

**А.В. Каляев  
И.И. Левин**

**МОДУЛЬНО-НАРАЩИВАЕМЫЕ  
МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ  
СИСТЕМЫ  
СО СТРУКТУРНО-ПРОЦЕДУРНОЙ  
ОРГАНИЗАЦИЕЙ ВЫЧИСЛЕНИЙ**



**Москва  
«Янус-К»  
2003**



Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
Проект N02-07-95004

УДК 004.272.43  
К18

*А.В. Каляев, И.И. Левин* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. — М.: Янус-К, 2003. — 380 с.

ISBN 5-8037-0120-3

В монографии описываются теоретические основы построения модульных многопроцессорных вычислительных систем с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой, обеспечивающих реальную производительность системы при решении широкого класса задач, близкую к пиковой производительности. Обосновывается высокая эффективность многопроцессорных систем со структурно-процедурной организацией вычислений. Приводится описание элементной базы многопроцессорных систем со структурно-процедурной организацией вычислений. Подробно описывается математическое обеспечение многопроцессорных систем и методов структурно-процедурного параллельного программирования.

Для научных сотрудников, инженеров и аспирантов. Будет также полезна студентам, специализирующимся в области высокопроизводительных вычислительных комплексов.

© А.В. Каляев, И.И. Левин, 2003

ISBN 5-8037-0120-3

Введение .....	5
<b>Глава 1. Многопроцессорные вычислительные системы с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой</b>	<b>13</b>
§1.1. Стратегическое значение суперкомпьютеров с массовым параллелизмом .....	13
§1.2. Проблема производительности суперкомпьютеров с массовым параллелизмом .....	15
§1.3. Программирование виртуальных архитектур в структуре суперкомпьютеров с массовым параллелизмом .....	19
§1.4. Структурно-программируемая макропроцессорная элементная база .....	23
§1.5. Модульная организация суперкомпьютеров с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой .....	28
§1.6. Структурно-процедурная организация вычислений в суперкомпьютерах с программируемой архитектурой .....	31
§1.7. Аппаратно-программные средства поддержки синтеза виртуальных архитектур .....	35
§1.8. Основные принципы синтеза многопроцессорных вычислительных систем с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой .....	36
<b>Глава 2. Графовые и кадровые отображения задачи в многопроцессорную вычислительную систему</b>	<b>39</b>
§2.1. Информационный граф задачи, реализуемый в многопроцессорной вычислительной системе .....	39
§2.2. Структурно-топологический граф задачи в многопроцессорной вычислительной системе .....	43
§2.3. Кадровое представление структурно-топологического графа задачи .....	44
§2.4. Условия преобразования информационного графа задачи в кадровую форму .....	48
§2.5. Преобразование структурно-топологического графа задачи в многослойную параллельно-конвейерную форму .....	49
<b>Глава 3. Многослойная параллельно-конвейерная фрейм-архитектура многопроцессорных вычислительных систем</b>	<b>54</b>
§3.1. Автоматные операции многослойной параллельно-конвейерной многопроцессорной сети с межслойными и внутрислойными обратными связями .....	54
§3.2. Функции переходов и функции выходов $n$ -слойной многопроцессорной сети .....	58
§3.3. Функции переходов и функции выходов многослойной параллельно-конвейерной многопроцессорной сети с обратной связью с выхода сети на вход .....	60

§3.4.	Функции переходов и функции выходов многослойной сети с выходным вектором из выходного слоя и с обратной связью с выхода на вход сети . . . . .	62
§3.5.	Управляющие обратные связи в многослойных многопроцессорных сетях . . . . .	63
<b>Глава 4.</b>	<b>Структурно-процедурный метод организации параллельных вычислений</b>	<b>69</b>
§4.1.	Определение структурно-процедурной организации параллельных вычислений . . . . .	69
§4.2.	Примеры преобразования задачи в структурно-процедурную форму . . . . .	93
§4.3.	Эффективность структурно-процедурных вычислений . . . . .	130
§4.4.	Эффективность МВС со структурно-процедурной организацией вычислений . . . . .	144
<b>Глава 5.</b>	<b>Структура многопроцессорной системы для структурно-процедурного решения задач различных проблемных областей</b>	<b>155</b>
§5.1.	Синтез структуры многопроцессорной вычислительной системы для решения задач структурно-процедурным методом распараллеливания . . . . .	155
§5.2.	Анализ вариантов построения коммутационных структур МВС со структурно-процедурной организацией вычислений	165
§5.3.	Программно-аппаратные средства поддержки структурно-процедурной организации вычислений в многопроцессорной системе с массовым параллелизмом . . . . .	183
§5.4.	Модульная организация МВС . . . . .	199
<b>Глава 6.</b>	<b>Элементная база многопроцессорных систем с программируемой архитектурой и структурно-процедурной организацией вычислений</b>	<b>214</b>
§6.1.	Макропроцессор . . . . .	218
§6.2.	Макрокоммутатор . . . . .	244
§6.3.	Контроллер распределенной памяти . . . . .	249
<b>Глава 7.</b>	<b>Математическое обеспечение многопроцессорных вычислительных систем со структурно-процедурной организацией вычислений</b>	<b>285</b>
§7.1.	Принципы построения операционной системы МВС со структурно-процедурной организацией вычислений . . . . .	285
§7.2.	Планировщик заданий . . . . .	292
§7.3.	Система посттрансляции . . . . .	312
§7.4.	Программные средства поддержки технологии индуктивных программ . . . . .	317
§7.5.	Описание языка параллельного программирования высокого уровня для СПОВ . . . . .	323
§7.6.	Примеры программирования задач различных проблемных областей . . . . .	352
§7.7.	Некоторые особенности и алгоритмы трансляции . . . . .	360
	Список литературы . . . . .	373

## Список литературы

---

1. *Каляев А.В.* Теория цифровых интегрирующих машин и структур. – М.: Сов. радио, 1970. – 471 с.
2. *Каляев А.В.* Автоматы с программируемой структурой. // Problems of control and Information Theory. – Budapest. 1975, №1, 1758. – pp.35–36.
3. *Каляев А.В.* Многопроцессорные однородные вычислительные структуры. // Радиоэлектроника. – М., 1978, №12. – с.5–17.
4. *Kalyaev A.V.* Multiprocessor homogeneous calculation structures with distributed memory and universal commutation. // Euromicro Journal. 1979, v.5, №2. – pp.73–81.
5. *Каляев А.В.* Многопроцессорные системы с распределенной памятью, универсальной коммутацией и программируемой структурой микропроцессоров. // Электронное моделирование. – Киев, 1979, №1. – с.31–41.
6. *Каляев А.В.* Микропроцессоры с программируемой структурой и многопроцессорные системы с универсальной коммутацией и распределенной памятью. // Параллельное программирование и высокопроизводительные системы. – Новосибирск, 1980, Т.1. – с.87–117.
7. *Каляев А.В.* Принципы организации многопроцессорных систем сверхвысокой производительности. // Микропроцессорные средства и системы. – Москва, 1984, №2. с.31–35.
8. *Kalyaev A.V.* Multiprocessor Systems with a Programmable Architectures. // Fifth Generation Computer Architectures. Amsterdam. New York. Oxford. Tokyo, 1986, pp.291–300.
9. *Kalyaev A.V.* Multimicroprocessor Systems. // Information Processing-86. Proceedings of the IFIP 10-th World Computer Congress. Ireland, Dublin, 1986, pp.949–954.
10. *Каляев А.В., Каляев И.А.* СТОРК-компьютер – многопроцессорная вычислительная система со структурной организацией вычислений. // Электронное моделирование. – Киев, 1996, №4. – с.5–14.
11. *Kalyaev A.V.* The Programming of Virtual Problem-Oriented Parallel Supercomputers in the Structure of Universal Supercomputers with Massive Parallelism. // High-Performance Computing. San Diego, California, USA, 1999. – pp.249–255.

12. *Каляев А.В.* Принципы и методы программирования виртуальных архитектур в многопроцессорных суперкомпьютерах. // Высокопроизводительные вычисления и их приложения. Черноголовка, 2000. – с.12–16.

13. *Каляев А.В.* Программирование виртуальных архитектур в суперкомпьютерах с массовым параллелизмом. // Информационные технологии и вычислительные системы. Москва, 2000, №2.

14. *Поспелов Д.А.* Введение в теорию вычислительных систем. – М.: Сов. радио, 1972. – 280 с.

15. *Воеводин В.В.* Математические модели и методы параллельных процессов. – М.: Наука, 1986. – 286 с.

16. *Левин И.И., Пономарев И.М.* Методика организации высокоэффективных параллельных вычислений в многопроцессорных системах. // Тезисы международной конференции «Искусственный интеллект-2000». – Кацивели. Изд-во ТРТУ, 2000. – с.142–144.

17. *Левин И.И., Пономарев И.М.* Реализация алгоритма волновой трассировки на многопроцессорной системе со структурной организацией вычислений. // НИИ многопроцессорных вычислительных систем при Таганрогском государственном радиотехническом университете, Таганрог, 1995, 49 с., – Деп. в ВИНТИ 29.05.95, №1553–В95.

18. *Aykanat C., Kurc T. M. and Ercal F.* Parallelization of Lee's routing algorithm on a hypercube multicomputer, Proc. of 2nd European Dist. Mem. Comp. Conf. (EDMCC2), April 1991, pp.244–253.

19. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М: Мир, 1978. – 848 с.

20. *Головкин Б.А.* Параллельные вычислительные системы. М.: Наука, 1980. – 519 с.

21. *Баер Ж.Л.* Методы исследования параллелизма. // Системы параллельной обработки. / Под ред. *Ивенса Д.М.*: Мир, 1985. – 416 с.

22. Параллельные вычисления. / Под ред. *Родрига Г. М.*: Наука, 1986. – 376 с.

23. *Siegel L.J., Siegel H.J., Swain P.H.* Performance Measures for Evaluation Algorithms for SIMD-Machines. // IEEE Trans. Software Eng., v.8, №4, pp.319–331.

24. *Каляев В.А., Левин И.И., Фомин С.Ю.* Об оценке эффективности решения задач математической физики на многопроцессорных системах. // Электронное моделирование, 1989, №6. – с.11–15.

25. *Левин И.И., Штейнберг Б.Я.* Сравнительный анализ эффективности параллельных программ для различных архитектур многопроцессорных систем. // Искусственный интеллект, 2001, №3. – с.234–242.

26. Штейнберг Б.Я. Бесконфликтные размещения массивов при параллельных вычислениях. // Кибернетика и системный анализ. – 1999. – №2.
27. Штейнберг Б.Я. Распараллеливание рекуррентных циклов с условными операторами. // Автоматика и телемеханика. 1995. – №6. – с.176–184.
28. Каляев А.В., Левин И.И. Многопроцессорные системы с перестраиваемой архитектурой: концепции развития и применения. // Наука – производству, 1999, №11. – с.11–19.
29. Майерс Г. Архитектура современных ЭВМ. Кн.1. М.: Мир, 1985. – 364 с.
30. Ясинявичус Р. Параллельные пространственно-временные вычислительные структуры. Вильнус: Мокслас, 1988. – 183 с.
31. Майоров С.А., Новиков Г.И. Структура электронных вычислительных машин. Л.: Машиностроение, 1979. – 379 с.
32. Перестраиваемые цифровые структуры на основе интегрирующих процессоров. / Под ред. А.В. Каляева. М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.
33. Kalyaev A.V. Ultra-high Performance Multiprocessor Supersystems with Programable Architecture. Aspects of computation on Asynchronous Parallel Processors. – Amsterdam. New York. Oxford. Tokyo. – 1989. – pp.111–123.
34. Каляев А.В., Станишевский О.Б. Принципы построения программно-аппаратных средств супермакрокомпьютеров. // Информатика, 1990, – №2. – с.13–21.
35. Сир Ж.К. Метод потока операндов в многопроцессорных системах типа MIMD. // Системы параллельной обработки. / Под ред. Ивенса Д. М.: Мир, 1985. – с.240–276.
36. Норкин К.Б. Специализированные гибридные управляющие вычислительные устройства. М.: Энергия, 1984. – 215 с.
37. Хэндлер В. Новая архитектура ЭВМ – как увеличить параллелизм, не увеличивая сложности. // Системы параллельной обработки. / Под ред. Ивенс Д.М.: Мир, 1985. – с.10–44.
38. Handler W. Zur Geneslogie, Stuktur und Klassifizieren von Rechern Arbeitsbetreiberichte des IMMD, 1976, №9, s.1–30.
39. Каляев А.В. Многопроцессорные вычислительные системы с программируемой архитектурой. М.: Радио и Связь, 1984. – 240 с.
40. Каляев А.В., Станишевский О.Б., Фрадкин Б.Г. Макропроцессорный комплект СВИС. // Сборник докладов I Всесоюзной конференции «Однородные вычислительные средства и систолические структуры», Львов, 1990, т.2. – с.33–46.

41. *Станишевский О.Б.* Эффективность арифметической обработки при конвейерных и нейроконвейерных вычислениях. // Конвейерные вычислительные системы. Тезисы докладов, Кишинев, 1988.

42. *Хокни Р., Джессхоуп К.* Параллельные ЭВМ. Архитектура, программирование и алгоритмы. /Пер.с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.

43. *Shore J.E.* Second thoughts on parallel processing. *Comput. Elect. Eng.*, 1973, №1, p.95–109.

44. *Каляев А.В.* Однородные коммутационные регистровые структуры. М.: – Сов. радио, 1978. – 240 с.

45. *Каляев А.В., Арцатбанов А.Ю., Итенберг И.И.* Принципы построения семейства высокопроизводительных ортогональных многопроцессорных вычислительных систем с программируемой архитектурой. // Многопроцессорные вычислительные структуры. – Таганрог, 1991, вып.13(XXII). – с.4–9.

46. *Левин И.И.* Сопроцессор для структурно-процедурного решения задач математической физики структурно-процедурным методом распараллеливания. // Анализ эффективности вычислительных систем. / Под ред. *Я.А.Дуброва.* Львов: Препринт НТЦ «Интеграл», 1991. – с.14–21.

47. *Каляев А.В.* Принципы и методы программирования виртуальных архитектур в многопроцессорных универсальных суперкомпьютерах. // В сб. Высокопроизводительные вычисления и их приложения. Труды всероссийской научной конференции. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – с.12–16.

48. *Ерохин А.В., Фрадкин Б.Г., Левин И.И., Рыжик О.А.* Патент №2059288 на изобретение «Матричный коммутатор» по заявке №94029855, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 26 апреля 1996 г.

49. *Каляев А.В., Каляев И.А., Левин И.И., Пономарев И.М.* Параллельный компьютер с программируемой под структуру задачи архитектурой. // Труды шестого международного семинара «Распределенная обработка информации». – Новосибирск. – 1998. – с.25–29.

50. *Каляев А.В., Левин И.И., Пономарев И.М.* Базовый модуль многопроцессорной вычислительной системы с программируемой архитектурой. // Наука производству, 1999, №11. – с.33–39.

51. *Kalyaev A.V., Kalyaev I.A., Levin I.I.* The Base Module of Multiprocessor System with Structural- Procedural Organization of Computing. *Parallel Computing Technologies. Proceedings of 4-th International Conference, PaCT-97.* – Yaroslavl. Russia. – 1997. – pp.394–396.

52. *Каляев А.В., Левин И.И., Фрадкин Б.Г.* Унифицированная элементная база для построения реконфигурируемых под задачу



вычислительных систем. // Известия ВУЗов. Электроника, 1997, №1, – с.75–83.

53. Левин И.И., Винеvская Л.И., Дмитренко Н.Н., Логвинов С.А. Элементная база для построения высокопроизводительных систем. // Труды международной научно-технической конференции, Таганрог, ТРТУ, 1999. – с.98–103.

54. Винеvская Л.И., Станишевский О.Б., Ерохин А.В., Рыжик О.А. Патент №2069009 на изобретение «Суммирующее устройство» по заявке №93054701, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 10 ноября 1996 г.

55. Каляев А.В., Винеvская Л.И., Станишевский О.Б. Патент № 2418270 на изобретение «Множительное устройство» по заявке № 98110224, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 27 апреля 2000 г.

56. Каляев А.В., Духнич Е.И., Сулин Г.А. Алгоритмы макроопераций для аппаратурной реализации в микропроцессорах с программируемой архитектурой. // Известия высших учебных заведений. Технические науки. – Ростов-на-Дону. – 1996. – №2. – с.15–20.

57. Левин И.И., Коробкин В.В. Принципы создания интеллектуальной самонастраиваемой элементной базы для эффективного аппаратного решения широкого класса задач. // Тезисы докладов третьей международной конференции «Электроника и информатика – XXI век», М.: МИЭТ, 2000. – с.325.

58. Ерохин А.В., Фрадкин Б.Г., Левин И.И., Рыжик О.А. Патент №2103729 на изобретение «Матричный коммутатор» по заявке №94029856, зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 27 января 1998 г.

59. Левин И.И. Структурно-процедурное программирование. // Тезисы международной конференции «Искусственный интеллект», Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – с.148–150.

60. Каляев А.В., Левин И.И., Шматок А.В. Средства программирования суперкомпьютеров с массовым параллелизмом и программируемой архитектурой. // Тезисы международной конференции «Искусственный интеллект», Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – с.151–152.

61. Левин И.И., Шматок А.В. Технология индуктивных параллельных программ. // Труды международной научно-технической конференции. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – с.142–146.

62. Левин И.И. Технология параллельных индуктивных программ. // Сборник трудов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. – 2000. – с.54–56.

63. Шуп Т.Е. Прикладные численные методы в физике и технике. М.: Высш. Шк., 1990. – 255 с.

64. Станишевский О.Б., Левин И.И. Метод решения задач в частных производных на макрокомпьютере. // В кн. Многопроцессорные вычислительные структуры. Таганрог, 1991. – с.14–15.
65. Левин И.И., Пономарев И.М. Реализация быстрого преобразования Фурье на многопроцессорной системе со структурно-процедурной организацией вычислений. // Изв. вузов. Электромеханика, – 1995. №4. – с.72–74.
66. Хуан К. Перспективные методы параллельной обработки и архитектура суперЭВМ. // ТИИЭР. 1987, №10. – с.4–41.
67. Майерс Г. Архитектура современных ЭВМ. / Кн.2. М.: Мир, 1985. – 64 с.
68. Дейкстра Э. Взаимодействие последовательных процессов. // В сб. Языки программирования. / Под ред. Женью Ф.М.: Мир, 1972. – с.9–86.
69. Кутенов В.П., Кораблин Ю.П. Язык граф-схем параллельных алгоритмов. // Программирование, №1, 1978. – с.1–16.
70. Джехани Н. Язык Ада. – М.: Мир, 1988. – 540 с.
71. Хоар Ч. Взаимодействующие последовательные процессы. – М.: Мир, 1989. – 265 с.
72. Дейкстра Э. Дисциплина программирования. – М.: Мир, 1978. – 278 с.
73. Элементы параллельного программирования. / Под ред. Котова В.Я. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
74. Бабенко Л.К., Макаревич О.Б., Чефранов А.Г. Принципы описания и организации асинхронных крупноблочных вычислений в многопроцессорных системах. // Электронное моделирование, 1988, №3. – с.13–17.
75. May D. Occam 2 manual. – Bristol, UK: Inmos Ltd, 1986.
76. Фути К., Судзюки Н. Языки программирования и схемотехника СБИС. – М.: Мир, 1988. – 224 с.
77. Сир Ж.К. Метод потока операндов в многопроцессорных системах типа MIMD // В сб. Системы параллельной обработки / Под ред. Ивенса Д. М.: – Мир, 1985. – с.240–276.
78. Chamberlin D.D. Parallel Implementation of a'LAU Ph.D.Thesis Report 19, 1971.
79. Котов В.Е. Теория параллельного программирования. Прикладные аспекты. //Кибернетика, 1974, №1. – с.1–16.
80. Стерлинг Л., Шапиро Э. Искусство программирования на языке Пролог. – М.: Мир, 1990. – 235 с.
81. Братко И. Программирование на языке Пролог для искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1990. – 560 с.

82. *Гузик В.Ф., Левин И.И., Сафронов О.О.* Представление параллелизма в программах для многопроцессорной системы с программируемой архитектурой. // Известия ВУЗов СКНЦВШ. Технические науки, 1996, №2. – с.4–15.

83. *Kuch D.J.* ILLIAC-IV. Software and Application Programming. // IEEE Trans. Computer, 1968, v.C17, №8, pp.758–770.

84. *Левин И.И.* Язык параллельного программирования высокого уровня для структурно-процедурной организации вычислений. // Труды Всероссийской научной конференции. М.: Изд-во МГУ, 2000. – с.108–112.

85. Применение цифровой обработки сигналов. / Под редакцией Э. *Оппенгейма*. М: Мир, 1980. – 552 с.

86. *Левин И.И., Пономарев И.М.* Реализация быстрого преобразования Фурье на многопроцессорной системе со структурно-процедурной организацией вычислений. // Изв. вузов. Электромеханика, – 1995. №4. – с.72–74.

87. СБИС для распознавания образов и обработки изображений. / Под ред. *К.Фи.* – М.: Мир, 1988. – 248 с.

88. *Левин И.И., Пономарев И.М.* Структурно-процедурная реализация кластерной группировки данных в задачах обработки изображений. // Изв. вузов. Электромеханика, – 1999, – №2. – с.54–57.