

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Бочкарьов О. Ю.

Паралельне програмування в ОС Linux

Навчальний посібник

з дисципліни

для студентів галузі знань «12 Інформаційні технології»
спеціальності 123 «Комп’ютерна інженерія»

Видавець Марченко Т.В.
Львів 2024

УДК 004.4
Б 72

Рецензенти:

- Рак Т. Є.**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій, проректор з науково-педагогічної роботи ПЗВО “ІТ СТЕП Університет”;
- Ткачук Р. Л.**, доктор технічних наук, професор, начальник кафедри управління інформаційною безпекою, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності;
- Глухов В. С.**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Національний університет “Львівська політехніка”

*Рекомендовано Науково-методичною радою
Національного університету “Львівська політехніка”
як навчальний посібник для студентів спеціальності 123 “Комп’ютерна інженерія”
(протокол № 65 від 20 жовтня 2022 р.)*

Бочкарьов О. Ю.

Б 72 **Паралельне програмування в ОС Linux** : навч. посібник /
О. Ю. Бочкарьов. – Львів: Видавець Марченко Т.В., 2024. – 201 с.

ISBN 978-617-7937-92-9

В навчальному посібнику розглянуто основи паралельного програмування в ОС Linux на рівні обчислювальних процесів та на рівні програмних потоків. Основна увага приділена способам організації взаємодії паралельних процесів в ОС Linux та технологіям паралельного програмування.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності 123 “Комп’ютерна інженерія” галузі знань 12 “Інформаційні технології”.

УДК 004.4

ISBN 978-617-7937-92-9

© Бочкарьов О. Ю., 2024
© Видавець Марченко Т.В., 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Паралельні обчислення в ОС Linux.....	8
1.1. Організація паралельних обчислень.....	8
1.1.1. Проблема організації паралельних обчислень.....	8
1.1.2. Паралельні комп'ютерні системи.....	10
1.1.3. Паралельне програмування.....	12
1.1.4. Способи організації паралельних обчислень.....	14
1.2. Паралельні обчислювальні процеси в ОС Linux.....	17
1.2.1. Організація обчислювальних процесів в ОС Linux.....	17
1.2.2. Запуск та породження нових процесів в ОС Linux.....	19
1.2.3. Запит та встановлення атрибутів процесу в ОС Linux.....	22
1.2.4. Завершення виконання процесів в ОС Linux.....	23
1.2.5. Організація взаємодії обчислювальних процесів в ОС Linux.....	26
Контрольні питання.....	28
2. Взаємодія обчислювальних процесів в ОС Linux.....	30
2.1. Неіменовані та іменовані канали.....	30
2.1.1. Неіменовані канали (anonymous pipes).....	30
2.1.2. Створення неіменованого каналу.....	32
2.1.3. Робота з неіменованим каналом.....	33
2.1.4. Іменовані канали (named pipes).....	35
2.2. Об'єкти System V IPC.....	38
2.2.1. Права доступу до об'єктів System V IPC.....	38
2.2.2. Режими іменування об'єктів System V IPC.....	39
2.2.3. Робота з об'єктами System V IPC в командному рядку.....	42
2.3. Черги повідомлень (message queues).....	44
2.3.1. Взаємодія процесів з використанням черги повідомлень.....	44
2.3.2. Створення черги повідомлень.....	45
2.3.3. Відправлення та отримання повідомлень з черги.....	46
2.3.4. Управління чергою повідомлень.....	49
2.4. Спільна пам'ять (shared memory).....	51
2.4.1. Взаємодія процесів з використанням спільної пам'яті.....	51
2.4.2. Створення сегменту спільної пам'яті.....	52
2.4.3. Підключення та відключення сегменту спільної пам'яті.....	53
2.4.4. Управління сегментом спільної пам'яті.....	54
2.4.5. Відображення файлів у пам'ять.....	55
2.4.6. Взаємодія процесів за допомогою файлів відображених у пам'ять.....	57
2.4.7. Спільне використання файлів паралельними процесами.....	58

2.5. Семафори (semaphores).....	62
2.5.1. Використання семафорів в ОС Linux.....	62
2.5.2. Створення множини семафорів.....	65
2.5.3. Здійснення операцій над семафорами.....	66
2.5.4. Управління множиною семафорів.....	70
2.5.5. Способи використання семафорів.....	73
2.5.6. Програмний інтерфейс для роботи з семафорами стандарту POSIX.....	75
2.5.7. Реалізація механізму семафорів за допомогою системного виклику eventfd().....	76
2.6. Сигнали (signals).....	78
2.6.1. Використання сигналів в ОС Linux.....	78
2.6.2. Надсилання сигналу обчислювальному процесу.....	81
2.6.3. Встановлення диспозиції сигналу.....	83
2.6.4. Маскування сигналів.....	85
2.6.5. Створення обробника сигналу.....	86
2.6.6. Отримання сигналу обчислювальним процесом.....	87
2.6.7. Організація взаємодії процесів за допомогою сигналів.....	89
2.7. Сокети Берклі (Berkeley sockets).....	92
2.7.1. Взаємодія процесів за допомогою сокетів Берклі.....	92
2.7.2. Структура адреси сокету.....	93
2.7.3. Створення сокету.....	98
2.7.4. Встановлення з'єднання.....	100
2.7.5. Відправлення та отримання повідомлень.....	101
2.7.6. Розрив з'єднання та знищення сокету.....	102
Контрольні питання.....	104
3. Програмні потоки в ОС Linux.....	107
3.1. Програмні потоки (threads).....	107
3.1.1. Паралельні обчислення на рівні програмних потоків.....	107
3.1.2. Переваги та недоліки використання програмних потоків.....	110
3.2. Інтерфейс прикладного програмування POSIX Threads (Pthreads).....	112
3.2.1. Використання POSIX Threads.....	112
3.2.2. Створення та ідентифікація програмних потоків.....	113
3.2.3. Завершення виконання програмних потоків.....	116
3.2.4. Очікування на завершення програмних потоків.....	118
3.2.5. Управління атрибутами програмних потоків.....	119
3.3. Синхронізація програмних потоків в POSIX Threads.....	122
3.3.1. Синхронізація потоків за допомогою м'ютексів.....	122
3.3.2. Синхронізація потоків за допомогою умовних змінних.....	127
3.3.3. Блокування читання-запису (readers–writer lock).....	132
3.3.4. Спін-блокування (spinlock).....	134

3.3.5. Бар'єрна синхронізація програмних потоків.....	136
Контрольні питання.....	138
4. Технології паралельного програмування	
OpenMP та oneTBB.....	140
4.1. Інтерфейс прикладного програмування OpenMP.....	140
4.1.1. Організація паралельних обчислень за допомогою OpenMP.....	140
4.1.2. Використання OpenMP.....	142
4.1.3. Складові компоненти OpenMP.....	144
4.1.4. Опис паралельних частин програми.....	144
4.1.5. Управління кількістю програмних потоків.....	146
4.1.6. Управління класами змінних в OpenMP.....	148
4.1.7. Розподіл обчислювальних завдань між потоками.....	149
4.2. Розподіл обчислювального навантаження та синхронізація в OpenMP..	151
4.2.1. Розподіл обчислювального навантаження між потоками.....	151
4.2.2. Виконання блоку коду підмножиною потоків.....	154
4.2.3. Бар'єрна синхронізація потоків.....	156
4.2.4. Критичні секції коду та атомарні операції.....	157
4.3. Бібліотека паралельного програмування oneTBB.....	159
4.3.1. Організація паралельних обчислень за допомогою oneTBB.....	159
4.3.2. Структура бібліотеки паралельного програмування oneTBB.....	161
4.3.3. Паралельне виконання ітерацій циклу за допомогою <code>tbb::parallel_for</code>	163
4.3.4. Розподіл обчислювального навантаження між потоками у <code>tbb::parallel_for</code>	165
Контрольні питання.....	168
5. Паралельне програмування в розподілених системах.....	170
5.1. Програмний інтерфейс MPI.....	170
5.1.1. Організація обчислень в розподіленій системі за допомогою MPI.....	170
5.1.2. Основні службові функції MPI.....	173
5.1.3. Відправка та отримання повідомлень з блокуванням.....	175
5.1.4. Відправка та отримання повідомлень без блокування.....	177
5.2. Комунікатори та колективна взаємодія процесів в MPI.....	179
5.2.1. Використання комунікаторів для роботи з групами процесів.....	179
5.2.2. Колективна взаємодія процесів в MPI.....	182
5.2.3. Бар'єрна синхронізація процесів в MPI.....	186
Контрольні питання.....	189
Термінологічний словник.....	191
Література.....	199

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Бочкарьов Олексій Юрійович

Паралельне програмування в ОС Linux

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Підписано до друку з оригінал-макета 26.11.2023 р.

Формат 70×100 1/16 . Папір офсетний.

Друк цифровий.

Умовн. друк. арк. 16,33.

Гарнітура Таймс Нью-Роман. Тираж 50 прим.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції:
серія ДК № 6784 від 30.05.2019 року, видане
Державним комітетом телебачення і радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавця Марченко Т. В.