

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени В. Н. КАРАЗИНА
Академия наук прикладной радиоэлектроники
(АН ПРЭ)

**Г. А. Поляков, С. И. Шматков,
Е. Г. Толстолужская, Д. А. Толстолужский**

**СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
ПРОЦЕССОВ В АДАПТИВНЫХ
ВРЕМЯПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Под редакцией академика АН ПРЭ,
профессора Г. А. Полякова

Харьков – 2012

УДК 004.272.43
ББК 32.97
П 49

Рецензенты:

В. С. Харченко – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета «ХАИ», заслуженный изобретатель Украины;

С. В. Листровой – доктор технических наук, профессор кафедры специализированных компьютерных систем Украинской государственной академии железнодорожного транспорта.

*Утверждено к печати решением Ученого совета
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина
(протокол № 9 от 23 сентября 2011 г.)*

Поляков Г. А.

П 49

Синтез и анализ параллельных процессов в адаптивных времяпараметризованных вычислительных системах / Г. А. Поляков, С. И. Шматков, Е. Г. Толстолужская, Д. А. Толстолужский : монография. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 672 с.

Монография посвящена изложению результатов обоснования принципов построения, разработки математического аппарата и методов формального синтеза и анализа времяпараметризованных параллельных программно-аппаратных процессов для перспективных параллельных вычислительных средств XXI века – Адаптивных Самоорганизующихся Вычислительных Систем и Распределенных Вычислительных Сетей. Рассматриваются концепции построения систем; методы параллельной обработки данных; аппарат пространственно-временной дискретной математики; методы синтеза, верификации и оценки эффективности времяпараметризованных параллельных моделей алгоритмов, временных параллельных программ и процессов. Излагаемые результаты поддерживают также решение проблемы повышения эффективности параллельного аппаратно-программного обеспечения известных многопроцессорных ЭВМ, супер-ЭВМ и Сетей.

Все права защищены. Никакая часть книги не может быть воспроизведена ни в каком виде и никакими средствами, электронными или механическими, в том числе посредством фотокопирования или записи на магнитные носители, без письменного разрешения авторов.

**УДК 004.272.43
ББК 32.97**

© Харьковский национальный университет
имени В. Н. Каразина, 2012
© Поляков Г. А., Шматков С. И.,
Толстолужская Е. Г., Толстолужский Д. А., 2012
© Литвинова О. А., макет обложки, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	13
ЧАСТЬ 1. РЕТРОСПЕКТИВА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ АДАПТИВНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ...	16
Глава 1. Ретроспектива и перспективы развития параллельных вычислительных систем	16
1.1. Обзор концепций и принципов построения параллельных вычислительных систем	17
1.2. Обзор концепций и принципов построения систем автоматизации параллельного программирования (САПП).....	30
1.3. Обзор концепций и принципов построения систем автоматизации проектирования аппаратных средств (САПР).....	38
Глава 2. Концепция, принципы построения и проблемы создания Адаптивных Самоорганизующихся Вычислительных Систем (АСВС)	47
2.1. Используемые определения и понятия.....	48
2.1.1. Процесс, параллельный процесс, мультипараллельная обработка данных.....	48
2.1.2. Методы параллельной обработки данных.....	49
2.1.3. Классификация ВС.....	51
2.1.4. Адаптивная и самоорганизующаяся ВС.....	53
2.1.5. Эффективность ВС.....	55
2.2. Концепция и принципы построения Адаптивных Самоорганизующихся Вычислительных Систем.....	56
2.3. Обобщенная архитектура и фазы функционирования АСВС.....	59
2.3.1. Состав функциональных подсистем реализации мультипараллельных процессов АСВС.....	59
2.3.2. Обобщенная архитектура АСВС. Фазы самоорганизации/ адаптации и вычислительного процесса АСВС	62
2.4. Состав и назначение подсистем самоорганизации и адаптации АСВС.....	64
2.4.1. База данных и интерфейс с внешними объектами.....	65
2.4.2. Операционная система самоорганизации АСВС	66
2.4.3. Подсистема самоорганизации параллельных аппаратных средств АСВС	68
2.4.4. Подсистема самоорганизации элементного базиса АСВС	70
2.4.5. Подсистема контроля самоорганизации АСВС	72

2.4.6. Подсистема самоорганизации мультипараллельных программных средств АСВС	72
2.5. Состав и назначение подсистем мультипараллельного вычислительного процесса АСВС	74
2.5.1. Подсистема статической реконфигурации АСВС.	74
2.5.2. Операционная система мультипараллельных процессов АСВС	75
2.5.3. Подсистемы мультипараллельной обработки данных и контроля мультипараллельных процессов.....	75
2.5.4. Взаимодействие подсистем в процессе функционирования АСВС.....	78
2.6. Классификация и проблемы создания АСВС.....	79
Выводы по части 1	84
ЧАСТЬ 2. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИСКРЕТНАЯ МАТЕМАТИКА – АППАРАТ СИНТЕЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММНЫХ И АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ АДАПТИВНЫХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	87
Глава 3. Времяпараметризованные параллельные алгоритмы и показатели их эффективности	87
3.1. Статические и времяпараметризованные параллельные алгоритмы. ...	87
3.1.1. Алгоритм. Типы операторов и их атрибуты.	87
3.1.2. Статический алгоритм, спецификация статических алгоритмов. Временной алгоритм.....	93
3.1.3. Временные операторы и их параметры, множественные временные операторы	96
3.1.4. Временной алгоритм, параллельный и конструктивный временные алгоритмы	99
3.2. Методы параллельной обработки данных	101
3.2.1. Метод совмещения независимых операторов	103
3.2.2. Метод конвейерной обработки	106
3.2.3. Декомпозиционный метод обработки	108
3.2.4. Метод смеси параллельных алгоритмов	111
3.2.5. Кодово-матричный метод обработки данных	113
3.3. Показатели эффективности параллельных времяпараметризованных алгоритмов	115
Глава 4. Си-графы и временные параллельные граф-схемы – аппарат графической спецификации параллельных вычислительных процессов и систем	122
4.1. Общая характеристика пространственно-временной дискретной математики	123
4.1.1. Задачи аппарата пространственно-временной дискретной математики	123

4.1.2. Требования к средствам спецификации аппаратных и программных компонентов параллельных ЭВМ и ВС	124
4.2. Аппарат конструктивных графов	125
4.2.1. Конструктивные графы/Си-графы и их назначение. Сопряженное и внешнее множества операторов. Естественные части и маршруты в Си-графе	125
4.2.2. Примеры Си-графов задач	130
4.3. Аппарат Временных Параллельных Граф-Схем	136
4.3.1. Временные Параллельные Граф-Схемы (ВПГС)	136
4.3.2. ВПГС временной параллельной модели разветвляющейся задачи (программная ориентация)	140
4.3.3. ВПГС временной параллельной модели циклической задачи (простой цикл)	142
4.3.4. ВПГС временной параллельной модели циклической задачи (сложный цикл)	144
4.3.5. ВПГС временной параллельно-конвейерной модели разветвляющейся задачи	145
4.3.6. ВПГС временной параллельно-декомпозиционной модели разветвляющейся задачи	147
Глава 5. Алгебра структур пространственно-временной семантико-числовой спецификации – аппарат формального описания и синтеза адаптивных параллельных вычислительных процессов и систем	150
5.1. Общая характеристика алгебры структур пространственно – временной семантико-числовой спецификации	151
5.1.1. Классы поддерживаемых алгеброй объектов и требования к аппарату временной семантико-числовой спецификации	151
5.1.2. Состав и назначение компонентов алгебры структур пространственно-временной семантико-числовой спецификации	153
5.2. Семантико-числовая спецификация Си-программ и временных параллельных моделей задач	157
5.2.1. Семантико-числовая спецификация Си-программы неразветвляющейся задачи	157
5.2.2. Семантико-числовая спецификация Си-программы разветвляющейся задачи и ее сжатой временной параллельной модели	160
5.2.3. Семантико-числовая спецификация циклической задачи и ее сжатой временной модели	163
5.3. Семантико-числовая спецификация аппаратных компонентов параллельных вычислительных систем	169
5.3.1. Семантико-числовая спецификация функциональной схемы цифрового устройства с совмещением независимых операций	170
5.3.2. Семантико-числовая спецификация логической и вентильной схем полного сумматора	174

5.4. Семантико-числовая спецификация коммуникационных топологий параллельных вычислительных систем	178
5.4.1. Семантико-числовая спецификация полносвязной топологии ВС	179
5.4.2. Семантико-числовая спецификация радиальной топологии ВС	180
5.4.3. Семантико-числовая спецификация топологии ВС «двоичное дерево»	182
5.4.4. Семантико-числовая спецификация топологии ВС «двухмерная решетка»	183
5.4.5. Семантико-числовая спецификация топологии ВС «четырёхмерный единичный гиперкуб»	185
5.4.6. Пространственно-временная семантико-числовая спецификация топологии ВС «двоичное дерево»	187
5.5. Автоматический синтез структур СЧС и операции над структурами семантико-числовой спецификации	190
5.5.1. Обобщенный алгоритм и семантика основных этапов автоматического синтеза структур СЧС	191
5.5.2. Состав и формат структур семантико-числовой спецификации временных параллельных моделей Си-программ	203
5.5.3. Библиотека операций над статическими и временными структурами семантико-числовых спецификаций	207
Глава 6. Алгебра кодовых матриц – аппарат формального синтеза мультипараллельных аппаратных средств вычислительных систем.	210
6.1. Алгебра кодовых матриц	211
6.1.1. Объекты алгебры кодовых матриц	211
6.1.2. Одноместные операции алгебры кодовых матриц	212
6.1.3. Двухместные операции алгебры кодовых матриц	216
6.1.4. Функции и формулы алгебры кодовых матриц	224
6.1.5. Некоторые тождества алгебры кодовых матриц	225
6.1.6. Спецификация устройства группового суммирования n двоичных чисел средствами алгебры кодовых матриц	226
6.1.7. Библиотека программ операций алгебры кодовых матриц ...	230
6.2. Временные последовательности кодовых матриц	231
6.2.1. Объекты временных последовательностей кодовых матриц	231
6.2.2. Операции над временными последовательностями кодовых матриц	231
6.2.3. Формулы временных последовательностей кодовых матриц ...	234
Выводы по части 2	236

ЧАСТЬ 3. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ВРЕМЯПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАДАЧ И АРХИТЕКТУРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ	239
Глава 7. Методы синтеза времяпараметризованных мультипараллельных моделей алгоритмов.....	239
7.1. Краткая характеристика теории формального синтеза времяпараметризованных параллельных моделей алгоритмов	239
7.1.1. Назначение теории. Состав факторов, подлежащих учету при синтезе временных параллельных моделей задач.....	239
7.1.2. Основные составляющие теории формального синтеза, исходные данные и выходные результаты синтеза времяпараметризованных мультипараллельных моделей	245
7.2. Метод формального синтеза времяпараметризованных Максимально Параллельных Моделей алгоритмов, МПМ	246
7.2.1. Этапы формального синтеза максимально параллельных (сжатых) временных моделей задач	246
7.2.2. Синтез временной максимально параллельной модели задачи.	248
7.3. Метод формального синтеза времяпараметризованных Параллельных Моделей задач при ограничении Ресурса, ПМР	252
7.3.1. Этапы формального синтеза временных параллельных моделей задач при ограничении доступного ресурса.	253
7.3.2. Синтез временной параллельной модели при ограничении количества процессоров.....	256
7.4. Метод формального синтеза времяпараметризованных Параллельно-Конвейерных Моделей алгоритмов, ПКМ	258
7.4.1. Постановка задачи синтеза. Обобщенный алгоритм синтеза ...	258
7.4.2. Синтез временной параллельно-конвейерной модели	262
7.5. Метод формального синтеза времяпараметризованных Параллельно-Декомпозиционных Моделей задач, ПДМ	272
7.5.1. Постановка задачи. Обобщенный алгоритм синтеза времяпараметризованных параллельно-декомпозиционных моделей задач. .	273
7.5.2. Синтез временной параллельно-декомпозиционной модели	279
7.6. Метод формального синтеза времяпараметризованных параллельных моделей смеси алгоритмов.....	291
7.6.1. Обобщенный алгоритм синтеза мультипараллельных моделей смеси задач.....	292
7.6.2. Синтез времяпараметризованной параллельной модели смеси неразветвляющихся алгоритмов	295
7.6.3. Синтез времяпараметризованной параллельной модели смеси разветвляющегося и циклического алгоритмов	307

7.7. Оценки вычислительной сложности синтеза параллельных времяпараметризованных моделей задач	315
7.7.1. Общие исходные данные и этапы синтеза параллельных времяпараметризованных моделей.....	316
7.7.2. Вычислительная сложность расчета рангов $rng(j)$ операторов P_j структуры СЧС BF и формирование массива $RN^t(P) = \{rng(P_j)\}$ неупорядоченных значений рангов операторов.....	317
7.7.3. Вычислительная сложность процесса упорядочения элементов массива рангов $RN = \{rng(P_j)\}$ по убыванию рангов $rng(P_j)$ операторов $P_j \in P$	317
7.7.4. Вычислительная сложность расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов $P_j \in P$ временной максимально параллельной (сжатой) модели задачи.	318
7.7.5. Вычислительная сложность расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов $P_j \in P$ при ограничений на ширину H параллельной временной модели.....	320
Глава 8. Методы синтеза времяпараметризованных параллельных программ для процессоров классов <i>VLIW & FLOW</i>.....	321
8.1. Времяпараметризованные мультипараллельные программы. Постановка задачи формального синтеза	322
8.2. Метод синтеза времяпараметризованных параллельных программ для <i>VLIW</i> -процессоров	328
8.3. Метод синтеза параллельных программ для процессоров/ЭВМ с управлением потоком данных.....	348
Глава 9. Методы синтеза времяпараметризованных параллельных программ для <i>BC</i> классов <i>SMP, NUMA</i> с симметричной мультипроцессорной обработкой.....	366
9.1. Синтез времяпараметризованных параллельных программ для мультипроцессорных ЭВМ класса <i>SMP</i>	367
9.2. Модель синтеза времяпараметризованных параллельных <i>NUMA</i> -программ.....	394
Глава 10. Методы синтеза времяпараметризованных параллельных программ для ЭВМ класса <i>MPP</i>.....	406
10.1. Постановка задачи и обобщенная модель синтеза времяпараметризованных параллельных программ для мультипроцессорных <i>BC</i> класса <i>MPP</i>	407
10.2. Формальный синтез времяпараметризованных параллельных <i>MPP</i> -программ.....	410
Выводы по части 3	430

ЧАСТЬ 4. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВРЕМЯПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АДАПТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ	434
Глава 11. Принципы построения и проблемы создания адаптивных распределенных вычислительных сетей с временной параметризацией параллельных процессов	434
11.1. Используемые определения и понятия	436
11.2. Концепция и принципы построения Адаптивных Распределенных Вычислительных Сетей	441
11.3. Основные проблемы построения АРВС	444
Глава 12. Методы и модели статической фрагментации задач в адаптивных распределенных вычислительных сетях	446
12.1. Математические средства формализации объектов моделей статической фрагментации задач	448
12.1.1. Определения и понятия математического аппарата формальных полиномов	448
12.1.2. Средства текстовой и графической спецификации объектов моделей статической фрагментации задач	450
12.1.3. Средства формальной семантико-числовой спецификации объектов моделей статической фрагментации задач	454
12.2. Базовая модель статической фрагментации задач	456
12.2.1. Постановка задачи статической фрагментации	456
12.2.2. Базовая модель статической фрагментации задач	458
12.2.3. Семантика этапов базовой модели статической фрагментации задач	460
12.3. Примеры базовой статической фрагментации вычислительных задач	468
12.3.1. Статическая фрагментация разветвляющейся задачи	468
12.3.2. Статическая фрагментация задачи решения системы двух линейных уравнений по алгоритму Крамера	472
12.4. Обобщенная модель статической фрагментации смеси задач	474
12.4.1. Постановка задачи статической фрагментации смеси задач	476
12.4.2. Семантика этапов обобщенной модели статической фрагментации смеси задач	478
Глава 13. Методы и модели времяпараметризованной фрагментации задач в адаптивных распределенных вычислительных сетях	489

13.1. Базовая модель времяпараметризованной фрагментации задач	490
13.1.1. Постановка задачи временной фрагментации задач.....	490
13.1.2. Базовая модель временной фрагментации задач.....	491
13.2. Примеры базовой временной фрагментации задач	493
13.2.1. Базовая временная фрагментация неразветвляющейся задачи	493
13.2.2. Базовая временная фрагментация разветвляющейся задачи ...	498
13.2.3. Базовая временная фрагментация циклической задачи	504
13.3. Обобщенная модель времяпараметризованной фрагментации смеси задач	509
13.3.1. Постановка задачи обобщенной временной фрагментации	509
13.3.2. Обобщенная модель временной фрагментации смеси задач...	510
13.3.3. Обобщенная временная фрагментация смеси двух задач	512
Глава 14. Модели планирования ресурсов временных параллельных процессов адаптивных распределенных вычислительных сетей.....	518
14.1. Определения и понятия моделей временного планирования ресурсов Адаптивных Распределенных Вычислительных Сетей	518
14.1.1. Определения и понятия, относящиеся к множеству задач при времяпараметризованном планировании ресурса.....	519
14.1.2. Определения и понятия Распределенных Вычислительных Сетей, относящиеся к времяпараметризованному планированию ресурса	522
14.1.3. Варианты задания требований и ограничений	524
14.2. Обобщенная архитектура моделей декомпозиции и назначения ресурсов Адаптивных Распределенных Вычислительных Сетей	524
14.2.1. Постановка задачи и состав задач планирования ресурса	524
14.2.2. Обобщенная модель декомпозиции и назначения ресурсов Адаптивных Распределенных Вычислительных Сетей.....	529
14.3. Модель декомпозиции и назначения ресурса при ограничениях на доступный ресурс АРВС.....	529
14.3.1. Постановка задачи	529
14.3.2. Модель фрагментации и назначения ресурса при ограничениях на стоимость доступного сетевого ресурса.....	532
14.4. Модель декомпозиции и назначения ресурса при заданном времени решения задач.....	542
14.4.1. Постановка задачи назначения ресурса при заданном времени решения задач	542
14.4.2. Обобщенная модель назначения ресурса при заданном времени решения задач	544

Глава 15. Модели оценки сложности методов фрагментации задач и планирования ресурса в адаптивных распределенных вычислительных сетях.....	554
15.1. Оценка вычислительной сложности моделей статической фрагментации задач	556
15.2. Оценка вычислительной сложности временной фрагментации задач.....	564
15.3. Оценка вычислительной сложности планирования ресурса АРВС....	565
Выводы по части 4	571
ЧАСТЬ 5. МЕТОДЫ ВЕРИФИКАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ И ВРЕМЯПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	576
Глава 16. Проблемы верификации синтеза аппаратно-программных средств параллельных ВС с времяпараметризованной обработкой данных.....	576
16.1. Определения и понятия. Объекты верификации аппаратно-программных средств параллельных ВС	577
16.2. Архитектура системы формальной верификации аппаратно-программных средств параллельных ВС.....	586
Глава 17. Компиляционная верификация параллельных времяпараметризованных программных и аппаратных средств вычислительных систем	590
17.1. Общая характеристика компиляционной верификации	590
17.2. Компиляционная верификация синтеза времяпараметризованных параллельных программ	594
17.3. Компиляционная верификация синтеза параллельных цифровых аппаратных средств.....	605
Глава 18. Декомпиляционная и семантическая верификация статических и времяпараметризованных параллельных программных и аппаратных средств вычислительных систем.....	615
18.1. Общая характеристика декомпиляционной верификации.....	615
18.2. Методика декомпиляционной верификации времяпараметризованных параллельных моделей задач	618
18.3. Методика декомпиляционной верификации статических и времяпараметризованных мультипараллельных программ.....	628

18.4. Методика семантической верификации статических и времяпараметризованных параллельных программ	633
Выводы по части 5	644
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	648
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	653