

УДК 004.45
ББК 32.973
Э75

К. Эрджиес

Э75 Распределенные системы реального времени. Теория и практика / пер. с англ. В. А. Яроцкий. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 382 с.: ил.

ISBN 978-5-97060-852-4

В книге описываются разработка и реализация программного обеспечения распределенных систем реального времени с использованием подхода «снизу вверх». В начале каждой главы обсуждаются основные концепции, представлен обзор соответствующих методов и доступного ПО. Затем рассматривается реализация концепций в образце ядра, сопровождаемая исполняемым кодом. В завершение главы приводится обширный код на языке C, многочисленные примеры, реализующие описанные методы.

Издание предназначено студентам, инженерам, разработчикам ПО, имеющим базовый опыт работы в области компьютерной архитектуры и операционных систем

УДК 004.45
ББК 32.973

First published in English under the title Distributed Real-Time Systems;

Theory and Practice by K Erciyes, edition: 1

Copyright © Springer Nature Switzerland AG, 2019 *

This edition has been translated and published under licence from Springer Nature Switzerland AG.

Springer Nature Switzerland AG takes no responsibility and shall not be made liable for the accuracy of the transl

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN (анг.) 978-3-030-22569-8
ISBN (рус.) 978-5-97060-852-4

© Springer Nature Switzerland AG 2019
© Оформление, издание, перевод, ДМК Пресс, 2020

Оглавление

Предисловие от автора	15
Предисловие от издательства	18
ЧАСТЬ I. ВВЕДЕНИЕ	19
Глава 1. Введение в системы реального времени.....	21
1.1. Введение	21
1.2. Что такое система реального времени	22
1.3. Базовая архитектура	23
1.4. Характеристики систем реального времени.....	25
1.5. Классификация систем реального времени.....	25
1.6. Пример системы: конвейер бутылок.....	27
1.7. Обзор книги	29
1.8. Контрольные вопросы	29
1.9. Примечания к главе	30
Справочные материалы	30
Глава 2. Аппаратура.....	31
2.1. Введение	31
2.2. Архитектура процессора.....	32
2.2.1. Шина данных с одним циклом	33
2.2.2. Канал передачи данных многими циклами	38
2.2.3. Конвейер	40
2.2.3.1. Риски	43
2.2.4. Микроконтроллеры	46
2.3. Память.....	46
2.3.1. Интерфейс процессора.....	47
2.3.2. Кеш.....	48
2.4. Доступ к вводу/выводу.....	50
2.4.1. Интерфейс устройства ввода	51
2.4.2. Интерфейс устройства вывода	52
2.4.3. Отображение в память и изолированный ввод/вывод	53
2.4.4. Программный интерфейс ввода/вывода	54
2.4.4.1. Опрос	54
2.4.4.2. Ввод/вывод с прерыванием	55
2.4.4.3. Прямой доступ к памяти.....	56
2.4.4.4. Исключения	57
2.4.4.5. Таймеры	57
2.5. Многоядерные процессоры.....	58
2.6. Мультипроцессоры	59
2.7. Контрольные вопросы.....	60
2.8. Примечания к главе	61
2.9. Упражнения	62
Справочные материалы	62

Глава 3. Распределенные системы реального времени	63
3.1. Введение	63
3.2. Модели	64
3.2.1. Распределение по времени и событию	64
3.2.2. Конечные автоматы.....	65
3.3. Распределенные операционные системы реального времени и промежуточное программное обеспечение	68
3.3.1. Промежуточное программное обеспечение.....	69
3.3.2. Распределенное планирование	69
3.3.3. Динамическая балансировка нагрузки	71
3.4. Связь в реальном времени	72
3.4.1. Трафик в реальном времени.....	72
3.4.2. Модель взаимосвязи открытых систем.....	73
3.4.3. Топология	74
3.4.4. Уровень канала передачи данных	76
3.4.4.1. Протоколы доступа к среде.....	77
3.4.5. Протокол контроллерной сети.....	77
3.4.6. Протокол запуска по времени	79
3.4.7. Сеть реального времени Ethernet	80
3.4.8. Стандарт реального времени IEEE 802.11	80
3.5. Проблемы в распределенных системах реального времени со встроенными элементами.....	81
3.6. Примеры распределенных систем реального времени	82
3.6.1. Современный автомобиль	82
3.6.2. Беспроводная мобильная сенсорная сеть	83
3.7. Контрольные вопросы.....	84
3.8. Примечания к главе	85
3.9. Упражнения	86
Справочные материалы	87
 Часть II. СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	 89
 Глава 4. Операционные системы реального времени	 91
4.1. Введение	91
4.2. Общие операционные системы и операционные системы реального времени.....	92
4.3. Управление задачами.....	93
4.3.1. Задача управления в UNIX	95
4.3.2. Синхронизация задач.....	97
4.3.3. Межзадачные коммуникации.....	98
4.3.4. Межпроцессорное взаимодействие в UNIX	101
4.4. Потоки.....	102
4.4.1. Управление потоками	102
4.4.2. Потоки POSIX	103
4.4.2.1. Взаимное исключение	104
4.4.2.2. Синхронизация.....	105
4.4.2.3. Связь.....	106

4.5. Управление памятью	108
4.5.1. Статическое распределение памяти	108
4.5.2. Динамическое распределение памяти	108
4.5.3. Виртуальная память	108
4.5.4. Управление памятью в реальном времени.....	109
4.6. Управление вводом/выводом.....	110
4.6.1. Управляемый прерываниями ввод/вывод.....	110
4.6.2. Драйверы устройств	111
4.7. Обзор операционных систем реального времени	112
4.7.1. Операционная система с открытым кодом RTOS.....	113
4.7.2. Операционная система VxWorks.....	113
4.7.3. Система реального времени Linux	113
4.8. Контрольные вопросы	114
4.9. Примечания к главе	115
4.10. Упражнения по программированию	115
Справочные материалы	116

Глава 5. Проектирование экспериментального

распределенного ядра реального времени.....117

5.1. Введение	117
5.2. Стратегия дизайна	118
5.3. Функции ядра нижнего уровня	119
5.3.1. Структуры данных и операции с очередями	119
5.3.1.1. Тип блока данных	120
5.3.1.2. Тип данных блока управления задачами	121
5.3.2. Планировщик с несколькими очередями	123
5.3.3. Обработка прерываний и управление временем.....	126
5.3.3.1. Дельта-очередь	127
5.3.4. Управление состоянием задачи.....	128
5.3.4.1. Программа обработки прерываний по времени.....	129
5.3.5. Управление вводом/выводом	130
5.4. Функции ядра верхнего уровня	132
5.4.1. Синхронизация задач.....	132
5.4.2. Коммуникация задач.....	136
5.4.3. Управление верхней памятью с использованием пулов	139
5.4.4. Управление задачами.....	140
5.5. Инициализация.....	142
5.6. Тестирование DRTK.....	144
5.7. Контрольные вопросы.....	145
5.8. Примечания к главе	145
5.9. Проекты программирования	146
Справочные материалы	147

Глава 6. Операционные системы реального времени

и промежуточное программное обеспечение..... 148

6.1. Введение	148
---------------------	-----

6.2. Распределенные операционные системы реального времени	149
6.2.1. Интерфейс транспортного уровня	150
6.2.2. Интерфейс уровня канала передачи данных.....	151
6.3. Промежуточное программное обеспечение реального времени.....	153
6.3.1. Группы задач в реальном времени	154
6.3.2. Синхронизация часов.....	155
6.3.2.1. Логические часы	156
6.3.2.2. Векторные часы.....	157
6.3.2.3. Протокол сетевого времени.....	158
6.3.2.4. Алгоритм Беркли.....	160
6.3.2.5. Синхронизация часов в беспроводных сенсорных сетях	160
6.3.3. Алгоритмы выбора	162
6.3.3.1. Выбор в однонаправленном кольце.....	162
6.3.3.2. Выборы в беспроводных сенсорных и мобильных специальных сетях.....	163
6.4. Реализация DRTK	165
6.4.1. Инициализация сети	165
6.4.2. Интерфейс транспортного уровня	167
6.4.3. Задачи интерфейса канального уровня передачи данных.....	171
6.4.4. Групповое управление	173
6.4.5. Алгоритм синхронизации часов.....	175
6.4.6. Выбор лидера в кольце.....	176
6.5. Контрольные вопросы	178
6.6. Примечания к главе	178
6.7. Проекты программирования.....	179
Справочные материалы	179

ЧАСТЬ III. ПЛАНИРОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ.....

181

Глава 7. Задача планирования однопроцессорной независимой задачи.....

183

7.1. Введение	183
7.2. Предпосылки	184
7.2.1. Тест планируемости.....	185
7.2.2. Применение.....	186
7.3. Политики планирования	186
7.3.1. Приоритетное или неприоритетное планирование	186
7.3.2. Статичное или динамичное планирование	188
7.3.3. Независимые или зависимые задачи	189
7.4. Таксономия алгоритмов планирования в реальном времени.....	190
7.5. Потактовое планирование.....	191
7.5.1. Планирование на основе таблиц	191
7.5.2. Циклическое выполнение	193
7.6. Приоритетное планирование.....	195

7.6.1. Монотонное планирование.....	195
7.6.2. Планирование с первым самым крайним сроком	197
7.6.2.1. Аperiodический алгоритм EDF	198
7.6.2.2. Периодический алгоритм EDF	199
7.6.3. Алгоритм наименьшего времени незанятости	201
7.6.4. Анализ времени отклика.....	202
7.7. Аperiodическое планирование задач	203
7.7.1. Основные методы.....	204
7.7.2. Периодические серверы	206
7.7.2.1. Сервер опроса.....	206
7.7.2.2. Отложенный сервер	207
7.7.2.3. Спорадический сервер.....	207
7.7.2.4. Серверы с динамическим приоритетом	207
7.8. Планирование спорадических задач	208
7.9. Реализация в DTRK.....	210
7.9.1. Планировщик монотонного рейтинга	210
7.9.2. Планировщик самого раннего первого срока	212
7.9.3. Планировщик первой наименее занятой задачи	212
7.9.4. Сервер опроса.....	214
7.10. Контрольные вопросы.....	214
7.11. Примечания к главе.....	215
7.12. Упражнения	217
Справочные материалы	218

Глава 8. Планирование однопроцессорной

зависимой задачи	219
8.1. Введение	219
8.2. Планирование зависимых задач.....	220
8.2.1. Алгоритм первым последний конечный срок.....	220
8.2.2. Модифицированный алгоритм первым ранний конечный срок.....	221
8.3. Планирование задач при совместном использовании ресурсов.....	223
8.3.1. Случай марсианского зонда.....	226
8.3.2. Основной протокол наследования приоритетов	227
8.3.3. Протокол приоритетного потолка.....	231
8.4. Реализация DRTK	233
8.4.1. Зависимое планирование задач LDF.....	234
8.4.2. Протокол приоритетного наследования.....	235
8.5. Контрольные вопросы	237
8.6. Примечания к главе	237
8.7. Упражнения	238
Справочные материалы	239

Глава 9. Планирование многопроцессорных

распределенных задач реального времени	240
9.1. Введение	240
9.2. Многопроцессорное планирование.....	241

9.2.1. Раздельное планирование	242
9.2.1.1. Распределение задач	242
9.2.1.2. Алгоритм балансировки использования с EDF	243
9.2.1.3. Алгоритмы	244
9.2.1.4. Алгоритм EDF с упаковкой первое соответствие	246
9.2.1.5. Монотонный алгоритм первое соответствие (RM-FF).....	246
9.2.2. Глобальное планирование	247
9.2.2.1. Глобальный монотонный алгоритм	248
9.2.2.2. Аномалии	249
9.2.2.3. Пропорциональный алгоритм справедливого планирования.....	249
9.3. Распределенное планирование	249
9.3.1. Балансировка нагрузки	250
9.3.1.1. Центральная балансировка нагрузки	250
9.3.1.2. Распределенная балансировка нагрузки	251
9.3.2. Метод целенаправленной адресации и назначения ставок	252
9.3.3. Алгоритм Buddy	253
9.3.4. Планирование сообщений	254
9.4. Реализация DRTK	255
9.4.1. Центральные задачи балансировки нагрузки	255
9.4.2. Задача балансировки распределенной нагрузки	257
9.5. Контрольные вопросы	259
9.6. Примечания к главе	259
9.7. Упражнения	260
Справочные материалы	260
ЧАСТЬ IV. ПРИКЛАДНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	263

Глава 10. Разработка программного обеспечения систем реального времени	265
10.1. Введение	265
10.2. Жизненный цикл разработки программного обеспечения.....	266
10.2.1. Пошаговая модель Waterfall.....	267
10.2.2. V-модель	268
10.2.3. Спиральная модель Spiral Model.....	268
10.3. Разработка программного обеспечения систем реального времени.....	269
10.4. Анализ требований и спецификация	270
10.5. Временной анализ.....	271
10.6. Структурное проектирование с диаграммами потоков данных	272
10.7. Объектно-ориентированное проектирование	274
10.8. Методы реализации в реальном времени.....	275
10.8.1. Еще о конечных автоматах	275
10.8.1.1. Параллельные иерархические конечные автоматы	277
10.8.2. Временные автоматы	278
10.8.3. Сети Петри	279
10.8.3.1. Временные сети Петри.....	282
10.9. Унифицированный язык моделирования в реальном времени.....	283
10.9.1. UML-диаграммы	283
10.9.2. Функции реального времени.....	285

10.10. Метод практического проектирования и реализации	286
10.11. Контрольные вопросы	287
10.12. Примечания к главе	288
10.13. Программирование проектов	289
Справочные материалы	290

Глава 11. Языки программирования в реальном времени 291

11.1. Введение	291
11.2. Требования	292
11.3. Приложение в реальном времени.....	293
11.4. Операционная система C/POSIX в реальном времени.....	293
11.4.1. Инкапсуляция данных и управление модулями	294
11.4.2. Управление потоком POSIX	295
11.4.2.1. Управление временем	296
11.4.2.2. Синхронизация потоков и связь	297
11.4.2.3. Сигналы.....	297
11.4.2.4. Взаимное исключение.....	298
11.4.2.5. Условная синхронизация	299
11.4.2.6. Семафоры.....	299
11.4.3. Обработка исключений и низкоуровневое программирование	300
11.4.4. Реализация управления процессом C/POSIX в реальном времени.....	300
11.5. Ада.....	302
11.5.1. Параллелизм	303
11.5.1.1. Управление временем	304
11.5.1.2. Periodic Tasks.....	304
11.5.1.3. Приоритеты задач	305
11.5.1.4. Синхронизация задач и связь.....	305
11.5.2. Обработка исключений	306
11.5.3. Реализация управления процессами на языке ADA.....	308
11.6. Язык программирования Java	309
11.6.1. Потоки Java.....	310
11.6.2. Синхронизация потоков	311
11.6.2.1. Управление временем и расписание	311
11.6.3. Обработка исключений	312
11.7. Контрольные вопросы.....	312
11.8. Примечания к главе	313
11.9. Упражнения по программированию	314
Справочные материалы	314

Глава 12. Отказоустойчивость 315

12.1. Введение	315
12.2. Понятия и терминология.....	316
12.3. Классификация неисправностей	317
12.4. Резервирование.....	318
12.4.1. Аппаратное резервирование	318
12.4.2. Избыточность информации.....	320
12.4.2.1. Кодирование	320

12.4.3. Резервирование времени	322
12.4.4. Резервирование программного обеспечения.....	323
12.4.4.1. Методы с одной версией.....	323
12.4.4.2. Многократное резервирование.....	324
12.5. Отказоустойчивые системы реального времени.....	325
12.5.1. Статичное планирование	326
12.5.2. Динамическое планирование	326
12.6. Отказоустойчивость в распределенных системах реального времени.....	327
12.6.1. Классификация отказов	327
12.6.2. Пересмотр состава целевых групп	328
12.6.2.1. Надежная многоадресная связь	328
12.7. Реализация DRTK.....	331
12.8. Контрольные вопросы	334
12.9. Примечания к главе	335
12.10. Упражнения	335
Справочные материалы	336

Глава 13. Тематический пример: мониторинг окружающей среды по беспроводной сенсорной сети

13.1. Введение	338
13.2. Вопросы проектирования.....	339
13.3. Требования к спецификации	339
13.4. Временной анализ и функциональные характеристики	340
13.5. Связующее дерево и кластеризация.....	341
13.6. Вопросы проектирования.....	345
13.7. Листовой узел	346
13.7.1. Дизайн высокого уровня	347
13.7.2. Детальная разработка и реализация	349
13.8. Промежуточный узел.....	355
13.8.1. Дизайн верхнего уровня.....	355
13.8.2. Детальное проектирование и реализация	356
13.9. Узел управления кластером.....	360
13.9.1. Дизайн высокого уровня	361
13.9.1. Дизайн верхнего уровня.....	361
13.10. Приемник.....	364
13.10.1. Дизайн высокого уровня	364
13.11. Тестирование	365
13.12. Альтернативная реализация с потоками POSIX	367
13.13. Примечания к главе	367
13.14. Упражнения по программированию	368
Справочные материалы	368

Приложение А. Соглашение о псевдокоде

Приложение В. Функции нижнего ядра

Предметный указатель