

УДК 004.42(075)+004.738.5(075)  
ББК 3973.4я7  
Б201

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Самарского университета С. А. П р о х о р о в,  
зам. технического директора по ПО и НИОКР, ООО НВФ «Сенсоры,  
Модули, Системы», канд. техн. наук В. Е. З а х а р ч е н к о

***Баландин, Александр Васильевич***

**Б201 Основы программирования приложений реального времени:** учебное пособие /  
*А. В. Баландин*; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,  
Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023. –  
1 CD-ROM (3,0 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

**ISBN 978-5-7883-1994-0**

В учебном пособии изложены теоретические аспекты параллельных вычислений над оперативными данными с ограниченной во времени актуальностью (темпоральными данными), составляющие основу разработки приложений реального времени. Рассмотрены стандартные средства API операционной системы QNX Neutrino, которые используются для программирования процессно-нитевой структуры многопоточного, параллельного и распределённого приложения, осуществляющего вычисления над разделяемыми темпоральными данными в режиме реального времени.

Пособие подготовлено на кафедре программных систем в качестве курса лекций для магистров, обучающихся по направлению подготовки 02.04.02 Фундаментальная информатика и информационные технологии, осваивающих основы и базовые средства программирования приложений реального времени при изучении дисциплины «Технологии промышленного программирования».

Подготовлено на кафедре программных систем.

УДК 004.42(075)+004.738.5(075)  
ББК 3973.4я7

**Минимальные системные требования:**

PC, процессор Pentium, 160 МГц;  
Microsoft Windows XP; мышь;  
дисковод DVD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© Самарский университет, 2023

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ЧАСТЬ 1. ТЕМПОРАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИЯХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. БАЗА ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....</b>	<b>10</b>
1.1. ТЕМПОРАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	10
1.2. СИСТЕМНОЕ И РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ ПРВ .....	11
1.2.1. Модель реального времени .....	11
1.2.2. Одновременность в реальном времени .....	12
1.3. МОДЕЛЬ БАЗЫ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	12
1.4. МОДЕЛЬ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	13
1.5. КЛАССЫ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	14
1.5.1. Датум.....	14
1.5.2. Импульс .....	15
1.5.3. Мода .....	16
1.6. МОДЕЛИ КАНАЛОВ .....	16
1.6.1. Протоколы входных каналов .....	17
1.6.2. Протоколы выходных каналов.....	17
1.7. УПРАВЛЕНИЕ БАЗОЙ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	17
1.7.1. Транзакция актуализации темпорального данного .....	18
1.7.2. Актуализация экзогенных темпоральных данных .....	18
1.7.2.1. Актуализация экзогенного датума .....	18
1.7.2.2. Актуализация экзогенного импульса .....	19
1.7.2.3. Актуализация экзогенной моды .....	20
1.7.3. Актуализация эндогенных темпоральных данных.....	20
1.7.3.1. Актуализация эндогенного датума.....	22
1.7.3.2. Актуализация эндогенного импульса .....	23
1.7.3.3. Актуализация эндогенной моды.....	25
1.8. ЭКСПОРТ ЭКСТЕРНАЛЬНЫХ ДАННЫХ .....	26
1.8.1. Экспорт датума .....	27
1.8.2. Экспорт моды .....	27
1.8.3. Экспорт импульса.....	28
1.9. РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ТЕМПОРАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ.....	28
1.9.1. Распределённая база темпоральных данных.....	28
1.9.2. Репликация распределённых темпоральных данных .....	28
<b>2. РЕЖИМЫ ЖЁСТКОГО И МЯГКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....</b>	<b>30</b>
2.1. ТЕМПОРАЛЬНЫЕ ПРЕЦЕДЕНТЫ .....	30
2.2. РЕЖИМ ЖЁСТКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ .....	31
2.3. РЕЖИМ МЯГКОГО РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ .....	31
2.3.1. Деградация темпоральных данных .....	32
2.3.1.1. Оценка деградации и актуализация экзогенного датума.....	33
2.3.1.2. Оценка деградации и актуализация экзогенного импульса .....	34
2.3.1.3. Оценка деградации и актуализация эндогенного датума .....	35
2.3.1.4. Оценка деградации и актуализация эндогенного импульса.....	36
<b>ЧАСТЬ 2. СРЕДСТВА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ И МЕЖПРОЦЕССНОГО</b>	
<b>ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ .....</b>	<b>38</b>
<b>3. ФАЙЛОВОЕ ПРОСТРАНСТВО QNX .....</b>	<b>38</b>
3.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ФАЙЛОВОГО ПРОСТРАНСТВА QNX.....	38
3.2. БАЗОВАЯ СТРУКТУРА КОРНЕВОГО КАТАЛОГА .....	39
3.3. МОНТИРОВАНИЕ ФАЙЛОВЫХ СИСТЕМ .....	40
3.4. ТИПЫ ФАЙЛОВ.....	41
3.4.1. Обычный файл.....	41
3.4.2. Связь.....	42
3.4.3. Каталог.....	42
3.4.4. Именованный канал.....	42
3.4.5. Сокеты.....	43
3.4.6. Устройства.....	43
3.4.7. Виртуальные устройства.....	43
3.4.7.1. Устройство /dev/null .....	43

3.4.7.2.	Устройство /dev/zero .....	44
3.4.7.3.	Устройство /dev/full .....	44
3.4.7.4.	Устройства генерирования случайных чисел .....	44
<b>4.</b>	<b>ПОЛЬЗОВАТЕЛИ И ГРУППЫ .....</b>	<b>45</b>
4.1.	ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ .....	45
4.2.	СОЗДАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГРУПП .....	45
4.3.	УДАЛЕНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ И ГРУПП .....	46
4.4.	СЕАНС РАБОТЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ .....	46
4.5.	РАЗГРАНИЧЕНИЕ ДОСТУПА К ФАЙЛАМ .....	47
4.6.	ПРАВА ДОСТУПА К ФАЙЛУ .....	48
<b>5.</b>	<b>ПРОГРАММНЫЙ ИНТЕРФЕЙС QNX .....</b>	<b>49</b>
5.1.	СИСТЕМНЫЕ ВЫЗОВЫ И ФУНКЦИИ СТАНДАРТНЫХ БИБЛИОТЕК .....	49
5.2.	ОБРАБОТКА ОШИБОК .....	49
<b>6.</b>	<b>ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ФАЙЛОВОЙ СИСТЕМОЙ .....</b>	<b>51</b>
6.1.	СМЕНА КОРНЕВОГО КАТАЛОГА .....	51
6.2.	СМЕНА ТЕКУЩЕГО КАТАЛОГА .....	51
6.3.	СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА .....	52
6.4.	УДАЛЕНИЕ КАТАЛОГА .....	52
6.5.	СОЗДАНИЕ ЖЁСТКОЙ СВЯЗИ .....	53
6.6.	СОЗДАНИЕ СИМВОЛИЧЕСКОЙ СВЯЗИ .....	53
6.7.	ЧТЕНИЕ СИМВОЛИЧЕСКОЙ СВЯЗИ .....	54
6.8.	ПЕРЕИМЕНОВАНИЕ ФАЙЛА .....	55
6.9.	УДАЛЕНИЕ ФАЙЛА .....	55
6.10.	УПРАВЛЕНИЕ ВЛАДЕЛЬЦАМИ И ПРАВАМИ ДОСТУПА К ФАЙЛАМ .....	56
6.10.1.	Управление владельцами .....	56
6.10.2.	Управление правами доступа .....	57
<b>7.</b>	<b>ФУНКЦИИ БАЗОВОГО ВВОДА/ВЫВОДА ДЛЯ РАБОТЫ С ФАЙЛАМИ .....</b>	<b>60</b>
7.1.	ОТКРЫТИЕ ФАЙЛА .....	60
7.2.	ДОСТУП К ФАЙЛУ .....	64
<b>8.</b>	<b>СТРУКТУРА И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЙ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ .....</b>	<b>66</b>
8.1.	ПРОГРАММЫ, ПРОЦЕССЫ, НИТИ .....	66
8.2.	ПРОЦЕССНО-НИТЕВАЯ СТРУКТУРА ПРВ .....	67
8.3.	БАЗОВАЯ АРХИТЕКТУРА QNX .....	68
8.4.	УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ .....	68
8.4.1.	Жизненный цикл процесса .....	69
8.4.2.	Свойства и атрибуты процесса .....	69
8.4.3.	Идентификаторы процесса .....	70
8.4.4.	Текущий и корневой каталоги .....	71
8.4.5.	Приоритет и дисциплина диспетчеризации процесса .....	72
8.4.6.	Управляющий терминал .....	72
8.5.	ТИПЫ ПРОЦЕССОВ .....	72
8.5.1.	Системные процессы .....	72
8.5.2.	Процессы демоны .....	72
8.5.3.	Прикладные процессы .....	73
8.6.	ГРУППЫ И СЕАНСЫ .....	73
8.7.	ЗАПУСК ПРОЦЕССОВ .....	74
8.7.1.	Запуск процесса из shell .....	75
8.7.2.	Программный запуск процессов .....	75
8.7.2.1.	Функция system() .....	75
8.7.2.2.	Функции семейства exec*() .....	76
8.7.2.3.	Функции семейства spawn*() .....	77
8.7.2.4.	Функция fork() .....	79
8.7.2.5.	Функция vfork() .....	80
8.8.	ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ .....	81
8.8.1.	Создание и удаление каналов .....	81
8.8.1.1.	Создание канала .....	81
8.8.1.2.	Удаление канала .....	81
8.8.2.	Установление и удаление соединений с каналом .....	81

8.8.2.1.	Установление соединения .....	81
8.8.2.2.	Разрыв соединения .....	83
8.9.	ПЕРЕДАЧА СООБЩЕНИЙ .....	83
8.9.1.	Посылка сообщения .....	83
8.9.2.	Приём сообщения .....	84
8.9.3.	Посылка ответа .....	85
8.9.4.	Сценарии ответов .....	86
8.9.5.	Сообщения типа "импульс" .....	87
8.10.	УПРАВЛЕНИЕ СООБЩЕНИЯМИ .....	88
8.10.1.	Управление приёмом сообщений .....	89
8.10.2.	Управление передачей ответа .....	90
8.10.3.	Передача сообщений с использованием векторов ввода/вывода .....	90
<b>9.</b>	<b>ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ В СЕТИ.....</b>	<b>92</b>
9.1.	СЕТЕВАЯ КОНЦЕПЦИЯ QNX .....	92
9.2.	СЕТЕВАЯ НАСТРОЙКА QNX.....	92
9.3.	ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ В СЕТИ .....	93
9.3.1.	Особенности обмена сообщениями в сети.....	93
9.3.2.	Определение дескрипторов удалённых узлов сети .....	95
9.3.3.	Запуск процесса на удалённом узле.....	96
9.4.	ЛОКАЛИЗАЦИЯ СЕРВЕРА .....	99
9.4.1.	Механизм родительского процесса .....	100
9.4.2.	Механизм именованных каналов .....	105
9.4.2.1.	Создание именованного канала .....	105
9.4.2.2.	Соединение с именованным каналом.....	107
9.4.3.	Использование именованных каналов в сети.....	112
<b>ЧАСТЬ 3.</b>	<b>СРЕДСТВА ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ .....</b>	<b>116</b>
<b>10.</b>	<b>ПАРАЛЛЕЛЬНО ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ .....</b>	<b>116</b>
10.1.	ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ И ЗАПУСК НИТИ .....	116
10.1.1.	Прототип функции и атрибуты нити .....	116
10.1.2.	Обособленная или синхронизирующая нить .....	117
10.1.3.	Параметры стека нити .....	117
10.1.4.	Приоритет и дисциплина диспетчеризации нити.....	118
10.1.5.	Создание и запуск нити .....	120
10.2.	ПРОБЛЕМА ИНВЕРСИИ ПРИОРИТЕТОВ.....	121
<b>11.</b>	<b>МЕТОДЫ И ФУНКЦИИ СИНХРОНИЗАЦИИ НИТЕЙ .....</b>	<b>123</b>
11.1.	ПРИСОЕДИНЕНИЕ.....	123
11.2.	БАРЬЕРЫ.....	123
11.3.	МУТЕКСЫ .....	125
11.3.1.	Создание мутекса .....	126
11.3.2.	Свойства мутекса.....	126
11.3.3.	Захват мутекса .....	127
11.3.4.	Осторожный захват мутекса.....	127
11.3.5.	Освобождение мутекса.....	127
11.3.6.	Уничтожение мутекса.....	127
11.3.7.	Создание рекурсивного мутекса .....	128
11.4.	БЛОКИРОВКИ ЧТЕНИЯ/ЗАПИСИ .....	129
11.4.1.	Создание блокировки чтения/записи .....	129
11.4.2.	Свойства блокировки чтения/записи .....	129
11.4.3.	Захват блокировки чтения/записи.....	130
11.4.4.	Осторожный захват блокировки чтения/записи .....	130
11.4.5.	Освобождение блокировки чтения/записи.....	130
11.4.6.	Уничтожение блокировки чтения/записи .....	131
11.5.	УСЛОВНЫЕ ПЕРЕМЕННЫЕ .....	131
11.6.	ЖДУЩИЕ БЛОКИРОВКИ.....	134
11.7.	СЕМАФОРЫ .....	135
11.7.1.	Неименованный семафор.....	136
11.7.2.	Именованные семафоры .....	136
11.7.3.	Управление семафорами.....	137

<b>12. УПРАВЛЕНИЕ ПАМЯТЬЮ ВНЕ АДРЕСНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРОЦЕССОВ .....</b>	<b>140</b>
12.1. СОЗДАНИЕ ИМЕНОВАННОЙ ПАМЯТИ .....	140
12.2. ОРГАНИЗАЦИЯ ДОСТУПА К ИМЕНОВАННОЙ ПАМЯТИ.....	142
12.3. ОРГАНИЗАЦИЯ ДОСТУПА К УСТРОЙСТВАМ ВВОДА/ВЫВОДА.....	145
<b>13. СИГНАЛЫ .....</b>	<b>148</b>
13.1. МЕХАНИЗМ СИГНАЛОВ .....	148
13.2. МЕХАНИЗМ НАДЁЖНЫХ СИГНАЛОВ .....	150
13.2.1. Набор сигналов и маска блокирования .....	151
13.2.2. Установка диспозиции сигнала.....	152
13.3. НАДЁЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИГНАЛАМИ .....	154
13.3.1. Посылка сигнала.....	154
13.3.2. Доставка сигнала процессу и реакция адресата .....	155
13.3.3. Реакция процесса на сигнал.....	156
13.3.4. Ожидание сигнала.....	160
<b>14. МЕХАНИЗМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ НИТЕЙ С РЕАЛЬНЫМ ВРЕМЕНЕМ.....</b>	<b>161</b>
14.1. СИСТЕМНОЕ РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ.....	161
14.1.1. Основные понятия.....	161
14.1.2. Разрешающая способность РВ.....	162
14.1.3. Установка значений абсолютного и интервального времени .....	163
14.2. ТАЙМЕРЫ.....	165
14.2.1. Создание и удаление таймеров.....	165
14.2.2. Типы уведомления нитей .....	166
14.2.3. Уведомление типа "послать импульс".....	166
14.2.4. Уведомление типа "послать сигнал".....	168
14.2.5. Уведомление типа "создать нить".....	168
14.2.6. Планирование срабатывания таймеров .....	169
14.3. ТАЙМАУТЫ ЯДРА.....	174
14.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТАЙМАУТОВ ЯДРА ПРИ ПОСЫЛКЕ СООБЩЕНИЯ .....	176
<b>15. ПРОГРАММИРОВАНИЕ НИТЕЙ ОБРАБОТКИ ПРЕРЫВАНИЙ.....</b>	<b>177</b>
15.1. МЕХАНИЗМ АППАРАТНОГО ПРЕРЫВАНИЯ.....	177
15.2. ОБРАБОТКА ПРЕРЫВАНИЙ В QNX .....	180
15.3. ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ПРЕРЫВАНИЙ .....	181
15.3.1. Определение обработчика прерываний.....	181
15.3.2. Подключение процесса к источнику прерываний .....	182
15.3.2.1. Подключение собственного обработчика прерываний .....	183
15.3.2.2. Установка обработчика прерываний по умолчанию .....	183
15.3.3. Отключение процесса от прерывания .....	184
15.3.4. Управление прерываниями.....	184
15.3.5. Ожидание нитью уведомления о прерывании.....	185
15.3.6. Общий формат процесса с обработкой прерываний .....	185
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>188</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ .....</b>	<b>189</b>
СИСТЕМНЫЕ СИГНАЛЫ СТАНДАРТА POSIX .....	189