить систему для моделирования широкополосных пространственно-временных радиолокационных сигналов с использованием вычислительных модулей ОВС.	От РБ—НИО «Кибернетика», ИТК, ВА РБ, ПРЕДПРИЯТИЕ «ДЭЛС»	30	50,0	100,0	200,0	50,0		400,0



Содержание мероприятия	Исполнители работ по мероприятию	Длительность мероприятия (мес.)	Объемы финансирования (тыс. долл. США), в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ					Итого
			1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	
18. Создать экспериментальный аппаратно-программный много-процессорный комплекс с параллельной архитектурой.	От РФ— Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных От РБ—НИО «Кибернетика»	24	175,0	175,0				350,0
19. Создать пакет прикладных программ для расчёта элементарных процессов газодинамики и получения коэффициентов замыкающих соотношений для уравнений газодинамики.	От РФ— Институт высокопроизводительных вычислений и баз данных От РБ—АНК «Институт теплообмена», «НИО Кибернетика», Институт физики	24	35,0	35,0				70,0
20. Обеспечить научно-техническое и организационное сопровождение выполнения совместной программы	От РБ—НИО «Кибернетика» От РФ—ИПС РАН	60	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	150,0
21. Создание инструментальных средств проектирования интеллектуальных систем на базе суперкомпьютера и разработка на их основе универсальной моделирующей среды.	От РБ—БГУИР, ИСПИ От РФ—ИПС РАН, ВЦ РАН, ИПУ РАН	50	700,0	700,0	600,0	600,0	600,0	3200,0
<b>ВСЕГО:</b>			<b>3830,0</b>	<b>5665,0</b>	<b>6140,0</b>	<b>4830,0</b>	<b>2345,0</b>	<b>22910,0</b>

## 8. Экономическое обоснование Программы

С учетом стратегического значения Программы для Союза России и Беларуси, запланировано придать СКИБР статус **союзной программы** и осуществлять ее финансирование за счет бюджета Союза.

К финансированию Программы будут также привлечены собственные внебюджетные средства исполнителей, а также средства государственных бюджетов обеих стран в установленном порядке.

## 8.1 Оценка стоимости Программы

В соответствии с разделом 7.3 настоящего документа, а также разделом 5 из «Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта», общие затраты из союзного бюджета на реализацию Программы оценены в **22,9 млн. долларов США** (в переводе на национальные валюты РФ и РБ по курсам Центрального Банка РФ и Национального Банка РБ). Из них:

- на научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки—30%;
- на разработку программного обеспечения—53%;
- на технологическую подготовку производства—16%;
- на научно-информационное сопровождение и управление Программой—1%.

## 8.2 Экономический эффект от реализации Программы

От реализации Программы СКИБР ожидается получение существенных экономического, социального и политического эффекта (подробный анализ приведен ниже):

- **прямой экономический эффект:**
  - поставки суперкомпьютерной техники и программного обеспечения собственного производства в заинтересованные предприятия России и Беларуси;
  - сокращение средств на импорт аппаратных средств параллельных высокопроизводительных вычислений;
  - сокращение средств на закупку программного обеспечения для организации параллельных высокопроизводительных вычислений (годовые потребности России и Беларуси оцениваются в несколько миллионов долларов);
  - экспортные возможности поставок собственных аппаратных и программных средств для организации параллельных высокопроизводительных вычислений в развивающиеся страны, которые испытывают большой интерес к обладанию суперкомпьютерными технологиями и ограничения в доступе к таким технологиям со стороны высокоразвитых стран;
- **прямой социальный эффект:**
  - поддержка собственных разработчиков аппаратных и программных средств для параллельных высокопроизводительных вычислений;
- **прямой политический эффект:**
  - обладание критической технологией;
  - сокращение зависимости России и Беларуси от внешних поставок суперкомпьютерного оборудования и программного обеспечения;
  - повышение престижа стран, как разработчиков суперкомпьютерных технологий;
- **технологический эффект; дополнительные (вторичные, косвенные) экономический, политический и социальный эффекты:**
  - развитие аппаратных и программных средств для параллельных высокопроизводительных вычислений и средств автоматизации параллельных вычислений приведет к высокой доступности СуперЭВМ для предприятий наших стран, к облегчению реализации параллельных программ, к расширению использования суперкомпьютерных технологий в различных областях, науки, техники и промышленности. Это позволит осуществить технологический прорыв в различных областях науки, техники и промышленности, что приведет к дополнительным (вторичным, косвенным) экономическому, политическому и социальному эффектам.

Предпосылкой получения экономического эффекта от реализации Проекта СКИБР является комплексный подход, базирующийся на единой идеологии создания семейства моделей суперкомпьютеров с параллельной архитектурой, предназначенных для оптимального решения широкого класса задач с большими объемами вычислений (в том числе "тяжелые" задачи). Примерами таких "тяжелых" вычислительных задач являются задачи моделирования сложных физических процессов (задачи аэродинамики, ядерной физики, метеорологии и др.),

виртуальное проектирование, задачи искусственного интеллекта, компьютерной алгебры и т.п.

Единая идеология создания семейства суперкомпьютеров предусматривает двухуровневую структуру архитектурных решений высокопроизводительных вычислительных систем с параллельной архитектурой—кластерной и ОВС компоненты. Как уже отмечалось, наличие двух разных по принципам реализации ВВСПА архитектурных компонент, компенсирующих своими сильными сторонами недостатки друг друга, позволяет выбрать такой тип способа отображения задачи, при котором время решения задачи уменьшается, не вызывая чрезмерного роста стоимости. Существенное снижение стоимости семейства суперкомпьютеров "СКИБР" достигается также за счет использования:

- оригинального программного продукта (Т-система) для эффективного автоматического динамического распараллеливания программ;
- вычислительных узлов ОВС на базе большого числа (десятки тысяч) простых, недорогих однокристальных процессоров отечественного производства ;
- готовой операционной системы Linux для управления сетью вычислительных узлов на кластерном уровне.

Изложенные принципы позволяют создавать семейство недорогих суперкомпьютеров с широким диапазоном производительности (от миллиардов операций в секунду до терафлопсового диапазона) при достижении высокого уровня использования вычислительной мощности мультипроцессорной системы (не ниже 90%) для решения широкого спектра прикладных задач.

Например, стоимость мультипроцессорной системы на базе кластерного уровня предлагаемой архитектуры, включающей 24 стандартных процессора Intel Pentium, может быть оценена примерно в 30 000 \$.

По своей производительности (не менее 5,5 GFlops) такая система эквивалентна суперкомпьютерам класса Cray 94 (3 процессора), Cray YMP/832 (16 процессоров), MP Exemplar V-Class (8 процессоров), стоимость которых в десятки раз больше (сотни тысяч долларов).

При потребности, например, российской науки и наукоемких технологий в тысячах таких мультикомпьютеров только прямой суммарный экономический эффект может составить сотни миллионов долларов (подробнее, см. раздел 8.2.1 "Стоимостные характеристики суперкомпьютеров, создаваемых по Программе", стр. 62).

**Реализация Проекта СКИБР позволит** создать ряд отечественных масштабируемых суперкомпьютеров производительностью от 1 до 1000 миллиардов операций в секунду, которые будут в 10-100 раз дешевле аналогичных западных систем, при потребляемой мощности в 5-10 раз меньше. Производимые вычислительные системы будут применяться в авиации и космонавтике, медицине и оптике, управлении и экономике, коммуникационных системах и науке. Для большинства населения станут доступны системы высокоэффективной диагностики (томографы и ультразвуковые системы), научные центры смогут иметь дешевый доступ к высокопроизводительным системам, что позволит резко сократить время на разработку новых материалов, химических веществ, моделировать взрывные процессы и сложные системы.

**Например,** кардиокомплекс, созданный с применением модулей ОВС, позволит изготовить ультразвуковую систему диагностики сердца, которая в 5 раз превосходит зарубежные аналоги по разрешающей способности, в 10 раз уменьшает интенсивность ультразвукового облучения пациента и в 5-10 раз дешевле аналогов. **Срок окупаемости:** 2 года после начала производства.

Конкретный количественный расчет экономического эффекта от проведения ОКР "СКИБР" может быть выполнен после согласования и утверждения в установленном порядке ОТЗ на семейство суперкомпьютеров и ЧТЗ на модели ряда.

В частности, обладание критической технологией автоматического динамического распараллеливания, позволяет:

- обеспечить потенциал для значительного расширения области применимости суперкомпьютерных вычислительных установок с аппаратной архитектурой "тесно связанная сеть (кластер) вычислительных узлов, имеющих традиционную архитектуру";

- эффективно использовать данную аппаратную архитектуру, значительно (до 3-5 раз) повысить коэффициент использования вычислительной мощности суперкомпьютера и, как следствие, до 3-5 раз повысить оперативность решения прикладных задач, либо до 3-5 раз снизить расходы на построение аппаратных средств конкретных прикладных систем;
- отказаться от закупки дорогостоящих готовых импортных аппаратных и программных технологий параллельных вычислений в пользу отечественных в 20 и более раз более экономичных;
- производить коммерческую реализацию программной документации промышленной версии ядра Т-системы в составе комплекса базового программного обеспечения суперкомпьютерных систем, в том числе в “развивающихся” странах, испытывающих большой интерес и потребности в суперкомпьютерных технологиях при ограничениях со стороны “развитых” стран на доступ к таким технологиям.

Затраты на реализацию промышленной версии ядра Т-системы планируется окупить в течение 3 лет за счет:

- экономии средств на построение аппаратуры и программного обеспечения конкретных прикладных систем;
- повышения оперативности решения прикладных задач;
- эффекта от широкого внедрения суперкомпьютерных установок в прикладных областях;
- коммерческой реализации программной документации промышленной версии ядра Т-системы в составе комплекса базового программного обеспечения суперкомпьютерных систем.

Разработка и реализация системы программирования для верхнего уровня суперкомпьютеров обеспечит:

- возможность широкого использования отечественной разработки - технологии автоматического распараллеливания программ - специалистами в области прикладного программирования, работающими в различных прикладных областях;
- критическое (до 10 раз) снижение сроков разработки программного обеспечения прикладных систем;
- пропорциональное (до 10 раз) снижение финансовых затрат на разработку программного обеспечения прикладных систем.

Затраты на реализацию системы программирования для верхнего уровня суперкомпьютеров планируется окупить в течение 3 лет за счет:

- эффекта от широкого внедрения суперкомпьютерных установок в прикладных областях;
- снижения затрат на разработку программного обеспечения прикладных систем;
- коммерческой реализации программной документации системы программирования для верхнего уровня суперкомпьютера в составе комплекса базового программного обеспечения суперкомпьютерных систем, в том числе в “развивающихся” странах, испытывающих большой интерес и потребности в суперкомпьютерных технологиях при ограничениях со стороны “развитых” стран на доступ к таким технологиям.

**Реализация набора интерфейсов** для обеспечения возможности совместного использования двух уровней (кластерного и ОВС) суперкомпьютера, а также эффективного управления всем аппаратно-программным комплексом суперкомпьютера позволит:

- создать дополнительный потенциал для широкого использования суперкомпьютеров из серии, разрабатываемой по программе СКИБР, за счет обеспечения возможности реализации десятков различных классов прикладных систем, требующих использования возможностей аппаратуры и программных средств как кластерного уровня, так и уровня ОВС суперкомпьютера;
- до 10 и более раз снизить стоимость реализации и эксплуатации аппаратных средств, необходимых для создания прикладных систем для отдельных областей применения суперкомпьютеров данной серии;
- обеспечить значительное (до 2 раз) повышение эффективности эксплуатации всего аппаратно-программного комплекса суперкомпьютера в целом;

Затраты на реализацию набора интерфейсов планируется окупить в течение 3-4 лет с момента начала реализации прикладных систем за счет:

- снижения затрат на реализацию и эксплуатацию аппаратных средств;
- эффекта от реализации прикладных систем, требующих использования возможностей аппаратуры и программных средств как кластерного уровня, так и уровня ОВС суперкомпьютера.

**Реализация технических средств объединения входящих в состав суперкомпьютера вычислительных узлов в кластер** обеспечит возможность использования передовых технологических решений, позволяющих достичь высоких (80-1000 Мбайт/с) и сверхвысоких (от 1 Гбайт/с и выше) скоростей передач в составе суперкомпьютера, при частичном или полном использовании отечественной технологической базы для создания средств объединения в кластер входящих в состав суперкомпьютера вычислительных узлов. Это позволит:

- значительно (в 2 и более раз) повысить оперативность решения ряда прикладных задач, требующих наличия в кластерном уровне суперкомпьютера интенсивных потоков данных или в той же пропорции снизить расходы на построение аппаратных средств соответствующих прикладных систем;
- обеспечить разработку отечественных технологий и аппаратных средств, предназначенных для объединения входящих в состав суперкомпьютера вычислительных узлов в кластер, в 3-5 и более раз более экономичных по сравнению с планируемыми к использованию импортными комплектами;
- обеспечить основу для проведения дальнейших перспективных разработок в данном направлении;
- обеспечить основу для экспорта разработанных отечественных аппаратных и технологических решений в данной области.

Затраты на реализацию технических средств объединения входящих в состав суперкомпьютера вычислительных узлов в кластер планируется окупить в течение 2–3 лет с момента начала реализации прикладных систем и производства отечественных аппаратных и технологических решений в данной области.

Положительный экономический и социальный эффект от реализации проекта обусловлен также следующими факторами:

- развитием стратегически важного для государства ресурса в области высокопроизводительных вычислительных систем;
- созданием дополнительных рабочих мест (в науке и производстве);
- освоением в производстве конкурентоспособной в странах СНГ и дальнего зарубежья продукции, а следовательно, развитием экспортного потенциала страны;
- интеграцией усилий белорусских и российских ученых в рамках совместного проекта;
- монопольным (по крайней мере сегодня) обладанием критической технологией по созданию недорогих суперкомпьютеров для решения широкого класса прикладных задач;
- ускоренным развитием науки и производства за счет освоения высоких технологий, не имеющих аналогов в мире.

Принципиально важным является обеспечение безопасности использования вычислительных систем в критически важных и ответственных областях применения (АСУ военного назначения, государственные системы сбора и обработки данных, системы передачи данных и др.) за счет построения их на отечественной элементной базе и отечественном программном обеспечении.

Предварительные исследования, проведенные российской стороной в 1998г., выявили заинтересованность в проекте ряда ведущих организаций РФ, входящих в костяк российского научно-технологического комплекса, включая Российский федеральный ядерный центр, НПО "Автоматика", Институт машиноведения Уральского отделения РАН, СКБ "Электроавтоматика", а также Межрегиональный центр информатизации Центрального банка РФ. С этими организациями подписаны соответствующие протоколы о намерениях.

В настоящее время в рамках подготовки к реализации Проекта СКИБР заключены договора на создание прикладных систем на базе модуля ОВС:

- ГУП "Дом оптики" ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова - прикладные оптоэлектронные системы;
- Институт нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко РАМН - прикладные системы для анализа многоканальных биосигналов в нейрохирургии и неврологии;
- ОАО "Объединенный авиаприборостроительный консорциум", образованный постановлением Правительства России № 1347 от 14.11.98 г., в который входит более 10 предприятий,—прикладные системы для авиации и космонавтики;
- НИИ Космических систем—филиал ГКНПЦ им. М.В. Хруничева—прикладные системы для космической техники.

Вышеперечисленные предприятия создают реальную рыночную базу для реализации модулей ОВС.

### 8.2.1 Стоимостные характеристики суперкомпьютеров, создаваемых по Программе

Планируемые к разработке по Программе базовые модели суперкомпьютеров выгодно отличаются от зарубежных аналогов по своим стоимостным характеристикам. Например, базовые модели кластерного уровня (см. Раздел "5.1 Тактико-технические характеристики базовых моделей кластерного уровня суперкомпьютера") суперкомпьютера имеют следующую себестоимость:

модель	теор. пик.	себестоимость	Экономический эффект (экономия на каждом экземпляре, по сравнению с закупкой изделий класса Sequent NUMA-Q-2000 с подобными ТТХ)
ТКС-12	12.8 GFlops	\$360,000	\$5,340,000
ТКС-50	51.2 GFlops	\$1,584,000	\$21,216,000
ТКС-100	102.4 GFlops	\$3,456,000	\$42,144,000

Тем самым базовые модели кластерного уровня дешевле зарубежных суперкомпьютеров, имеющих близкие к данным моделям уровни производительности, более чем на порядок—от 10 до 30 раз. Отметим так же отличные значения показателя "стоимость/производительность" для данных моделей: от \$29,000/GFlops до \$34,000/GFlops.

Для модулей ОВС показатель "стоимость/производительность" даже лучше, чем у модулей кластерного уровня:

модель (теор. пик)	себестоимость	стоимость/производительность
ОВС-100Gfps	\$55,000	\$550
ОВС-1Tfps	\$450,000	\$450

Тем самым, включение в состав суперкомпьютера модулей ОВС дополнительно увеличивает экономический эффект от реализации суперкомпьютерной системы.

### 8.2.2 Области потенциального применения разрабатываемых систем

Основными планируемыми потребителями различных моделей суперкомпьютерных систем, разрабатываемых по Программе СКИБР и прикладных систем на их основе являются:

- Конструкторские бюро различных уровней и конструкторские отделы крупных предприятий:
  - различных отраслей машиностроения;
  - авиакосмической промышленности;
  - двигателестроения;
  - электронной промышленности;
  - производителей средств вычислительной техники;
  - и т. д.,
 а также научные учреждения и организации, ведущие прикладные исследования в данных областях;
- Предприятия-производители технических средств геологоразведки;

- Научно-исследовательские отделы крупных фармацевтических предприятий и объединений, а также научно-исследовательские институты, ведущие исследования методов синтеза новых лекарственных препаратов;
- Научно-исследовательские отделы крупнейших предприятий и объединений химической промышленности, а также научные учреждения, ведущие исследования в направлении поиска новых методов синтеза различных химических соединений, а также новых веществ с заданными свойствами;
- Крупные клиники и лечебно-диагностические центры;
- Научные учреждения, ведущие исследования в таких наукоемких областях, как термоядерный синтез, разработка различных типов ускорителей (в том числе промышленных), новые методы обработки материалов и т.д.;
- Научные учреждения, ведущие активные исследования в области генетики (в том числе генетики человека);
- Крупные нефте- и газодобывающие компании и другие предприятия и объединения, ведущие разведку различных полезных ископаемых;
- Различные предприятия оборонного комплекса;
- Организации, обеспечивающие национальную безопасность;
- Государственные органы управления различного уровня и крупные частные аналитико-консультативные компании.

## 9. Список дополнительных материалов

### **Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта**

*Данные рабочие материалы разработаны российскими и белорусскими специалистами в ходе выполнения пунктов 1 и 2 «Плана исследований и разработок первого этапа реализации Проекта “СуперКомпьютерная Инициатива Беларуси и России” (Проект СКИБР)», утвержденного Президентом НАН Беларуси академиком А.П. Войтовичем 14 июля 1998 года (копия Плана была ранее предоставлена Миннауке РФ).*

**Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко Т-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ//Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.**

**Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.**

**Приложение 4. Однородные вычислительный среды (МиниТера). Техническое описание**

**Приложение 5. Программно-аппаратные средства программы ASCII. Аналитическая записка**

**Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера “Мультикон”**





# ООО “Суперкомпьютерные Системы”

## Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера “Мультикон”

Москва

30 октября 1998г.

**I. Цель испытаний.** Лабораторные испытания макетного образца суперкомпьютера “Мультикон” проводились с целью определения производительности на тестовых задачах и определения соотношения реальной производительности суперкомпьютера “Мультикон”, его пиковой производительности и производительности процессора “PENTIUM-II 300”.

**II. Набор тестов.** В ходе испытаний решались следующие задачи:

1. **Задача вычисления быстрого преобразования Фурье**, относящаяся к области цифровой обработки сигналов. Данный тест позволяет оценить быстродействие процессора при решении вычислительных задач.
2. **Задача вычисления и графического отображения множества Жюлиа**, относящаяся к фрактальной геометрии. Данный тест позволяет оценить интегральное быстродействие процессора и системы графического вывода при решении вычислительных задач и одновременном выводе сложных изображений.
3. **Задача восстановления исходного изображения**, “замусоренного” импульсными помехами. Задача относится к области обработки изображений и передачи информации по каналам связи. Данный тест позволяет оценить интегральное быстродействие процессора и системы графического вывода при решении вычислительных задач и одновременном выводе сложных изображений.

**III. Используемое оборудование.** В состав оборудования входили:

- Компьютер “PENTIUM-II 300” в стандартной комплектации.
- Макетный образец суперкомпьютера “Мультикон”, состоящий из четырех блоков, каждый из которых содержит 23040 процессоров ОВС, работающих на тактовой частоте 5 МГц.
- SVGA-монитор для отображения информации, выдаваемой с макетного образца “Мультикон” в процессе тестирования.
- Компьютер “PENTIUM 133” в стандартной комплектации, связанный с макетом “Мультикон” через параллельный порт и используемый как рабочее место оператора макета “Мультикон”.

**IV. Методика выполнения тестов.** Так как обмен с внешними устройствами “Мультикон” выполняет с использованием собственной буферной памяти, то перед выполнением каждого из тестов исходные данные, подготовленные на рабочем месте оператора записывались в буфер макета “Мультикон”, а затем выполнялся тест.

**V. Результаты испытаний.**

### *1). Задача вычисления быстрого преобразования Фурье*

Исходные данные были представлены в виде набора массивов, объединенных в пакет. Пакет обрабатывался на макете “Мультикон” и на компьютере “PENTIUM-II 300”. Время оценивалось с помощью внутреннего таймера компьютеров. Ниже приведены параметры, относящиеся к обработке одного массива, состоящего из 256 отсчетов разрядностью 32 бита:

Число вычисляемых операций "бабочка"	1024
Число вычисляемых операций сложения/вычитания	5248
Число вычисляемых операций умножения	2304

Число отсчетов в массиве—256 шт.  
 Количество массивов в пакете—64 шт.  
 Число отсчетов в пакете—16384 шт.

Программа для "Мультикон" была реализована на одном блоке. В результате эксперимента получено:

Параметр	"PENTIUM-II 300"	"Мультикон"
Время обработки пакета	158 мс	26 мс
Число массивов, обработанных в секунду	405 шт.	2444 шт.
Время обработки массива	2464 мкс	409 мкс

То есть на данном тесте быстродействие макета "Мультикон" больше в 6 раз, чем производительность компьютера "PENTIUM-II 300".

Так как для решения были использованы 25% процессоров ОВС макета "Мультикон", то суммарное быстродействие всего макета—в 24 раза выше, чем у компьютера "PENTIUM-II 300" (для которого быстродействие оценивается в 300 млн. команд в секунду).

*Таким образом пиковое быстродействие 4-х блочного макетного образца суперкомпьютера "Мультикон" для данного теста оценивается в 7,2 млрд. команд/сек.*

## 2). Задача вычисления и графического отображения множества Жюлиа.

Исходные данные были представлены в виде набора комплексных констант, объединенных в массив для расчета и вывода 13 кадров и записывались в буфер макета "Мультикон". Ниже приведены параметры, относящиеся к обработке одного массива:

Программа для "Мультикон" была реализована на одном блоке. В результате эксперимента получено:

Параметр	"PENTIUM-II 300"	"Мультикон"
Время обработки и отрисовки 13 кадров	73 сек	17 сек
Время обработки и отрисовки 1 кадра	5,6 сек	1,3 сек

То есть на данном тесте быстродействие макета "Мультикон" больше в 4,3 раза, чем производительность компьютера "PENTIUM-II 300".

Так как для решения были использованы 25% процессоров ОВС макета "Мультикон", то суммарное быстродействие всего макета—в 17 раз выше, чем у компьютера "PENTIUM-II 300".

*Таким образом пиковое быстродействие 4-х блочного макетного образца суперкомпьютера "Мультикон" для данного теста оценивается в 5,1 млрд. команд/сек.*

## 3). Задача восстановления исходного изображения

Программа для "Мультикон" была реализована на 5400 процессорах ОВС одного блока. В результате эксперимента получено:

Параметр	"PENTIUM-II 300"	"Мультикон"
Время обработки и отрисовки 1 кадра	1 сек	0,1 сек

То есть на данном тесте быстродействие макета "Мультикон" больше в 10 раз, чем производительность компьютера "PENTIUM-II 300".

Так как для решения были использованы 6% процессоров ОВС макета “Мультикон”, то суммарное быстродействие всего макета—в 160 раз выше, чем у компьютера “PENTIUM-II 300”.

*Таким образом пиковое быстродействие 4-х блочного макетного образца суперкомпьютера “Мультикон” для данного теста оценивается в 48 млрд. команд/сек.*

### **III. Заключение.**

Результаты проведенных испытаний показали, что реальная производительность одного блока макетного образца суперкомпьютера “Мультикон” на тестовых задачах в 4-10 раз выше чем у “PENTIUM-II 300”. Приведенное пиковое быстродействие 4-х блочного макетного образца на отдельных задачах может превышать быстродействие “PENTIUM-II 300” в десятки раз.

Реализация суперкомпьютера “Мультикон” на современной элементной базе (отечественная К-МОП 1,2 мкм бескорпусной сборки или зарубежная К-МОП 0,35-0,5 мкм) даст возможность обеспечить изделия, выпускаемые в ряде отраслей, быстродействующими встраиваемыми вычислительными средствами.

Результаты испытаний подтверждаются комиссией, в состав которой входили:

**От ООО «Суперкомпьютерные системы»**

Геворкян Виктор Иванович \_\_\_\_\_  
Зам. Директора, к.т.н.

**От Московского энергетического института**

Потемкин Игорь Семенович \_\_\_\_\_  
Профессор, к.т.н.

**От Института программных систем, РАН**

Абрамов Сергей Михайлович \_\_\_\_\_  
Директор ИЦМС, д.ф.-м.н.

**От НИИ Приборостроения**

Циркин Виктор Васильевич \_\_\_\_\_  
Нач. лаборатории



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

152140, Россия, Ярославская область, Переславль-Залесский, ИПС РАН  
Тел/Факс: +7(08535)20593 e-mail: alfred@botik.ru

от 24/12/1998 № 11609/8117-351  
на № РЛС10-35/1038 от 15/12/1998

Дополнительные материалы по программе  
СКИБР

Заместителю министра  
науки и технологий  
Российской Федерации

В.В. Ничкову

*Глубокоуважаемый Владислав Власович!*

В соответствии с Вашим письмом № РЛС10-35/1038 от 15/12/1998 направляем Вам дополнительные материалы по Программе СКИБР (приложены к письму).

Основу передаваемых материалов составляют:

- Подготовленный ИПС РАН и предприятием СКС документ—“*Белорусско-российская совместная программа по созданию высокопроизводительных вычислительных систем и приложений на их основе Описание Программы СКИБР*” и
- “*Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта*”—данные рабочие материалы разработаны российскими и белорусскими специалистами в ходе выполнения пунктов 1 и 2 «Плана исследований и разработок первого этапа реализации Проекта “СуперКомпьютерная Инициатива Беларуси и России” (Проект СКИБР)», утвержденного Президентом НАН Беларуси академиком А.П. Войтовичем 14 июля 1998 года (копия Плана была ранее предоставлена Миннауке РФ).. Материалы посвящены исследованию проблемы, исследованию задела российских участников, обоснованию работ и т.п.

Остальные приложения посвящены более полному описанию технических аспектов программы. В совокупности передаваемые материалы содержат ответы на все заданные сегодня Министерством науки и технологии Российской Федерации вопросы:

	<b>Разделы основного документа</b>	<b>Дополнения (разделы) из Приложения 1</b>
Финансовое обеспечение Программы	7.3 и 8.1	4.3, 4.6 и 6
Заказчики, потенциальные потребители результатов Программы и обоснование потребностей в разрабатываемых СуперЭВМ	1, 3, 3.2, 8.2 и 8.2.2	5
Технические и эксплуатационные параметры разрабатываемых СуперЭВМ	5, 5.1 и 5.2	2 и 3
Сравнительная характеристика разрабатываемых СуперЭВМ с зарубежными аналогами и с российскими разработками	3.1, 4.2.1.5, 4.2.4, 4.2.5 и 4.3.1.7	1 и 3
Вопросы защиты интеллектуальной собственности	7.1.2.2, 7.2.2.2 и 7.2.2.1	3

Мы надеемся, что передаваемые материалы содержат достаточно полное описание Программы СКИБР, однако, при необходимости, мы с радостью предоставим Министерству науки и технологии Российской Федерации любую дополнительную информацию.

Список передаваемых материалов—на отдельном листе данного письма.

С искренним уважением и надеждой на плодотворное сотрудничество,

Директор Института,  
профессор

А.К. Айламазян

**Список передаваемых материалов  
по письму ИПС  
от 24/12/1998 № 11609/8117-351**

№№	Наименование	Примечание
1	Белорусско-российская совместная программа по созданию высокопроизводительных вычислительных систем и приложений на их основе Описание Программы СКИБР	64 стр. 1 экз.
2	«Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта»	30 стр. 1 экз.
3	Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко <i>T-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ</i> //Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.	11 стр. 1 экз.
4	Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.	38 стр. 1 экз.
5	Приложение 4. Однородные вычислительные среды (МиниТера). Техническое описание	36 стр. 1 экз.
6	Приложение 5. Программно-аппаратные средства программы ASCI. Аналитическая записка	2 стр. 1 экз.
7	Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера "Мультикон"	3 стр. 1 экз.
	ВСЕГО:	184 стр.

ИСПОЛНИТЕЛЬ:

Директор Исследовательского центра  
мультимикропроцессорных систем ИПС РАН  
д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
С.М. Абрамов  
25 декабря 1998 г.



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

152140, Россия, Ярославская область, Переславль-Залесский, ИПС РАН  
Тел/Факс: +7(08535)20593 e-mail: alfred@botik.ru

от 24/12/1998 № 11609/8117-350  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Дополнительные материалы по программе  
СКИБР

Первому заместителю  
Министра науки и технологий  
Российской Федерации,  
статс-секретарю

Г.Ф. Терещенко

*Глубокоуважаемый Геннадий Федорович!*

В дополнение к ранее переданным материалам по программе СКИБР, в соответствии с запросом сотрудников Министерства науки и технологий (Мостинской Светланы Владимировны, отдел Перспективных исследований) направляем Вам дополнительные материалы по Программе СКИБР (приложены к письму).

Основу передаваемых материалов составляют:

- Подготовленный ИПС РАН и предприятием СКС документ—“*Белорусско-российская совместная программа по созданию высокопроизводительных вычислительных систем и приложений на их основе Описание Программы СКИБР*” и
- “*Приложение 1. Приложение 7. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта*”—данные рабочие материалы разработаны российскими и белорусскими специалистами в ходе выполнения пунктов 1 и 2 «Плана исследований и разработок первого этапа реализации Проекта “Супер-Компьютерная Инициатива Беларуси и России” (Проект СКИБР)», утвержденного Президентом НАН Беларуси академиком А.П. Войтовичем 14 июля 1998 года (копия Плана была ранее предоставлена Миннауке РФ). Материалы посвящены исследованию проблемы, исследованию задела российских участников, обоснованию работ и т.п.

Остальные приложения посвящены более полному описанию технических аспектов программы.

Мы надеемся, что в совокупности передаваемые материалы содержат достаточно полное описание Программы СКИБР, однако, при необходимости, мы с радостью предоставим Министерству науки и технологии Российской Федерации любую дополнительную информацию.

Список передаваемых материалов—на отдельном листе данного письма.

С искренним уважением и надеждой на плодотворное сотрудничество,

Директор Института,  
профессор

А.К. Айламазян

**Список передаваемых материалов  
по письму ИПС  
от 24/12/1998 № 11609/8117-350**

№№	Наименование	Примечание
1	Белорусско-российская совместная программа по созданию высокопроизводительных вычислительных систем и приложений на их основе Описание Программы СКИБР	64 стр. 1 экз.
2	Приложение 1. Рабочие материалы. К обоснованию белорусско-российской комплексной Программы реализации Проекта	30 стр. 1 экз.
3	Приложение 2. Оттиск статьи: С. М. Абрамов, А. И. Адамович, М. Р. Коваленко <i>T-система—среда программирования с поддержкой автоматического динамического распараллеливания программ</i> //Принята к публикации: журнале Программирование № 2, 1999 г.	11 стр. 1 экз.
4	Приложение 3. Подборка статей по проекту ИПС РАН "Т-система", принятых к печати в Юбилейный сборник трудов Института программных систем, под ред. проф. В.И. Гурмана, Переславль-Залесский, ИПС РАН, 1999 г.	38 стр. 1 экз.
5	Приложение 4. Однородные вычислительные среды (МиниТера). Техническое описание	36 стр. 1 экз.
6	Приложение 5. Программно-аппаратные средства программы ASCI. Аналитическая записка	2 стр. 1 экз.
7	Приложение 6. Протокол лабораторных испытаний макетного образца суперкомпьютера "Мультикон"	3 стр. 1 экз.
	ВСЕГО:	184 стр.

ИСПОЛНИТЕЛЬ:

Директор Исследовательского центра  
мультимикропроцессорных систем ИПС РАН  
д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
С.М. Абрамов  
25 декабря 1998 г.