

# Programowanie równoległe i rozproszone

Praca zbiorowa pod redakcją **Andrzeja Karbowskiego**  
**i Ewy Niewiadomskiej-Szynkiewicz**

23 października 2009

# Spis treści

Przedmowa . . . . .	9
1. Wprowadzenie . . . . .	13
1.1. Pojęcia podstawowe . . . . .	13
1.2. Przykłady zastosowania obliczeń równoległych . . . . .	15
2. Miary efektywności zrównoleglenia . . . . .	19
2.1. Współczynnik przyśpieszenia oraz wydajność. Prawo Amdahla oraz Gustafsona-Barsisa . . . . .	19
2.2. Sprawność oraz skalowalność . . . . .	23
3. Architektury maszyn równoległych . . . . .	25
3.1. Najważniejsze trendy na rynku procesorów . . . . .	25
3.2. Klasyfikacja maszyn równoległych . . . . .	28
3.3. Maszyny typu SISD . . . . .	30
3.4. Maszyny typu SIMD . . . . .	31
3.4.1. Maszyny SM-SIMD . . . . .	31
3.4.2. Maszyny DM-SIMD . . . . .	32
3.5. Maszyny MIMD . . . . .	33
3.5.1. Maszyny SM-MIMD . . . . .	33
3.5.2. Maszyny DM-MIMD . . . . .	37
3.5.3. Klastry i gridy . . . . .	45
3.5.3.1. Klastry . . . . .	45
3.5.3.2. Gridy . . . . .	46
4. Wprowadzenie do programowania równoległego . . . . .	51
4.1. Podstawowe narzędzia służące do zrównoleglania . . . . .	51
4.2. Elementy programowania wektorowego oraz wykorzystującego karty graficzne (GPGPU) . . . . .	53
4.2.1. Obliczenia z wykorzystaniem wektorowych jednostek wykonawczych . . . . .	53
4.2.2. Obliczenia z wykorzystaniem kart graficznych . . . . .	57
4.2.2.1. Wprowadzenie . . . . .	57
4.2.2.2. Przykładowy program realizujący obliczenia z wykorzystaniem GPU . . . . .	59
4.3. Elementy programowania równoległego specyficzne dla maszyn z pamięcią wspólną . . . . .	60
4.3.1. Procesy i wątki . . . . .	60
4.3.2. Mechanizmy komunikacji i synchronizacji między zadaniami . . . . .	63
4.3.2.1. Wspólna pamięć . . . . .	63
4.3.2.2. Zamek . . . . .	64
4.3.2.3. Semafor . . . . .	67
4.3.2.4. Bariera . . . . .	68
4.3.2.5. Zmienne warunków i monitory . . . . .	69
4.4. Elementy programowania równoległego specyficzne dla maszyn z pamięcią lokalną . . . . .	70
4.4.1. Mechanizmy standardowe oparte na przesyłaniu komunikatów . . . . .	70
4.4.2. Mechanizmy wirtualnej pamięci wspólnej . . . . .	71
4.5. Elementy programowania równoległego specyficzne dla sieci komputerowych . . . . .	73
4.5.1. Wstęp . . . . .	73
4.5.2. Sieci lokalne . . . . .	74
4.5.3. Sieć globalna . . . . .	75
4.6. Podstawowe modele programów równoległych . . . . .	76

5. Programowanie równoległe na komputerach wieloprocesorowych (wielordzeniowych) z pamięcią wspólną . . . . .	78
5.1. Identyfikatory, uchwyt i nazwy obiektów . . . . .	79
5.2. Funkcje systemowe systemu UNIX . . . . .	83
5.2.1. Procesy . . . . .	83
5.2.2. Potoki anonimowe – najprostsze narzędzie do komunikacji i synchronizacji . . . . .	87
5.2.3. Potoki nazwane . . . . .	90
5.2.4. Mechanizmy komunikacji międzyprocesowej (IPC) Systemu V . . . . .	92
5.2.4.1. Pamięć wspólna . . . . .	92
5.2.4.2. Semafor w systemie UNIX . . . . .	94
5.2.5. Kolejki komunikatów . . . . .	96
5.3. Funkcje systemowe systemu MS Windows . . . . .	98
5.3.1. Procesy . . . . .	99
5.3.2. Potoki anonimowe . . . . .	103
5.3.3. Potoki nazwane . . . . .	105
5.3.4. Wątki . . . . .	113
5.3.4.1. Lokalne zmienne wątku . . . . .	115
5.3.4.2. Obiekt „sekcja krytyczna” . . . . .	116
5.3.5. Pamięć wspólna . . . . .	116
5.3.6. Kolejki komunikatów . . . . .	118
5.3.7. Semafor w systemie Windows . . . . .	119
5.3.7.1. Zamek . . . . .	121
5.3.7.2. Obiekt „zdarzenie” . . . . .	122
5.3.7.3. Oczekiwanie na wiele obiektów . . . . .	124
5.4. Biblioteka Pthreads . . . . .	126
5.4.1. Wątki . . . . .	129
5.4.2. Zmienne specyficzne, czyli prywatne zmienne wątków w pamięci globalnej . . . . .	133
5.4.3. Wątki a sygnały . . . . .	136
5.4.4. Zamek biblioteki Pthreads . . . . .	137
5.4.5. Zamek czytelnicy–pisarze . . . . .	142
5.4.6. Bariera . . . . .	142
5.4.7. Zmienna warunku . . . . .	144
5.4.7.1. Programy przykładowe . . . . .	146
5.5. Wątki w języku Java . . . . .	148
5.5.1. Synchronizacja wątków . . . . .	151
5.6. Wątki w języku C# . . . . .	157
5.6.1. Synchronizacja wątków . . . . .	159
5.7. Dyrektywy zrównoleglające OpenMP . . . . .	163
5.7.1. Zmienne środowiskowe . . . . .	164
5.7.2. Dyrektywy środowiska OpenMP . . . . .	165
5.7.3. Funkcje biblioteczne . . . . .	175
5.7.4. Przykładowe programy wykorzystujące dyrektywy OpenMP . . . . .	177
6. Programowanie równoległe na komputerach wieloprocesorowych z pamięcią lokalną oraz w sieciach komputerowych oparte na przesyłaniu komunikatów . . . . .	186
6.1. Wprowadzenie . . . . .	186
6.2. Mechanizm gniazdek . . . . .	187
6.2.1. Przesyłanie danych bez tworzenia połączenia . . . . .	189
6.2.2. Ograniczenia komunikacji bezpołączeniowej . . . . .	191
6.2.3. Komunikacja przy użyciu połączeń . . . . .	191

---

6.2.4. Komunikacja synchroniczna i asynchroniczna . . . . .	193
6.2.5. Obsługa wielu gniazdek jednocześnie . . . . .	193
6.2.5.1. Przepytывanie . . . . .	194
6.2.5.2. Funkcja <code>select</code> . . . . .	195
6.2.5.3. Użycie wielu procesów lub wątków . . . . .	196
6.2.5.4. Komunikacja asynchroniczna . . . . .	196
6.2.6. Wady biblioteki gniazdek . . . . .	197
6.3. Interfejs MPI . . . . .	198
6.3.1. Rozpoczęcie i zakończenie korzystania z MPI w programie . . . . .	199
6.3.2. Komunikatory i grupy procesów . . . . .	199
6.3.2.1. Operacje na grupach . . . . .	200
6.3.2.2. Operacje na komunikatorach . . . . .	202
6.3.2.3. Komunikatory zewnętrzne . . . . .	203
6.3.3. Przesyłanie komunikatów . . . . .	205
6.3.3.1. Funkcje komunikacji nieblokującej . . . . .	208
6.3.3.2. Typy pochodne i pakowanie danych . . . . .	211
6.3.3.3. Ocena sposobów komunikacji – rekomendacje . . . . .	214
6.3.4. Komunikacja kolektywna . . . . .	215
6.3.4.1. Synchronizacja za pomocą bariery . . . . .	216
6.3.4.2. Wysłanie komunikatu do grupy procesów . . . . .	216
6.3.4.3. Rozsyłanie danych między członków grupy procesów . . . . .	216
6.3.4.4. Zbieranie danych od grupy procesów . . . . .	217
6.3.4.5. Komunikacja „wszyscy do wszystkich” . . . . .	219
6.3.4.6. Operacje redukcji . . . . .	219
6.3.5. Wirtualne topologie . . . . .	221
6.3.6. Programy przykładowe . . . . .	224
6.3.7. Podsumowanie . . . . .	233
7. Programowanie rozproszone w środowiskach sieciowych oparte na wywołaniach zdalnych procedur . . . . .	234
7.1. Wprowadzenie . . . . .	234
7.2. Architektura klient–serwer . . . . .	234
7.3. RPC . . . . .	242
7.4. RMI (Java) . . . . .	262
7.5. CORBA . . . . .	282
7.6. Usługi sieciowe (Web Services) . . . . .	313
7.6.1. Współdziałanie . . . . .	315
7.6.2. Format WSDL . . . . .	315
7.6.3. Protokół SOAP . . . . .	320
7.6.4. Standard UDDI . . . . .	324
7.6.5. Architektura REST . . . . .	326
7.6.6. Zalety, wady i perspektywy . . . . .	327
7.7. Narzędzia RPC w środowisku .NET . . . . .	328
7.7.1. Serwer . . . . .	329
7.7.2. Klient . . . . .	332
7.7.3. Wybór metody przesyłania danych . . . . .	335
7.7.4. Obiekty <code>Singleton</code> i dzierżawy . . . . .	336
7.7.5. Obiekty aktywowane przez klienta . . . . .	339
7.8. .NET Remoting a Web Services . . . . .	340
7.9. Porównanie mechanizmów . . . . .	341

8. Mechanizmy wirtualnej pamięci wspólnej . . . . .	347
8.1. Co-Array Fortran . . . . .	347
8.1.1. Kotablice i kowspółrzędne . . . . .	348
8.1.2. Identyfikacja obrazów . . . . .	349
8.1.3. Synchronizacja danych oraz sterowania w obrazach . . . . .	350
8.1.4. Funkcje kolektywne . . . . .	352
8.2. UPC – Unified Parallel C . . . . .	353
8.2.1. Kompilacja i uruchamianie aplikacji . . . . .	354
8.2.2. Deklaracja tablic dzielonych, ich partycja i alokacja . . . . .	355
8.2.3. Zrównoleglenie pętli . . . . .	357
8.2.4. Tryby kontroli pamięci . . . . .	357
8.2.5. Synchronizacja . . . . .	358
8.2.6. Wskaźniki . . . . .	361
8.2.7. Kolektywne operacje wymiany danych . . . . .	362
8.2.8. Kolektywne operacje obliczeniowe . . . . .	364
8.2.9. Przykład sesji w klastrze . . . . .	365
8.3. Dyrektywy zrównoleglające OpenMP w klastrach . . . . .	368
8.4. Linda . . . . .	369
9. Przykłady równoległych metod obliczeniowych . . . . .	373
9.1. Równoległe algorytmy synchroniczne . . . . .	373
9.1.1. Rodzaje zrównoleglania . . . . .	373
9.1.2. Rozwiązywanie układów równań liniowych . . . . .	374
9.1.2.1. Zrównoleglenie kodu – algorytm eliminacji Gaussa . . . . .	374
9.1.2.2. Zrównoleglenie metody – algorytm eliminacji Gaussa-Jordana . . . . .	375
9.1.2.3. Zrównoleglenie zadania – metoda blokowa . . . . .	376
9.1.3. Rozwiązywanie układów równań nieliniowych . . . . .	377
9.1.4. Zadania optymalizacji . . . . .	378
9.2. Algorytmy asynchroniczne . . . . .	379
9.2.1. Algorytmy całkowicie asynchroniczne . . . . .	380
9.2.1.1. Odwzorowania zwięzające w normie maksimum . . . . .	383
9.2.1.2. Odwzorowania zachowujące porządek (izotoniczne) . . . . .	389
9.2.2. Obliczenia częściowo asynchroniczne . . . . .	391
9.2.2.1. Rozwiązywanie układów równań liniowych . . . . .	392
9.2.2.2. Algorytm PageRank szeregowania linków w wyszukiwarce . . . . .	393
Dodatek. Język Fortran . . . . .	395
D.1. Wprowadzenie . . . . .	395
D.2. Podstawowe elementy języka Fortran 90 i 95 . . . . .	396
D.2.1. Standardowe typy danych . . . . .	397
D.2.2. Typy danych definiowane przez użytkownika . . . . .	399
D.2.3. Dynamiczne struktury danych . . . . .	400
D.2.4. Instrukcje sterujące . . . . .	401
D.2.5. Podprogramy i moduły . . . . .	405
D.3. Podstawowe elementy języka Fortran 2003 . . . . .	407
D.3.1. Obsługa danych i programowanie zorientowane obiektowo . . . . .	408
D.3.2. Współdziałanie z językiem C . . . . .	412
D.3.3. Wsparcie standardu IEEE dotyczącego liczb zmiennoprzecinkowych . . . . .	417
Bibliografia . . . . .	419
Skorowidz . . . . .	422