

На правах рукописи

СУВОРОВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

**Параллельные устройства вычислительной  
техники класса  
"системы-на-кристалле"**

*Специальность 05.13.05. Элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления*

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2004

Диссертация выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
Государственный Университет Аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель:

д.т.н., доцент Шейнин Юрий Евгеньевич

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Лыпарь Юрий Иванович

к.т.н., доцент Михайлуца Константин Тимофеевич

Ведущая организация

Московский институт электронной техники (Технический университет)

Защита состоится 17 июня 2004 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного  
совета Д212.229.18 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
Государственный Политехнический университет», по адресу: 195251, г.  
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, 9 уч. корп., 325 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-  
Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан 14 мая 2004 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета \_\_\_\_\_ /Шашихин В. Н./

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

Развитие новых технологий открывает новые перспективы перед разработчиками вычислительных устройств (ВУ). Активно развиваемым направлением создания ВУ являются системы-на-кристалле (СнК) (L. Hammond, K. Olukotun, T.N. Theis, V. Cordan, J. Udell, Берски Д.). В результате быстрого развития интегральных технологий на одном кристалле становится возможным размещать параллельные вычислительные структуры (ПВС).

Параллельные вычислительные структуры являются перспективным направлением повышения производительности ВС. Отечественные и зарубежные научные школы в течение нескольких десятилетий исследовали проблемы, возникающие при проектировании структур ПВС и предложили пути их решения. Многие научные результаты в области параллельных структур, составившие основу построения и определившие облик современных высокопроизводительных средств вычислительной техники, были получены отечественными учеными: Б.А. Бабаяном, В.С. Бурцевым, В.М. Глушковым, Б.А. Головкиным, Э.В. Евреиновым, М.Б. Игнатьевым, А.В. Каляевым, В.В. Корнеевым, В.К. Левиным, И.В. Прангишвили, В.А. Торгашевым, Я.И. Хетагуровым, В.Г. Хорошевским, и др.

Однако, технологии СнК существенно отличаются от технологий создания систем на платах: появляются как новые возможности, так и новые ограничения. ПСнК представляют собой новый, достаточно специфический класс параллельных устройств вычислительной техники. Специфика технологии реализации СнК заставляет заново оценивать и пересматривать, дополнять сложившиеся методы и критерии проектирования параллельных ВС для применения их к разработке ПСнК.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка методов построения параллельных устройств вычислительной техники как систем-на-кристалле - многомодульных систем на базе повторно используемых компонентов.

## **Методы выполнения исследования**

Исследования осуществлялись на основе аппарата теории графов, теории вероятности, теории систем массового обслуживания и теории вычислительных систем. Для построения математических и имитационных моделей были использованы пакет Maple 7.0 и среда имитационного моделирования GPSS H3. Для реализации предложенной методики построения СнК были использованы язык VHDL, САПР Orcad 9.1 и Foundation Express.

## **Научная новизна**

1. Предложена двухуровневая архитектура параллельных вычислительных устройств в исполнении «система-на-кристалле», включающая: 1) уровень синтезируемых параллельных структур из IP-узлов – функционально полных компонентов параллельных вычислительных структур. 2) уровень IP-узлов, синтезируемых из готовых IP-блоков традиционных типов (процессорные ядра, контроллеры, блоки памяти и др.).

2. Предложен набор показателей топологии связей в параллельных вычислительных структурах, реализуемых в технологии «система-на-кристалле», и базирующаяся на нем методика оценки возможности и эффективности использования топологий систем связей в ПСнК.

3. Поставлена проблема и разработана методика выбора узлов для организации внешних связей в структуре параллельных вычислительных устройств – СнК.

4. Предложена методика самоорганизующегося формирования работоспособной конфигурации параллельных вычислительных устройств в условиях отказов их узлов. Разработан децентрализованный алгоритм с коллегиальным принятием решений узлами параллельной структуры, определены и доказаны условия его сходимости.

5. Разработаны математические модели системы коммуникаций внутри IP-узла, на базе которых разработана методика синтеза системы связей между IP-блоками.

## **Практическая ценность**

1. Разработаны методики построения ПСнК как многомодульных систем

на базе повторно используемых компонентов

2. Разработана методика спецификации на языках высокого уровня синтезируемых ПСнК с заданными характеристиками.

3. Разработана методика спецификации на языках высокого уровня синтезируемых повторно используемых IP-узлов с заданными характеристиками для построения ПСнК.

4. Разработана методика спецификации на языках высокого уровня синтезируемых интерфейсных компонентов IP-блоков для адаптации к различным стандартам интерфейсов в структуре узла ПСнК

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7 международных, всероссийских и региональных конференциях, симпозиумах и семинарах. Экспериментальные реализации предложенных в диссертационной работе методов организации параллельных вычислительных структур оценивались и принимались межведомственными комиссиями в составе результатов научно-исследовательских работ.

**Публикации.** Результаты, полученные в диссертации, нашли отражение в 14 опубликованных научных работах по теме диссертации, в том числе 1 монография (в соавторстве), 7 программных продуктов, зарегистрированных в Госфонде алгоритмов и программ РФ.

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы использованы в ОАО НИИ Системотехники (г. С.-Петербург), в ГУП НТЦ «Элвис» (г. Москва).

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 152 страницы машинописного текста, 77 рисунков, 12 таблиц. Объем приложений 51 страниц. Перечень литературных источников содержит 82 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первом разделе** дан обзор тенденций развития интегральной технологии и рассмотрено ее влияние на организацию вычислительных средств.

В соответствии с современными тенденциями развития интегральных

технологий в ближайшем будущем на кристалле станет возможным размещать ПВС, содержащие сотни вычислительных узлов. Современная СнК должна обеспечивать параллельное выполнение множества процессов, высокую производительность и высокую надежность вычислений, должна быть легко масштабируема. Показано, что необходимость развития ПСнК по пути систем с распределенной структурой диктуется особенностями интегральной технологии. В результате масштабирования рисунков схем задержки сигнала в элементах уменьшаются быстрее, чем в линиях связи, что приводит к возникновению проблемы «длинных линий» для решения которой используются GALS архитектуры. Использование САПР позволяет переносить готовые модули, получившие название виртуальных компонентов (VC – Virtual component, IP – Intellectual Property) из ранее разработанных устройств в новые.

В построении ПСнК как масштабируемой распределенной вычислительной структуры, в методологии их проектирования, предложено использовать два уровня виртуальных компонентов – IP-узлы и IP-блоки. Основным функциональным компонентом ПСнК является вычислительный узел в целом – узел распределенной структуры параллельной ВС – IP-узел. IP-узлы могут быть не только параметрически настраиваемы, но и синтезируемы как компонуемые из виртуальных компонентов другого уровня – из IP-блоков – процессорных ядер, блоков памяти, контроллеров интерфейсов, и др., которые могут быть использованы для построения IP-узлов. При проектировании на базе IP-блоков разработчик получает возможность сконцентрироваться на характеристиках IP-узла, при проектировании системы на базе IP-узлов разработчик получает возможность сконцентрироваться на характеристиках системы в целом.

Определено влияние особенностей технологии на проектирование СнК на базе IP-узлов, показана необходимость пересмотра набора показателей графов связей узлов параллельных вычислительных структур для оценки возможности и эффективности их использования для ПСнК. Сформулирована проблема размещения множества внешних узлов в ПСнК. Определены требования к методам самотестирования и формирования работоспособной конфигурации

ПСнК. Определено влияние особенностей технологии на структуру вычислительных узлов – IP-узлов ПСнК, на методы их организации из IP-блоков, методы проектирования системы коммуникаций в структуре вычислительного узла.

**Во втором разделе** рассмотрены особенности проектирования СнК на базе IP-узлов как готовых виртуальных компонентов. Граф связей, соответствующий топологии ПСнК, рассматривается на структурном уровне и уровне рисунка схемы.

На структурном уровне наряду с традиционными характеристиками систем связей ПВС (количество ребер и вершин графа связей, валентность вершин, диаметр графа связей), для ПСнК предложено использовать «книжную» толщину графа связей. (В отличие от классической, книжная толщина более точно отражает особенности технологии – возможность перехода линий связи из слоя в слой.) Она позволяет определить минимальное количество слоев металлизации для размещения связей между узлами ПВС и оценить возможность использования топологии при конкретной технологии реализации ПСнК. Для оценки времени передачи сообщений между узлами внутри ПСнК на структурном уровне используется средний диаметр графа связей.

Для предварительной оценки рисунка схемы (design schematic) кристалла широко используется модель Томпсона. Однако до этапа синтеза не возможно учесть ряд факторов, необходимых для корректного использования классической или трехмерной модели Томпсона. Для оценки длины линий связи и количества переходов линий связи из слоя в слой на этапе выбора графа связей узлов в ПСнК в работе предложена модель условных линий связи. Если для используемой технологии длина линий связи особенно критична, предложено использовать дополнительный параметр – максимальную длину условных линий связи. Для оценки сложности на уровне рисунка схемы предложено использовать следующий набор характеристик: количество слоев металлизации, необходимое для размещения рисунка схемы, суммарная длина условных линий связи, максимальная длина условных линий связи, суммарное количество переходов линий связи из слоя в слой.

В соответствии с определенной системой критериев и параметров разработана методика, позволяющую выбрать топологию связей вычислительных узлов ПСнК и рисунок схемы в соответствии с требованиями, предъявляемыми разработчиком:

1) Определение толщины рассматриваемых графов связей узлов ПСнК и выбор пригодных с технологической точки зрения.

2) Построение рисунков схем для отобранных в соответствии с пунктом 1 топологий. Вычисление для них критериев сложности, на базе которых определяется возможность реализации этих рисунков по выбранной технологии.

3) Определение среднего диаметра графа связей для выбранных в соответствии с пунктом 2 топологий.

4) Выбор множества внешних узлов.

С использованием этой методики в работе проведен анализ возможностей применения в ПСнК основных топологий связей, используемых в ПВС: двумерная и трехмерная решетка, тор, гиперкуб. Рассмотрено влияние на характеристики рисунков схем различных подходов к формированию рисунков схем связей на кристалле: чередование узлов, кластеризация. Предложены варианты формирования рисунков схем на базе трехмерной решетки и тора с использованием метода чередования, позволяющие сократить среднюю и максимальную длину линий связей, количество переходов линий из слоя в слой.

*Таблица 1. Зависимость характеристик рисунков схем от методов их формирования*

	Трехмерная решетка		Тор		Гиперкуб ( $2^n$ )	
	Без чередования (1)	С чередованием (2)	Без чередования (1)	С чередованием (2)	Кластер $2^2$ (1)	Кластер $2^4$ (2)
1. Суммарная длина линий связи	Меньше на 10 – 12%	Линейно зависит от числа IP-узлов	ОДИНАКОВА		ОДИНАКОВА	
2. Максимальная длина линий связи	ОДИНАКОВА		Растет с ростом числа узлов. Сравнима с размерами кристалла	Фиксированная ( $2 \cdot h = \text{const}$ ). Не зависит от числа узлов.	Линейная зависимость от числа узлов	Больше в 1,5 раза
3. Количество переходов из слоя в слой	Линейная зависимость от числа узлов	Меньше в 2 раза	Линейная зависимость от числа узлов	$O(n^2)$	Больше в $2^n$ раз	$O(n^2)$



Таблица 2. Реализация рисунков схем с учетом ограничений технологии (числа слоев линий связи, числа переходов)

	Двумерная решетка (MxN)	Трехмерная решетка (MxNxL)	Тор (MxN)	Гиперкуб ( $2^n$ )
1. 1 слой для прокладки линий связи	Без ограничений	Реализуема при условиях: $M=N=2$ или $M=L=2$ или $N=L=2$	Реализуема при условиях: $M=2$ или $N=2$	Реализуема при $n < 4$ ( $V=2^3=8$ )
2. Линии связи прокладываются в активных слоях (3 слоя) без переходов из слоя в слой	Без ограничений	Реализуема при условиях: $M=2$ или $N=2$ или $L=2$	Без ограничений	Реализуема при $n < 5$ ( $V=2^4=16$ )

Сформулирована проблема размещения внешних узлов ПСнК не имеющая аналогов в традиционных ПВС. Разработан алгоритм размещения внешних узлов в графе связей ПСнК. Сформулировано и доказано, что время доступа к информации за пределами кристалла, зависит от среднего расстояния до внешних узлов и распределения потоков между внешними узлами и не во всех случаях множество внешних узлов можно выбрать таким образом, чтобы интенсивности потоков заявок через все внешние узлы были одинаковы. Введены дополнительные характеристики: среднее расстояние до внешних узлов и максимальное отклонение количества узлов, подключенных к одному внешнему от среднего.

Разработан математический аппарат, позволяющий разработчику в соответствии с требованиями к системе определить размещение внешних узлов в топологии системы. Формулировка задачи поиска множества внешних узлов ПСнК сходна с формулировкой задачи кратных медиан (P–медиан) графа, которая используется для решения так называемых минисумных задач размещения. Однако в задаче выбора множества внешних узлов основным является критерий равномерности распределения потоков заявок к внешней среде между внешними узлами. В соответствии с этим разработан алгоритм размещения множества внешних узлов в произвольных графах связей. Выполнена оценка алгоритма, показавшая его разумную сложность и преимущество по сравнению с полным перебором.

Исследована проблема определения работоспособной конфигурации ПСнК в ходе ее самоинициализации. Методика самотестирования ПСнК должна

учитывать распределенность структуры, масштабируемость, не должна зависеть от топологии связей. Существующие централизованные алгоритмы не пригодны для ПСнК; распределенные алгоритмы, такие, как, SELF и производные от него алгоритмы, DSD ориентированные на использование в распределенных мультикомпьютерных системах, основаны на сравнении сигнатуры с достоверно правильным эталоном, что не приемлемо для ПСнК.

Разработан алгоритм распределенного самотестирования ПСнК, выполняющийся на этапе инициализации системы. Алгоритм выполняется в каждом из узлов. На этапе 0 выполняется самотестирование каждого узла и выработка сигнатуры. На этапе 1 узел определяет множество исправных связей с соседними узлами. На этапе 2 узел получает от соседних с ним узлов сигнатуры, которые были получены ими на этапе самотестирования. На базе сравнения собственной сигнатуры узла и сигнатур соседних узлов определяется условно правильная сигнатура на этапе 2. На этапе 3 (последующие этапы аналогичны ему) узел получает от соседних узлов условно правильные сигнатуры, определенные ими на предыдущем этапе, и определяет новую условно правильную сигнатуру. По завершении выполнения алгоритма узел определяет множество соседних узлов, чья сигнатура совпала с условно правильной, полученной им на последнем этапе. Их он считает исправными. В дальнейшем он взаимодействует только с ними. В результате формируется работоспособная конфигурация ПСнК, из которой исключены узлы, признанные неисправными.

Построена математическая модель алгоритма. Система характеризуется  $M$  – множеством сигнатур ( $v_i$  – сигнатура с номером  $i$  из данного множества,  $v_1$  – правильная сигнатура), вектором вероятностей  $P$  ( $P_{v_1}$  – вероятность получения сигнатуры  $v_1$ ),  $F_{pv_i}$  – функция вероятности принятия сигнатуры  $v_i$  в качестве правильной. На уровне системы сходимость алгоритма выражается в том, что на каждом шаге количество узлов, признавших в качестве условно правильной сигнатуру, соответствующую работоспособному состоянию узла, увеличивается. Сформулирована и доказана теорема, определяющая необходимое и достаточное условие сходимости алгоритма:

**Теорема.** Алгоритм является сходящимся, при условии, что  $F_{pv1}$  является монотонно возрастающей и  $\forall v_i \in M, v_i \neq v_1, F_{pv_i} < F_{pv_1}$  тогда и только тогда, когда  $\forall v_i \in M, v_i \neq v_1, P_{v_i} < P_{v_1}$

Математическая модель позволяет также определить количество этапов алгоритма, необходимое для того, чтобы узлы с заданной вероятностью определили сигнатуру, соответствующую работоспособному состоянию узла. Максимальное количество этапов равно диаметру графа связей +2 (самотестирование и проверка связей с соседними узлами). На рисунке 1 приведен пример, иллюстрирующий процесс схождения алгоритма в топологии типа двумерная решетка или тор при  $P=[0.5, 0.3, 0.1, 0.1]$  (здесь на 1 этапе  $P_{v_1}=0.5$ ). К шестому этапу  $P_{v_1}$  достигает 0.992.

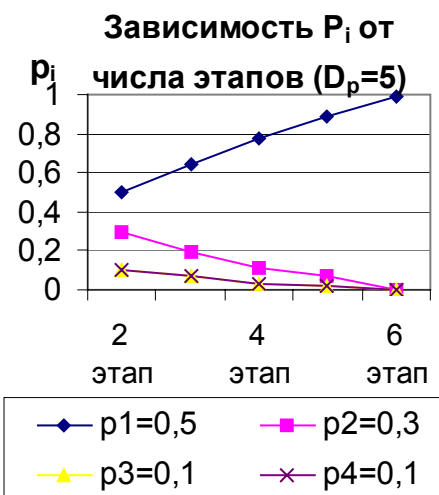


Рисунок 1 - Процесс схождения алгоритма

Показано, что с ростом количества узлов, на базе сигнатур которых принимается решение, вероятность выбора правильной сигнатуры имеет тенденцию к возрастанию.

Рассмотрено поведение алгоритма в ПСнК с кластеризацией отказов. Предложены способы обмена информацией между узлами, позволяющие увеличить скорость схождения алгоритма при наличии кластеризации отказов за счет передачи более подробной информации о системе.

**В третьем разделе** рассмотрена структура IP-узлов для построения ПСнК. Эффективность функционирования IP-узла сильно зависит от организации коммуникационной системы внутри него. Традиционные шины, организованные по схеме с тремя состояниями, вследствие особенностей технологии не подходят для СнК, где используются шины, организованные по схеме с мультиплексированием. Наряду с системой коммуникаций на базе шины в IP-узлах могут использоваться коммуникации на базе коммутаторов.

Исследованы сходства и отличия распространенных стандартов внутрикристалльных систем коммуникаций: CoreFrame, VSIA, Marble, IPBus, PIBus, FISHPBus, Wishbone, CoreConnect, OCP, Triscend Bus Architecture, Silicon

BackPlane и AMBA.

Рассмотрены варианты построения системы коммуникаций на примере AMBA АНВ, получившего наибольшее распространение. Для оценки характеристик систем коммуникаций IP-узла на базе шины и коммутатора построены математические и имитационные модели. В данной работе для моделирования коммуникационных систем используются замкнутые стохастические сети, в которых заявки от каждого ведущего устройства выделены в отдельный тип. Это отражает особенности стандартов внутрикристальных шин, вследствие чего позволяет повысить точность получаемых результатов по сравнению с существующими моделями на базе разомкнутых сетей и замкнутых сетей с одним типом заявок.

Для оценки быстродействия коммуникационной системы используется время выполнения запроса -  $T_c$ . Оно складывается из времени ожидания предоставления канала коммуникационной системы -  $W$  и времени взаимодействия между ведущим и ведомым устройствами -  $T_s$  (в общем случае системе может быть сопоставлена матрица времен обслуживания  $\Psi_s$ ). Ведущие устройства могут быть охарактеризованы временем между завершением выполнения заявки и генерацией следующей -  $T_m$  (в общем случае системе может быть сопоставлен вектор  $\Psi_m$ ). Для оценки эффективности используется загрузка каналов коммуникационной системы, вычисляемая на базе интенсивностей потоков заявок через ведущие устройства -  $\lambda_m$  и через каналы -  $\lambda_s$  ( $\lambda$ , если в системе 1 канал).

Пример стохастической сети, используемой для моделирования коммутатора, представлен на рисунке 2. Модель системы включает в себя обслуживающие приборы, соответствующие ведущим устройствам и каналам между ведущими и ведомыми устройствами. Описание модели выполнено в форме системы уравнений, из которых выводятся параметры системы. Например, для системы на базе общей шины, включающей в себя 3 ведущих устройства:

$$\lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{((4 \cdot T_m + 4 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot T_s^3 + T_m^3}{T_m}}) \cdot T_m^2)^{1/3}}{T_m^2} - 2 \cdot \frac{T_s}{T_m \cdot ((4 \cdot T_m + 4 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot T_s^3 + T_m^3}{T_m}}) \cdot T_m^2)^{1/3}}$$

$$W = \frac{\frac{2}{3} \cdot (1 - \lambda \cdot T_m)^3 + \lambda \cdot T_m \cdot (1 - \lambda \cdot T_m)^2}{\lambda} \quad T_c = W + T_s.$$

Для системы на базе коммутатора включающей в себя 3 ведущих и 4 ведомых устройства:

$$\lambda_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{((8 \cdot T_m + 60 \cdot T_s + 4 \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{T_s(32 \cdot T_m^2 + 39 \cdot T_m \cdot T_s + 36 \cdot T_s^2)}{T_m}}) \cdot T_m^2)^{1/3}}{T_m^2} +$$

$$6 \cdot \frac{T_m - 3 \cdot T_s}{T_m \cdot ((8 \cdot T_m + 60 \cdot T_s + 4 \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{T_s(32 \cdot T_m^2 + 39 \cdot T_m \cdot T_s + 36 \cdot T_s^2)}{T_m}}) \cdot T_m^2)^{1/3}} - \frac{5}{T_m}$$

Время ожидания в очереди к каналу 1 – 3:  $W_s = \frac{1 \cdot (1 - \lambda_m \cdot T_m)^2}{6 \cdot \lambda_m}$ .

Время ожидания в очереди к каналу 4:

$$W_{s4} = \frac{2 \cdot (1 - \lambda_m \cdot T_m)^3 + 3 \cdot (1 - \lambda_m \cdot T_m)^2 \cdot (2 + \lambda_m \cdot T_m)}{27 \cdot \lambda_m} \quad T_c = 1/3 \cdot (2 \cdot W_s + W_{s4} + 3 \cdot T_s).$$

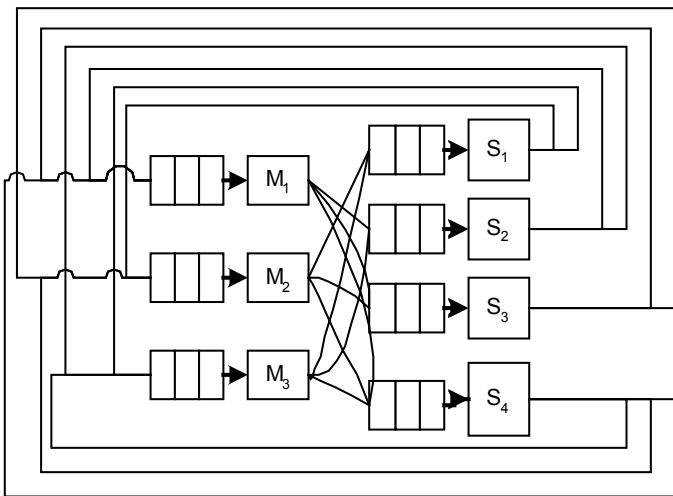


Рисунок 2 - Модель коммуникационной системы на базе коммутатора

Предложена методика теоретической оценки аппаратных затрат на реализацию коммуникационной системы на базе коммутатора в сопоставлении с шинными структурами. Аппаратные затраты на реализацию коммутатора могут быть оценены по следующей формуле:  $A_2 = N_s \cdot (2/3) \cdot A_1 + N_m \cdot (1/3) \cdot A_1$ , где  $A_1$  - аппаратные затраты на реализацию коммуникационной

системы на базе шины. Показана практическая приемлемость аппаратных затрат

на реализацию коммутатора в IP-узле. Например, при 5 ведущих, 6 ведомых устройствах они не превосходят 5% от аппаратных затрат на реализацию процессорного ядра LEON (SPARC V8.e). Примеры синтеза подтвердили теоретические расчеты по выведенной формуле (разница  $\leq 0,4\%$ ).

На основе математических моделей разработана методика выбора способа организации коммуникационной системы внутри IP-узла, определены параметры, задаваемые разработчиком при проектировании IP-узла. Они являются входными данными для разработанного программного обеспечения, позволяющего вычислить характеристики систем коммуникаций на базе общей шины и коммутатора. В соответствии с рассчитанными значениями и существующими требованиями это позволяет разработчику выбрать тип коммуникационной системы для IP-узла.

**В четвертом разделе** предложены методики описания IP-узлов, IP-блоков и ПСнК в целом как виртуальных компонентов на основе языка VHDL.

Предложена методика параметризованного описания интерфейса IP-узла, позволяющая сделать его повторно используемым в ПСнК с различной топологией связей между узлами. Интерфейс IP-узла характеризуется количеством и разрядностью линий связи. Входной и выходной порты IP-узла описываются как массивы, количество элементов которых определяется этими параметрами. Компонент контроллера межузловых связей имеет блочную структуру. Для генерации нужного количества блоков используется конструкция `for...generate`.

Предложена методика параметризованного описания на VHDL параллельного вычислительного устройства на базе IP-узлов. Устройство характеризуется типами и количеством IP-узлов, топологией связей между ними, множеством внешних узлов. В работе предложено использование функций для определения количества портов узлов, количества линий связи в системе, и функции, определяющей взаимно однозначные соответствия между портами узлов. Это позволяет менять топологию связей между узлами путем изменения параметров, не затрагивая внутреннего описания системы.

Структурное описание ПСнК представлено на рисунке 3. Оно включает в себя описание конкретных экземпляров компонентов с определением парамет-

ров и связей между ними на базе функций, определенных в декларативной части. Описание конкретных экземпляров компонентов может выглядеть следующим образом:

```
(type range1 is (2, 3, 4, 5); -- множество внутренних узлов
type rangeout1 is (1, 6); -- множество внешних узлов)
MODULEs_in: FOR I in range1'low to range1'high GENERATE -- секция
генерации множества внешних узлов
MODULEi_in: module_name
Generic_map (num_lines=fs(I));
port map (
i_port(1) => net_find( I,1,0 ), i_port(2) => net_find( I,2,0 ),
...);
end generate
MODULEs_out: FOR I in rangeout1'low to rangeout1'high GENERATE -- секция
генерации множества внешних узлов
MODULEi_out: module_name
Generic_map(num_lines=fs(I));
port map (
i_port(1) => net_find( I,1,0 ), i_port(2) => net_find( I,2,0 ),
...);
```



Рисунок 3 - Схема описания архитектуры ПСнК

Для генерации шаблона описания СнК разработана программа-генератор описания. В соответствии с особенностями стандартов внутрикристальных шин предложена методика разработки интерфейсного компонента IP-блока, позволяющая расширить возможность его повторной используемости. В интерфейсном компоненте предлагается выделить постоянную и переменную часть, последняя по-разному реализуется в

зависимости от конкретного стандарта. Набор компонентов, соответствующих переменным частям, включается в описание IP-блока с помощью секции IF... generate, что позволяет разработчику определять конкретный компонент, который будет включен в IP-блок.

Предложена методика параметризуемого описания коммуникационной системы между блоками внутри узла. Коммуникационная система определяется следующими параметрами: количеством подключаемых к ней блоков ведущих и

ведомых устройств, типом организации коммуникационной системы (на базе шины с мультиплексированием и на базе несимметричного коммутатора), стандартом коммуникационной системы, способами арбитража. Разработано разделение блока коммуникационной системы на подкомпоненты, позволяющее с использованием конструкций `for...generate` и `if...generate` осуществить параметризацию описания.

На базе исследований структуры СнК в целом и IP-узлов, сделанных во втором и третьем разделе, предложены методики описания ПВСнК базе готовых IP-узлов, описания IP-узла на базе готовых IP-блоков и описания повторно используемого IP-блока. В рамках этих методик определено множество параметров, задаваемых разработчиком при проектировании, последовательность действий, выполняемых разработчиком. Разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять предварительную оценку характеристик разрабатываемых систем и синтез шаблонов описаний систем на языке VHDL в соответствии с параметрами, рассчитанными в ходе выполнения предварительной оценки параметров. Это позволяет синтезировать повторно используемые IP-блоки, IP-узлы, СнК в целом.

**В приложениях к работе** приведены: программы теоретического расчета параметров коммуникационной системы на базе шины и на базе коммутатора; модели коммуникационных систем на GPSS; примеры описания СнК, IP-узлов, IP-блоков на VHDL.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Разработана методика оценки эффективности применения различных топологий связей для построения параллельных СнК, позволяющая оценить характеристики топологий на структурном уровне и на уровне рисунка схемы с учетом особенностей интегральной технологии.

2. Сформулирована проблема размещения множества внешних узлов в структуре параллельных СнК. Предложены критерии оценки качества выбора множества внешних узлов, разработан алгоритм размещения внешних узлов для произвольного графа связей при синтезе параллельных СнК.

3. Разработан децентрализованный алгоритм распределенного



самодиагностирования и формирования работоспособной конфигурации параллельной СнК с учетом особенностей технологии. Доказана сходимость алгоритма.

4. Разработан метод синтеза системы связей внутри IP-узла в соответствии с интенсивностями потоков данных между IP-блоками, реализующий выбор между использованием шины и коммутатора с учетом особенностей технологии.

5. Разработан метод спецификации на языке высокого уровня и синтеза параллельных СнК с заданными структурными характеристиками из готовых IP-узлов. Разработан метод спецификации на языке высокого уровня и синтеза IP-узлов для параллельных СнК.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Суворова Е. А., Шейнин Ю. Е.. Проектирование цифровых систем на VHDL., СПб., БХВ-Петербург, 2003 г., 576 с.
2. Суворова Е. А., Шейнин Ю. Е., Язык VHDL для проектирования систем на СБИС. Учебное пособие. СПб., РИО ГУАП, 2001 г., 212 с.
3. Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А. Архитектура вычислительного модуля для параллельных вычислительных систем на кристалле// Тез. докл. 5 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электроника и энергетика». М., 1999. С. 699-700.
4. Шейнин Ю. Е, Суворова Е. А. Архитектура вычислительного модуля для параллельных систем на кристалле// Тез. докл. всероссийской научно-технической конференции 25 Гагаринские чтения М., 1999 г. С. 336.
5. Суворова Е. А. Влияние организации систем-на-кристалле на архитектуру параллельных ВС// Тез. докл. 3-ей научной сессии аспирантов, докторантов и соискателей, апрель 2000 г.: Сборник/ СПб., РИО ГУАП, 2000 г. С. 191.
6. Суворова Е. А. Формирование работоспособной конфигурации при инициализации параллельной вычислительной системы-на-кристалле// Сборник ГУАП/ РИО ГУАП, 2000 г. С. 232-240.
7. Суворова Е. А. Специфика архитектуры систем-на-кристалле// Тез. докл. всероссийской научно-технической конференции 26 Гагаринские чтения М., 2000 г. С. 256.
8. Суворова Е.А. Особенности организации параллельных систем на кристалле, включающих в себя  $10^8$  -  $10^9$  транзисторов// Тез. докл. 5 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» Таганрог, сентябрь 2000 г. С. 212-213.
9. Суворова Е. А. Топология связей вычислительных модулей в параллельных системах на кристалле// Тез. докл. 7 ежегодной международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. МЭИ 2001 г. С. 304.
10. Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А. Организация межмодульных связей в параллельных вычислительных системах на кристалле// Тез. докл. 4 научная

- сессии аспирантов ГУАП. Санкт-Петербург, 2001 г/СПб. РИО ГУАП, 2001 г. С. 247.
11. Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А. Особенности организации модуля параллельной вычислительной системы на кристалле// Тез. докл. 5 научная сессии аспирантов ГУАП. Санкт-Петербург, 2002 г/СПб. РИО ГУАП, 2002 г. С. 432-435.
  12. Шейнин Ю. Е., Суворова Е. А. Организация связей с внешними каналами в параллельной вычислительной системе-на-кристалле// Тез. докл. 6 научная сессии аспирантов ГУАП. Санкт-Петербург, 2003 г/СПб. РИО ГУАП, 2003 г. С. 309-310.
  13. "MCFlight" – SOC based chipset with SpaceWire Links for Aerospace Applications/ Т. Solokhina, J. Petrichkovich, E. Suvorova, and others. International Space Wire Seminar 4 –5 November, 2003, pp 110-116.
  14. "MCFlight" - отечественное семейство СБИС с каналом SpaceWire для высокопроизводительных аэрокосмических систем обработки информации в реальном масштабе времени/ Т. В. Солохина, Я. Я. Петричкович, Е. А. Суворова, и др.// Труды третьего расширенного семинара "Использование методов искусственного интеллекта и высокопроизводительных вычислений в аэрокосмических исследованиях" 26-27 ноября 2003г. С. 110-116.
  15. Суворова Е. А. "Программа расчета количества шагов процесса определения работоспособной конфигурации параллельной системы-на-кристалле". / М.: 50200300205, 2003.
  16. Суворова Е. А. "Пакет программ расчета характеристик коммуникационных систем на базе коммутатора и на базе шины." / М.: ВНТИЦ, 50200300182, 2003.
  17. Суворова Е. А. "Пакет программ моделирования и синтеза блока коммуникаций на базе шины AMBA АНВ для систем-на-кристалле." / М.: ВНТИЦ, 50200200640, 2002.
  18. Суворова Е. А. "Пакет программ моделирования и синтеза блока коммуникаций на базе коммутатора с интерфейсом AMBA АНВ для систем-на-кристалле." / М.: ВНТИЦ, 50200200623, 2002.
  19. Суворова Е. А. "Программа формирования множества внешних модулей для параллельных систем-на-кристалле." / М.: ВНТИЦ, 50200300046, 2003.
  20. Суворова Е. А. "Программа генерации топологии связей между модулями параллельных систем-на-кристалле." / М.: ВНТИЦ, 50200300181, 2003.
  21. Суворова Е. А. "Программа моделирования процесса определения работоспособной конфигурации параллельной системы-на-кристалле." / М.: ВНТИЦ, 50200300179, 2003.

---

Формат 60×84 1/16 Бумага офсетная.

Печать офсетная. Тираж 100 экз. Заказ №

---

Отдел оперативной полиграфии

ГОУ ВПО «ГУАП»

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 67