

УДК 681.32:519.68(075.8)  
ББК 22.18  
Х79

Рецензенты:

кафедра «Информатика и вычислительная техника»  
Омского государственного технического университета  
(д-р техн. наук, профессор *В.И. Потапов*);  
д-р техн. наук, профессор *В.В. Сюзев*  
(зав. кафедрой «Компьютерные системы и сети» Московского  
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана)

**Хорошевский В.Г.**

Х79     Архитектура вычислительных систем: Учеб. пособие. — 2-е изд.,  
перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 520 с.:  
ил. — (Информатика в техническом университете).

ISBN 978-5-7038-3175-5

Рассмотрены основные архитектурные концепции построения средств обработки информации, модели функциональной организации электронных вычислительных машин (ЭВМ Дж. фон Неймана, модель вычислителя) и параллельных вычислительных систем (модель коллектива вычислителей). Описаны канонические функциональные структуры и наиболее интересные промышленные реализации конвейерных, матричных, мультипроцессорных и распределенных вычислительных систем. Особое внимание уделено архитектурно наиболее совершенному классу ВС — системам с программируемой структурой.

Приведены инженерные методы комплексного анализа производительности, надежности, живучести и технико-экономической эффективности, а также нетрудоемкая технология экспресс-анализа качества функционирования ЭВМ и ВС и осуществимости параллельного решения сложных задач.

Второе издание (1-е — 2005 г.).

Для студентов вузов, а также для специалистов в области параллельных вычислительных технологий.

УДК 681.32:519.68(075.8)  
ББК 22.18

ISBN 978-5-7038-3175-5

© Хорошевский В.Г., 2008  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	8
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	10
1. ПРЕДЫСТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ .....	11
1.1. Эволюция вычислительной техники .....	11
1.2. Вычислительные машины на электронных лампах .....	23
1.3. Первые электронные вычислительные машины .....	31
1.4. Путь развития отечественной электронной вычислительной техники .....	37
1.5. Современный уровень вычислительной техники.....	49
2. АРХИТЕКТУРА ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН ...	54
2.1. Каноническая функциональная структура ЭВМ Дж. фон Неймана .....	54
2.2. Модель вычислителя .....	58
2.3. Понятие об архитектуре ЭВМ .....	61
2.4. Понятие о семействе ЭВМ .....	64
2.5. Поколения ЭВМ .....	66
2.6. Производительность ЭВМ .....	73
2.7. Количественные характеристики памяти ЭВМ .....	79
2.8. Надежность ЭВМ .....	82
2.9. Технико-экономический анализ функционирования ЭВМ .....	93
2.10. Предпосылки совершенствования архитектуры ЭВМ. Представление о вычислительных системах .....	105
3. АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....	111
3.1. Модель коллектива вычислителей .....	111
3.2. Техническая реализация модели коллектива вычислителей. Архитектурные свойства вычислительных систем .....	118
3.3. Параллельные алгоритмы .....	126
3.4. Концептуальное понятие и классификация архитектур вычислительных систем .....	142
4. КОНВЕЙЕРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....	149
4.1. Каноническая функциональная структура конвейерного процессора .....	149
4.2. Конвейерные системы типа «память-память» .....	152
4.3. Конвейерные системы типа «регистр-регистр» .....	157
4.4. Массово-параллельные вычислительные системы Cray .....	167
4.5. Сверхвысокопроизводительные вычислительные системы семейства Cray X .....	180
4.6. Анализ конвейерных вычислительных систем .....	191
5. МАТРИЧНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....	194
5.1. Каноническая функциональная структура матричного процессора .....	194
5.2. Вычислительная система ILLIAC IV .....	196

---

5.3. Вычислительная система DAP .....	204
5.4. Семейство вычислительных систем Connection Machine .....	207
5.5. Семейство вычислительных систем nCube .....	224
5.6. Анализ матричных вычислительных систем .....	231
<b>6. МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>235</b>
6.1. Каноническая функциональная структура мультипроцессора .....	235
6.2. Вычислительная система C.mmp .....	237
6.3. Семейство вычислительных систем Burroughs .....	241
6.4. Семейство вычислительных систем «Эльбрус» .....	243
6.5. Предпосылки совершенствования архитектуры мультипроцессорных вычислительных систем .....	249
6.6. Вычислительная система Cm* .....	251
6.7. Мультипроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений .....	258
6.8. Сверхвысокопроизводительные вычислительные системы семейства IBM Blue Gene .....	273
6.9. Анализ мультипроцессорных вычислительных систем с усовершенствованной структурой .....	282
<b>7. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ .....</b>	<b>285</b>
7.1. Понятие о вычислительных системах с программируемой структурой .....	285
7.2. Архитектурные особенности вычислительных систем с программируемой структурой .....	294
7.3. Вычислительная система «Минск-222» .....	314
7.4. Вычислительная система МИНИМАКС .....	329
7.5. Вычислительная система СУММА .....	342
7.6. Вычислительные системы семейства МИКРОС .....	354
7.7. Вычислительные системы семейства МВС .....	367
7.8. Анализ вычислительных систем с программируемой структурой .....	375
<b>8. ТРАНСПЬЮТЕРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>377</b>
8.1. Понятие о транспьютерных вычислительных системах .....	377
8.2. Архитектура транспьютеров семейств T200, T400 и T800 .....	380
8.3. Система команд транспьютера .....	393
8.4. Параллельная обработка и коммуникации транспьютеров .....	401
8.5. Архитектура транспьютера IMS T9000 .....	407
8.6. Анализ транспьютерных технологий .....	411
<b>9. НАДЕЖНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>412</b>
9.1. Производительность вычислительных систем .....	412
9.2. Вычислительные системы со структурной избыточностью .....	414
9.3. Показатели надежности вычислительных систем .....	416
9.4. О методике расчета показателей надежности вычислительных систем .....	421
9.5. Расчет показателей надежности для переходного режима функционирования вычислительных систем .....	425

## Оглавление

---

9.6. Расчет показателей надежности для стационарного режима работы вычислительных систем .....	431
9.7. Потенциальный контроль вычислительных систем .....	440
9.8. Численное исследование надежности вычислительных систем .....	443
9.9. Анализ вычислительных систем со структурной избыточностью .....	459
<b>10. ЖИВУЧЕСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>460</b>
10.1. Живучие вычислительные системы .....	460
10.2. Показатели потенциальной живучести вычислительных систем .....	463
10.3. О методике расчета показателей живучести вычислительных систем ....	467
10.4. Расчет функции потенциальной живучести вычислительных систем ....	471
10.5. Анализ живучих вычислительных систем .....	476
<b>11. ОСУЩЕСТВИМОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>477</b>
11.1. Режимы функционирования вычислительных систем .....	477
11.2. Анализ решения сложных задач на вычислительных системах .....	478
11.3. Анализ обслуживания потока задач на вычислительных системах .....	482
11.4. Оценка потенциальных возможностей вычислительных систем по осуществимости решения задач .....	487
<b>12. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>488</b>
12.1. Цена быстрого действия вычислительных систем .....	488
12.2. Математическое ожидание бесполезных расходов при эксплуатации вычислительных систем .....	490
12.3. Математическое ожидание дохода вычислительных систем .....	496
12.4. Техничко-экономическое исследование структур вычислительных систем в условиях потока задач .....	499
12.5. Анализ технико-экономических возможностей вычислительных систем ...	510
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>511</b>
П.1. Расчет функции надежности вычислительных систем .....	511
П.2. Экспресс-анализ функционирования вычислительных систем .....	515
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>519</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Системы распределенной обработки информации и параллельные вычислительные технологии относятся к базовым средствам XXI столетия, обеспечивающим интенсификацию научно-технического прогресса.

Предлагаемое учебное пособие посвящено современным и перспективным архитектурным концепциям средств обработки информации. Из 12 глав учебника только две первые не связаны с параллельными технологиями вычислений. В главе 1 изучается предыстория вычислительной техники, а в главе 2 — архитектура электронных вычислительных машин (ЭВМ), или неймановская архитектура средств обработки информации. При описании архитектуры ЭВМ особое внимание уделено концептуальной модели вычислителя и семантике понятия «архитектура ЭВМ». Архитектура ЭВМ раскрывается через их функциональные структуры и такие характеристики эффективности, как производительность, надежность и технико-экономическая эффективность. При этом излагается математический инструментарий для анализа эффективности ЭВМ. Содержание первых двух глав позволяет также глубже понять архитектуру параллельных средств вычислительной техники. Глава 2 является введением для последующих глав, в которых изучаются методы анализа эффективности функционирования параллельных вычислительных систем.

Главы 3–8 посвящены средствам обработки информации, основанным на модели коллектива вычислителей. Такие средства называют вычислительными системами (ВС), и они характеризуются массовым параллелизмом при обработке информации и реконфигурируемостью (программируемостью) своих структур. В главе 3 изложены концептуальные основы предмета «Архитектура ВС», включающие принципы технической реализации модели коллектива вычислителей, элементарные понятия параллельного программирования и методику крупноблочного распараллеливания сложных задач.

В главах 4–8 дано достаточно полное описание таких классов вычислительных систем, как конвейерные, матричные, мультипроцессорные ВС, системы с программируемой структурой и транспьютерные ВС. Здесь представлены не только канонические функциональные структуры и промышленные реализации названных классов систем, но приведен качественный анализ их архитектурных возможностей и показаны пути их развития.

В последних главах рассмотрены инженерные методы анализа эффективности функционирования вычислительных систем. В главе 9 описаны ВС со структурной избыточностью, введен набор показателей надежности ВС, приведены методы расчета этих показателей и в переходном, и в стационарном режимах работы ВС. В главе 10 исследована живучесть ВС как ансамблей элементарных машин, т. е. способность ВС использовать все исправные ресурсы (машины) для реализации адаптирующихся параллельных программ. Просто и лаконично изложен континуальный подход к расчету показателей живучести большемасштабных ВС (с массовым параллелизмом). Глава 11 посвящена вероятностной теории осуществимости параллельного решения задач на неабсолютно надежных вычислительных системах. Наконец, глава 12 знакомит с математически простым аппаратом анализа технико-экономической эффективности функционирования вычислительных систем.

В Приложении 1 приведен математический аппарат расчета вероятностных характеристик надежности для переходного режима функционирования ВС. В Приложении 2 описан инструментарий экспресс-анализа эффективности функционирования большемасштабных вычислительных систем.

Структура пособия и изложение материала позволяют достаточно полно раскрыть данную тему, не отсылая читателя к другим источникам.

Каждая из глав автономна, и для понимания их содержания не требуется тщательное знание предшествующих глав. Если у читателя все же возникнут затруднения, он легко их преодолеет, воспользовавшись ссылкой на предшествующий материал.

Большой опыт работы профессором (более 35 лет), чтение соответствующих курсов лекций в Новосибирском государственном техническом университете (1969–1983), Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики (с 1983 г.) и Новосибирском государственном университете (1995–2002), опыт написания ряда учебных пособий и книг, используемых в вузах Содружества независимых государств, — все это помогло автору издать настоящее пособие. В нем освещены новейшие достижения в области архитектур и организации функционирования параллельных ВС, включающие результаты научной школы автора.

Учебное пособие «Архитектура вычислительных систем» соответствует государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования по направлениям подготовки: бакалавра (магистра) 552800 «Информатика и вычислительная техника»; дипломированного специалиста 654600 «Информатика и вычислительная техника».

Автор с благодарностью учтет замечания и примет советы по улучшению книги (105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана).

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЛУ — арифметико-логическое устройство  
АУ — арифметическое устройство  
БИС — большая интегральная схема  
БОС — блок операций системы  
ВЗУ — внешнее запоминающее устройство  
ВМ — вычислительная машина  
ВС — вычислительная система  
ВТ — вычислительная техника  
ЗУ — запоминающее устройство  
КОП — код операции  
ЛК — локальный коммутатор  
МКМД — множественный поток команд и множественный поток данных  
МКОД — множественный поток команд и одиночный поток данных  
МП — микропроцессор  
ОБП — обобщенный безусловный переход  
ОЗУ — оперативное запоминающее устройство  
ОКМД — одиночный поток команд и множественный поток данных  
ОКОД — одиночный поток команд и одиночный поток данных  
ОС — операционная система  
ОУП — обобщенный условный переход  
ПО — программное обеспечение  
РН — регистр настройки  
САПР — система автоматизированного проектирования  
СУ — системное устройство  
ЦП — центральный процессор  
ЭВМ — электронная вычислительная машина  
ЭМ — элементарная машина  
ЭП — элементарный процессор

# 1. ПРЕДЫСТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

*Электронные вычислительные средства завоевали прочные позиции в жизненно важных сферах деятельности человека — в науке, технике, экономике и промышленности. Область применения средств обработки информации постоянно расширяется. Возможности вычислительной индустрии в существенной мере определяют научно-технический прогресс. Потребности общества в решении все более сложных задач постоянно растут, и они, в свою очередь, стимулируют развитие вычислительных средств.*

*Современная индустрия информатики располагает арсеналом средств от персональных электронных вычислительных машин (ЭВМ) до высокопроизводительных вычислительных систем (ВС) с массовым параллелизмом, обладающих быстродействием в пределах  $10^{10} \dots 10^{15}$  опер./с.*

*Вычислительная техника развивалась постепенно, в несколько этапов. В главе рассматриваются средства вычислительной техники начального этапа (простейшие механические вычислительные приборы, электромеханические машины и ЭВМ); описываются архитектурные особенности первых зарубежных и отечественных ЭВМ: ENIAC, EDVAC, МЭСМ, БЭСМ и др.*

## 1.1. Эволюция вычислительной техники

Развитие человека и общества неразрывно связано с прогрессом в технике вообще и вычислительной технике в частности. Всегда существовала тенденция к постоянному усилению физических и вычислительных возможностей человека путем создания орудий, машин и систем машин. Установился своеобразный дуализм в развитии техники, который иллюстрируется двумя эволюционными «рядами»:

- *физический ряд*: рычаг и простейшие механические орудия → машины (подъемные краны и экскаваторы) → конвейеры (системы машин);
- *вычислительный ряд*: простейшие счетные орудия (или приборы, или инструменты) → механические и электромеханические вычислительные



## 2. АРХИТЕКТУРА ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

*Электронные вычислительные машины (ЭВМ) получили широкое применение в науке, технике, экономике и промышленности [3], их интенсивное развитие диктуется постоянно растущими потребностями общества в решении все более сложных задач. Процесс совершенствования ЭВМ характеризуется расширением функциональных возможностей, сокращением стоимости и уменьшением габаритных размеров. Как на начальном, так и на современном этапах развития ВТ улучшения характеристик ЭВМ обеспечиваются главным образом благодаря достижениям в элементной базе. В настоящее время они в значительной мере определяются возможностями технологии больших интегральных схем (БИС), возможностями микропроцессоров. В этой главе даются понятия об архитектуре ЭВМ, о модели вычислителя и семействе ЭВМ; описаны поколения ЭВМ. Особое внимание уделено производительности и надежности ЭВМ.*

### 2.1. Каноническая функциональная структура ЭВМ Дж. фон Неймана

Электронная вычислительная машина (Computer) — средство, предназначенное для автоматической обработки информации — данных (прежде всего в процессе решения вычислительных и информационно-логических задач). Путем итерации перейдем от этого интуитивного представления к более строгому понятию ЭВМ.

Функционирование ЭВМ определяется не только ее технической конструкцией (Hardware — аппаратурной частью), но и безусловно алгоритмом обработки информации (решения задачи), который обязательно представляется (записывается) на языке, доступном машине. Такое представление алгоритма обработки информации называют *программой*. Любая программа в конечном счете интерпретируется на машинном языке (как правило, в двоичных кодах). Говоря иначе, окончательное представление программы обработки информации есть последовательность команд, каждая из которых

### 3. АРХИТЕКТУРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Концептуальное представление о средствах обработки информации, получивших название ВС, базируется на модели коллектива вычислителей, на понятиях параллельного алгоритма, архитектуры и макроструктуры ВС. Логика развития ВТ и дуализм понятия «вычислитель» (см. § 2.2) порождают понятие «коллектив вычислителей», допускающее двойное толкование: и как ансамбль людей, занятых расчетами, и как система аппаратурно-программных средств для обработки информации. Коллектив аппаратурно-программных вычислителей является ВС. Архитектура ВС основывается на структурной и функциональной имитации коллектива (ансамбля) людей-вычислителей. Степень адекватности такой имитации определяет потенциальные архитектурные возможности вычислительной системы. Модель, приведенная в данной главе, может рассматриваться как модель функциональной организации ВС или просто как модель ВС.*

#### 3.1. Модель коллектива вычислителей

##### 3.1.1. Принципы построения вычислительных систем

Каноническую основу конструкции ВС и ее функционирования составляет модель коллектива вычислителей [5], которая представляется парой:

$$S = \langle H, A \rangle, \quad (3.1)$$

где  $H$  и  $A$  — описание конструкции (или конструкция) и алгоритм работы коллектива вычислителей.

Конструкция коллектива вычислителей описывается в виде

$$H = \langle C, G \rangle, \quad (3.2)$$

где  $C = \{c_i\}$  — множество вычислителей  $c_i$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ ;  $N$  — мощность множества  $C$ ;  $G$  — описание макроструктуры коллектива вычислителей, т. е. структуры сети связей между вычислителями  $c_i \in C$  (или структура коллектива).

## 4. КОНВЕЙЕРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Конвейерные ВС относились к числу самых популярных высокопроизводительных средств обработки информации в 70-х и 80-х годах XX в. Они обеспечивали быстроедействие порядка  $10^8 \dots 10^9$  опер./с, которое в то время воспринималось как рекордно высокое. Последнее позволяло называть конвейерные ВС как суперЭВМ (Supercomputers). Конвейерные ВС имели аппаратурно реализованные команды, позволявшие выполнять операции над векторами данных. Поэтому такие ВС называли также векторными компьютерами (Vector Computers).*

*В главе рассмотрена каноническая структура конвейерного процессора и промышленные ВС на ее основе. Описаны параллельно-векторные ВС (PVP-системы), которые представляются связным множеством одновременно функционирующих конвейерных (векторных) процессоров, а также конвейерные ВС с массовым параллелизмом (MPP-системы).*

*Наконец, читателю будет предоставлена возможность изучить архитектуру сверхвысокопроизводительных ВС первого десятилетия XXI в., которые основываются на достижениях и PVP-, и MPP-систем.*

### 4.1. Каноническая функциональная структура конвейерного процессора

В конвейерных ВС основной объем операций по обработке данных выполняется одним или несколькими конвейерными процессорами (или кратко: конвейерами). Конвейеры оперируют с векторами данных, которые являются *одномерными массивами или одномерными упорядоченными совокупностями элементов данных одного типа*. Если воспользоваться терминами алгебры матриц, то вектор данных — это или столбец, или строка, или диагональ двумерной матрицы, либо матрица-столбец или матрица-строка вида:

$$\mathbf{A} = \|A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\| = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n),$$

где  $A_i$  —  $i$ -й компонент (или элемент, или элемент-операнд, или скалярная величина, или просто «скаляр», или число),  $i = \overline{1, n}$ .

## 5. МАТРИЧНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Матричные ВС обладают более широкими архитектурными возможностями, чем конвейерные ВС: их каноническая архитектура относится к классу SIMD. Матричные ВС — системы с массовым параллелизмом (Massively Parallel Processing Systems), следовательно, они не имеют принципиальных ограничений в наращивании своей производительности.*

*Матричные ВС предназначены для решения сложных задач, связанных с выполнением операций над векторами, матрицами и массивами данных (Data Arrays).*

*Работы по созданию матричных систем были начаты в 60-х годах XX столетия, первые высокопроизводительные ( $10^8$  опер./с ) реализации ВС появились в 1970-х годах. Современные ВС, которые завершают архитектурный ряд матричных систем, обладают быстродействием порядка  $10^{12}$  опер./с.*

*В главе 5 рассмотрены каноническая структура матричного процессора и первые промышленные матричные ВС, освещено текущее состояние в указанной области и проанализированы архитектуры данного класса ВС.*

### 5.1. Каноническая функциональная структура матричного процессора

*Матричный, или векторный процессор (Array Processor) представляет собой «матрицу» связанных идентичных элементарных процессоров (ЭП), управляемых одним потоком команд (рис. 5.1). Каждый ЭП включает в себя АЛУ, память и локальный коммутатор. Сеть связей между ЭП (точнее, локальными коммутаторами) позволяет осуществлять обмен данными между любыми процессорами. Поток команд поступает на матрицу ЭП от единого устройства управления (SIMD-архитектура, в каноническом виде).*

*Архитектура матричного процессора была выбрана в начале 60-х годов XX в. и обоснована существовавшими экономическими ограничениями и необходимостью обеспечения высокой производительности при решении сложных задач. В самом деле, в то время основная доля стоимости ЭВМ приходилась на схемы устройства управления, а не на схемы АЛУ или*

## 6. МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Семантика термина «Мультимикропроцессорные вычислительные системы» предопределяет средства обработки информации, каждое из которых имеет в своем составе множество процессоров. Если ограничиться только такой интерпретацией, тогда в класс мультимикропроцессорных попадут все параллельные ВС, независимо от их архитектурных особенностей (в частности, конвейерные и матричные ВС, см. гл. 4 и 5).*

*Мультимикропроцессорные (или многопроцессорные) ВС — класс параллельных средств обработки информации, которые характеризуются тремя особенностями:*

- *МIMD-архитектурой;*
- *множеством процессоров;*
- *единым общедоступным ресурсом (как правило, общей оперативной памятью).*

*С развитием архитектуры ВС границы между различными каноническими классами систем стираются, уже сейчас они в достаточной степени условны.*

### 6.1. Каноническая функциональная структура микропроцессора

По определению микропроцессорная ВС — средство обработки информации, в котором имеется множество процессоров, взаимодействующих между собой через единый ресурс. В качестве единых ресурсов выступают машины-посредники, внешние запоминающие устройства, оперативная память, коммутаторы, общие шины и т. п.

Анализ микропроцессорных ВС и тенденций их развития позволяет считать в качестве канонической функциональную структуру микропроцессора, представленную на рис. 6.1. Микропроцессор — это композиция, в которой выделяются подмножество элементарных процессоров (ЭП), подмножество модулей памяти (МП) и коммутатор, обеспечивающий взаимодействие между любыми элементами различных подмножеств. Подмножество модулей памяти МП<sub>1</sub>– МП<sub>м</sub> является общей памятью для всех про-

## **7. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ**

*Десять лет, прошедшие с момента появления первой ЭВМ, позволили выявить пределы в развитии средств обработки информации на основе концептуальной машины Дж. фон Неймана и на основе модели вычислителя (см. § 2.10). Исследователи и проектировщики средств обработки информации уже в начале 60-х годов XX в. пришли к пониманию необходимости технической реализации новых принципов обработки информации.*

*Исследования по ВС, основанным на модели коллектива вычислителей, были начаты в Институте математики Сибирского отделения АН СССР в начале 1960-х годов по инициативе математика и механика С.Л. Соболева (1908–1989; академик АН СССР с 1939 г.). Результатом этих исследований явилось научно-техническое направление «Вычислительные системы с программируемой структурой». Такие системы обладают способностью адаптации под структуры и параметры решаемых задач.*

*В главе 7 приведены основные понятия ВС с программируемой структурой и описаны архитектуры систем «Минск-222», МИНИМАКС, СУММА, МИКРОС, МВС.*

### **7.1. Понятие о вычислительных системах с программируемой структурой**

В гл. 4–6 было показано, что в конвейерных, матричных и мультипроцессорных ВС принципы модели коллектива вычислителей воплощены недостаточно полно. Пожалуй, самым главным недостатком архитектуры таких ВС является наличие единого ресурса (устройства управления, управляющей ЭВМ, коммутатора и т. п.). Отказ единого ресурса приводит к отказу ВС в целом, что неприемлемо даже с позиций надежности и живучести. Единый ресурс не позволяет организовать мультипрограммную работу, при которой на различных подсистемах — связанных подмножествах технических ресурсов (элементарных процессорах) — будут выполняться одновременно различные программы.

## 8. ТРАНСПЬЮТЕРНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

*Развитие средств обработки информации всегда основывалось на перспективных технико-экономически обоснованных архитектурных и структурных решениях и на технологических достижениях в области элементной базы. Ярким примером гармонического сочетания этих факторов могут служить высокопроизводительные средства (1980-е годы), получившие название «Транспьютерные вычислительные системы». Такие ВС нашли применение во многих областях науки, техники и экономики, они внедрили в технику обработки данных архитектурные принципы модели коллектива вычислителей.*

*Транспьютерные ВС сыграли свою выдающуюся роль в развитии средств обработки информации с массовым параллелизмом. Они, безусловно, послужат основой будущих разработок суперВС как ансамблей микропроцессоров, размещаемых на крупномасштабных (неразрезных) полупроводниковых пластинах.*

*В данной главе будут даны понятие о транспьютерных ВС и описания архитектур транспьютеров семейств T200, T400, T800 и T9000 фирмы Inmos Ltd. (Великобритания).*

### 8.1. Понятие о транспьютерных вычислительных системах

#### 8.1.1. Предпосылки создания транспьютерных вычислительных систем

Совершенствование параллельных средств обработки информации — ВС — базируется главным образом на достижениях в области архитектуры. При этом развивается и макроархитектура ВС (архитектура коллектива вычислителей-микропроцессоров), и микроархитектура (архитектура микропроцессора).

Современная элементная база ВТ — это многоразрядные микропроцессоры с тактовой частотой до 100 ГГц. Эмпирический закон Мура (Gordon Moore, одного из основателей фирмы Intel) свидетельствует о том, что каж-

## 9. НАДЕЖНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Понять архитектуру ВС, оценить их функциональный потенциал невозможно без анализа эффективности. Специфика современных ВС не позволяет решить проблемы их эффективности путем прямой трансформации методов существующей теории эффективности систем и ЭВМ. В ходе исследований по проблемам эффективности ВС потребовалось:*

- а) ввести показатели качества функционирования ВС, которые устанавливали бы взаимосвязь между производительностью, надежностью, живучестью и технико-экономической эффективностью;*
- б) создать нетрудоемкий и адекватный математический аппарат для расчета этих показателей; провести численный анализ качества функционирования ВС;*
- в) разработать технологию экспресс-анализа эффективности функционирования ВС.*

*В данной главе изучается надежность (Reliability) распределенных ВС. Под надежностью ВС будем понимать свойство системы сохранять заданный уровень производительности путем программной настройки ее структуры и программной организации функционального взаимодействия между ее ресурсами.*

### 9.1. Производительность вычислительных систем

Содержание гл. 4–8 (а также [5, 6]) убеждает в том, что современными высокопроизводительными средствами обработки информации являются распределенные ВС (Distributed Computer Systems), системы с массовым параллелизмом (Massively Parallel Processing Systems). Число функционально-конструктивных элементов обработки информации (ЭМ или процессоров) в таких ВС уже сейчас составляет порядка  $10^6$ . Это обстоятельство дает основание специалистам в области анализа эффективности (производительности, надежности, живучести и технико-экономической эффективности) средств обработки информации называть распределенные ВС большемасштабными (Large-Scalable Computer Systems).

Полнота воплощения принципов модели коллектива вычислителей определяет архитектурную гибкость ВС. Отмечалось, что современные рас-



## 10. ЖИВУЧЕСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*В главе изучается одно из замечательных свойств распределенных ВС с программируемой структурой — живучесть (Robustness). Данным свойством ЭВМ не обладают, живучесть — это отличительная особенность средств обработки информации, основанных на модели коллектива вычислителей (см. § 3.1).*

*Живучесть является более емким понятием, чем надежность ВС. Под живучестью понимается способность ВС (достигаемая программной организацией структуры и функционального воздействия между ее компонентами) в любой момент функционирования использовать суммарную производительность всех исправных ресурсов для решения задач.*

*Изучение проблемы живучести основывается на парадигме, получившей название живучей ВС и являющейся обобщением ВС со структурной избыточностью (см. § 9.2). В данной главе вводятся показатели потенциальной живучести ВС и предлагается оригинальная методика их расчета, базирующаяся на континуальной стохастической модели. Адекватность модели обосновывается большемасштабностью распределенных ВС или, говоря иначе, их массовым параллелизмом — большим количеством ЭМ (до  $10^6$ ). Такая методология имеет свой аналог в механике сплошных сред.*

### 10.1. Живучие вычислительные системы

Живучесть ВС должна достигаться при решении задач, представленных программами с любым допустимым числом параллельных ветвей или, что то же самое, с любым рангом  $r$ ,  $1 \leq r \leq N$ , где  $N$  — общее количество ЭМ в системе. Исключение не должны составлять задачи с переменным рангом  $\tilde{r}$ , допускающим варьирование от  $r^\circ$  до  $r^*$ ,  $1 \leq r^\circ, r^* \leq N$ ,  $r^\circ \leq \tilde{r} \leq r^*$ . Живучесть должна обеспечиваться и в монопрограммном, и в мультипрограммных режимах работы ВС. При монопрограммном режиме для определенности будем полагать, что переменный ранг задачи характеризуется величинами  $r^\circ = n$  и  $r^* = N$ . Величина  $n$  одновременно является и нижней границей количества работоспособных ЭМ (считается, что при количестве отказавших

## **11. ОСУЩЕСТВИМОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

*В данной главе изучаются вероятностные закономерности, связанные с решением задач на распределенных ВС. Любая ВС является стохастическим объектом, никакая технология БИС, никакие архитектурные решения не гарантируют абсолютную надежность ее ресурсов. Процесс поступления задач на ВС является также случайным, и каждая задача характеризуется вектором вероятностных параметров в общем случае.*

*В главах 9 и 10 рассмотрены потенциальные возможности ВС по обеспечению необходимых уровней производительности при решении сложных задач (см. разд. 3.3.4), представленных параллельными программами соответственно с фиксированными и переменными количествами ветвей.*

*Показатели надежности и живучести оценивают качество работы ВС вне связи с процессами поступления и решения задач. Поэтому для оценки потенциальных возможностей ВС по достижению цели их функционирования (решения поступивших задач) используют показатели осуществимости решения задач. Эти показатели достаточно полно характеризуют качество работы систем с учетом их надежности и параметров поступающих задач. Говоря иначе, они характеризуют процесс решения задач на неабсолютно надежных ВС.*

### **11.1. Режимы функционирования вычислительных систем**

Вычислительные системы должны обеспечивать эффективное решение задач в моно- и мультипрограммных режимах. Монопрограммный режим функционирования ВС предопределяет использование всех исправных ресурсов —ЭМ для решения одной сложной задачи (см. разд. 3.3.4 и 7.2.2), представленной параллельной программой. Мультипрограммные режимы работы ВС предусматривают распределение всего множества (исправных) ЭМ между задачами (различной сложности, с различным числом параллельных ветвей в их программах). К последним режимам относятся обработка набора задач и обслуживание потока задач (см. разд. 7.2.2).

## 12. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Экономические закономерности функционирования ЭВМ как автономных объектов изучены в § 2.9. В этой главе с технико-экономических позиций рассмотрено функционирование распределенных ВС, говоря иначе, коллективное поведение ЭМ как ансамблей; введены и рассчитаны показатели, устанавливающие взаимосвязь между производительностью, надежностью и стоимостью систем. При этом проанализирована работа ВС как в переходном, так и в стационарном режимах. Для такого анализа, естественно, необходим соответствующий математический инструментарий. Особое внимание уделено анализу большемасштабных ВС.*

### 12.1. Цена быстрогодействия вычислительных систем

Эмпирический закон Гроша, приведенный в разд. 2.9.2 и устанавливающий взаимосвязь между производительностью и ценой ЭВМ, применим и к одной элементарной машине ВС. Действительно, каждая ЭМ есть композиция ЭВМ и системного устройства или локального коммутатора (см. § 7.3–7.6), следовательно, цена ЭМ

$$v = v_{\text{ЭВМ}} + v_{\text{СУ}},$$

где  $v_{\text{ЭВМ}}$  и  $v_{\text{СУ}}$  — цены ЭВМ и системного устройства соответственно. В условиях ЭВМ второго и третьего поколений, как показано в § 7.3,  $v_{\text{ЭВМ}} \gg v_{\text{СУ}}$ . Даже для мини- и микромашиной техники (см. § 7.4 и 7.6) последнее неравенство справедливо (оно усиливалось при применении расширенных конфигураций мини- и микроЭВМ). Следовательно, технические возможности производства и технологические достижения в элементной базе ЭВМ второго и третьего поколений позволяли при проектировании элементарной машины для ВС руководствоваться законом Гроша:

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П.1. Расчет функции надежности вычислительных систем

При выводе расчетных формул для функции  $R(t)$  надежности распределенных ВС или, что то же самое, для вероятности безотказной работы ВС в переходном режиме (9.6) будем считать, что задано:

$N$  — число ЭМ, составляющих анализируемую систему;

$n$  — число ЭМ, образующих основную подсистему (вычислительное ядро) (см. § 9.2);

$E_0^N = \{0, 1, 2, \dots, n, \dots, N\}$  — пространство состояний ВС;

$E_0^{N-n} = \{0, 1, \dots, N-n\}$  — подмножество начальных состояний ВС;

$m$  — число (виртуальных) ВУ;

$\lambda$  — интенсивность потока отказов в одной ЭМ (2.11);

$\mu$  — интенсивность восстановления отказавших ЭМ одним ВУ (2.18).

Рассчитаем функцию  $R(t)$  надежности ВС, используя технику теории массового обслуживания и методы приближенных вычислений.

Будем полагать, что если система находится в состоянии  $j \in E_0^N$ , то она имеет  $j$  отказавших машин. Тогда  $P_j(t)$  будет вероятностью того, что в системе имеется  $j \in E_0^N$  отказавших машин в момент времени  $t \geq 0$ .

Функция надежности  $R(t)$  является вероятностью того, что на промежутке времени  $[0, t)$  ВС, находящаяся в начальный момент времени в состоянии  $j \in E_0^{N-n}$ , ни разу не войдет ни в одно из состояний подмножества  $E^* = \{N-n+1, N-n+2, \dots, N\}$ . Назовем  $E^*$  *множеством поглощающих состояний*, т. е. таких, которые нельзя покинуть после попадания в них [21].

В силу сделанных предположений функционирование ВС описывается марковским процессом с конечным числом состояний. Поэтому ввиду ординарности потоков отказов и восстановлений

$$R(t) = 1 - P_{N-n+1}(t), \quad (\text{П.1.1})$$

где  $P_{N-n+1}(t)$  можно рассматривать как вероятность того, что за время  $t$  система войдет в состояние  $(N-n+1)$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нейман Дж. фон.* Теория самовоспроизводящихся автоматов: Пер. с англ./ Под ред. В.И. Варшавского. М.: Мир, 1971.
2. *Лебедев С.А., Дашевский Л.Н., Шкабара Е.А.* Малая электронная счетная машина. М.: АН СССР, 1952.
3. *Лебедев Сергей Алексеевич.* К 100-летию со дня рождения основоположника отечественной электронной вычислительной техники. М.: Физматлит, 2002.
4. *Малиновский Б.Н.* История вычислительной техники в лицах. Киев: Фирма «КИТ», ПТОО «А.С.К.», 1995.
5. *Евреинов Э.В., Хорошевский В.Г.* Однородные вычислительные системы. Новосибирск: Наука, 1978.
6. *Хорошевский В.Г.* Инженерный анализ функционирования вычислительных машин и систем. М.: Радио и связь, 1987.
7. *Смирнов А.Д.* Архитектура вычислительных систем. М.: Наука, 1990.
8. *Ховард Р.А.* Динамическое программирование и марковские процессы: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1964.
9. *Диткин В.А., Прудников А.П.* Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965.
10. *Ортега Дж.* Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. М.: Мир, 1991.
11. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. С.-Петербург: БХВ-Петербург, 2002.
12. *Корнеев В.Д.* Параллельное программирование в MPI. Новосибирск: СО РАН, 2000.
13. *Головкин Б.А.* Параллельные вычислительные системы. М.: Наука, 1980.
14. *Евреинов Э.В., Косарев Ю.Г.* О возможности построения вычислительных систем высокой производительности. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962.
15. *Каляев А.В.* Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой. М.: Радио и связь, 1984.
16. *Каляев А.В., Левин И.И.* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Янус-К, 2003.
17. *Евреинов Э.В., Косарев Ю.Г.* Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск: Наука, 1966.
18. *Корнеев В.В.* Архитектура вычислительных систем с программируемой структурой. Новосибирск: Наука, 1985.
19. *Краснов С.А.* Транспьютеры, транспьютерные вычислительные системы и Оккам. В кн. «Вычислительные процессы и системы» / Под ред. Г.И. Марчука. Вып. 7. М.: Наука, 1990.
20. *Транспьютеры.* Архитектура и программное обеспечение/ Под редакцией Г. Харпа. М.: Радио и связь, 1993.
21. *Хинчин А.Я.* Работы по математической теории массового обслуживания. М.: ГИФМЛ, 1963.
22. *Флейшман Б.С.* Статистические пределы эффективности сложных систем // Прикладные задачи технической кибернетики. М.: Сов. радио, 1966.
23. *Пирс У.* Построение надежных вычислительных машин: Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
24. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965.
25. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. М.: Сов. радио, 1972.
26. *Саати Т.Л.* Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Сов. радио, 1971.
27. *Хедли Дж.* Нелинейное и динамическое программирование: Пер. с англ. М.: Мир, 1967.

*Учебное издание*

**Информатика в техническом университете**

**Хорошевский Виктор Гаврилович**

**АРХИТЕКТУРА  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Редактор *Н.Е. Овчеренко*  
Художник *Н.Г. Столярова*  
Компьютерная графика *О.В. Левашиовой*  
Корректор *Г.С. Беляева*  
Компьютерная верстка *С.Ч. Соколовского*

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана

Подписано в печать 09.04.08. Формат 70×100/16.  
Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Гаймс».  
Усл. печ. л. 42,9. Уч.-изд. л. 39,87.  
Тираж 1500 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Отпечатано с готовых диапозитивов в ГУП ППП «Типография «Наука»  
121099, Москва, Шубинский пер., 6