

Systemy operacyjne

**Współbieżność i synchronizacja
procesów**

Dariusz Wawrzyniak



Systemy operacyjne

**Plan wykładu**

- Abstrakcja programowania współbieżnego
- Instrukcje atomowe i ich przeplot
- Istota synchronizacji
- Kryteria poprawności programów współbieżnych
- Klasyfikacja mechanizmów synchronizacji
- Wzajemne wykluczania
- Algorytmy wzajemnego wykluczania (alg. Petersona i Lamporta)
- Złożone instrukcje atomowe (**test&set**, **exchange**)

Współbieżność i synchronizacja procesów (2)

Systemy operacyjne

**Wprowadzenie do abstrakcji przetwarzania
współbieżnego**

- Realizacja przetwarzania polega na wykonywaniu instrukcji przez jednostkę przetwarzającą (procesor).
- Instrukcje wykonywane są w kontekście jakiegoś procesu.
- Wykonanie instrukcji (akcja) oznacza zajście zdarzenia w procesie, skutkiem czego jest zmiana stanu procesu.
- Zajście zdarzenia jest zdeterminowane poprzedzającym je stanem procesu.
- Na stan procesu wpływają pośrednio akcje innych procesów w systemie, przejawiające się w stanie współdzielonych zasobów.

Współbieżność i synchronizacja procesów (3)

Systemy operacyjne



Podstawowe definicje i oznaczenia

- C — zbiór instrukcji (operacji), możliwych do wykonania przez jednostkę przetwarzającą (np. dodawanie, odejmowanie, skok, rozgałęzienie warunkowe)
- D — zbiór danych, przetwarzanych (modyfikowanych lub czytanych) w ramach wykonywania operacji przez jednostkę przetwarzającą
- $e(c, O)$ — wykonanie w ramach procesu P_i instrukcji atomowej $c \in C$ na operandach ze zbioru $O \subseteq D$

Współbieżność i synchronizacja procesów (4)

Systemy operacyjne



Stan procesu i zdarzenie

- Stan procesu obejmuje te elementy (wartości zmiennych, rejestrów, stan zasobów), które między innymi determinują następną instrukcję do wykonania.
- Wykonanie instrukcji określane jest jako *zdarzenie* lub *akcja*.
- Zbiór instrukcji do wykonania oraz zależności pomiędzy nimi określone są przez program procesu.
- Zajście zdarzenia zdeterminowane jest zatem przez program oraz bieżący stan procesu.

Współbieżność i synchronizacja procesów (5)

Systemy operacyjne



Proces sekwencyjny

- Proces (wątek) sekwencyjny jest wykonaniem ciągu instrukcji, opisanych przez program dla tego procesu (procedurę dla wątku), w taki sposób, że następna akcja nie rozpocznie się, zanim nie skończy się poprzednia.
- Zdarzenie (akcja) w procesie P_i oznacza zmianę stanu tego procesu, co formalnie opisane jest poprzez odwzorowanie (przejście, tranzycję):
 $L: S_i \times E_i \rightarrow S_i$, gdzie
 S_i — zbiór stanów procesu P_i
 E_i — zbiór zdarzeń w procesie P_i

Współbieżność i synchronizacja procesów (6)

Systemy operacyjne



Relacja lokalnego porządku

- Proces P_i jest ciągiem (skończonym lub nieskończonym) następujących po sobie naprzemiennie stanów i zdarzeń $s_i^0, e_i^1, s_i^1, e_i^2, s_i^2, \dots$, gdzie:
 - s_i^0 — stan początkowy procesu P_i
 - $\forall_{k \geq 0} s_i^k \in S_i$
 - $\forall_{k > 0} e_i^k \in E_i$
 - $\forall_{k \geq 0} L(s_i^k, e_i^{k+1}) = s_i^{k+1}$
- Relację porządku w procesie P_i — odzwierciedlającą kolejność stanów i zdarzeń w ciągu — nazywana będzie lokalnym porządkiem i oznaczana symbolem $\rightarrow_i$

Współbieżność i synchronizacja procesów (7)

Systemy operacyjne



Współbieżna realizacja zbioru procesów

- Zdarzenie w systemie współbieżnym, złożonym z procesów sekwencyjnych $P_1, P_2, \dots, P_n$, oznacza zajście zdarzenia w jednym z procesów.
- Zdarzenie, zmieniając stan jednego procesu, zmienia stan całego systemu, co formalnie opisane jest poprzez odwzorowanie (przejście, tranzycję):
 - $G: \Sigma \times \Lambda \rightarrow \Sigma$, gdzie
 - $\Sigma \subseteq S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ — zbiór stanów systemu
 - $\Lambda = E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n$ — zbiór zdarzeń w systemie

Współbieżność i synchronizacja procesów (8)

Systemy operacyjne



Relacja globalnego porządku

- Przetwarzanie współbieżne zbioru procesów sekwencyjnych $P_1, P_2, \dots, P_n$, jest ciągiem (skończonym lub nieskończonym) następujących po sobie naprzemiennie stanów systemu i zdarzeń $\sigma^0, e^1, \sigma^1, e^2, \sigma^2, \dots$, gdzie:
 - σ^0 — stan początkowy $\langle s_1^0, s_2^0, \dots, s_n^0 \rangle$
 - $\forall_{k \geq 0} \sigma^k \in \Sigma$
 - $\forall_{k > 0} e^k \in \Lambda$
 - $\forall_{k \geq 0} G(\sigma^k, e^{k+1}) = \sigma^{k+1}$
- Relacja porządku w systemie — odzwierciedlająca kolejność stanów i zdarzeń w ciągu — nazywana będzie globalnym porządkiem i oznaczana symbolem $\rightarrow$

Współbieżność i synchronizacja procesów (9)

Systemy operacyjne



Niedeterminizm przetwarzania

- Zdarzenie, które może pojawić się w określonym stanie przetwarzania, określane jest jako zdarzenie dopuszczalne.
- W przetwarzaniu współbieżnym z każdym sekwencyjnym procesem w danym stanie związane jest jedno zdarzenie. W stanie całego przetwarzania jest zatem zbiór zdarzeń dopuszczalnych.
- W zależności od dostępności zasobów (procesora, magistrali systemowej) oraz decyzji planisty, wykonywany będzie jeden z procesów gotowych. Należy więc przyjąć, że zajście jednego ze zdarzeń dopuszczalnych ma charakter losowy.

Współbieżność i synchronizacja procesów (10)

Systemy operacyjne



Przeplot i osiągalność stanu

- Przeplotem jest zbiór zdarzeń Λ , uporządkowany przez relację globalnego porządku $\rightarrow$, spełniającą następujący warunek:

$$\forall e, e' \in \Lambda \exists i \ e \rightarrow_i e' \Rightarrow e \rightarrow e'$$
- Stan σ' systemu jest osiągalny ze stanu σ , co będzie oznaczone przez $\sigma \rightsquigarrow \sigma'$, jeśli zachodzi jeden z warunków:
 - 1) są to te same stany, czyli $\sigma \equiv \sigma'$
 - 2) $\exists e \in \Lambda \ G(\sigma, e) = \sigma'$
 - 3) $\exists \sigma' \in \Sigma \ \sigma \rightsquigarrow \sigma' \wedge \sigma' \rightsquigarrow \sigma'$

Współbieżność i synchronizacja procesów (11)

Systemy operacyjne



Procesy niezależne a procesy współpracujące

- Niech $D_i \subseteq D$ oznacza zbiór danych przetwarzanych przez proces P_i , czyli dla ciągu instrukcji procesu P_i :
 $e_i^1(c_i^1, O_i^1), e_i^2(c_i^2, O_i^2), \dots$

$$D_i = \bigcup_k O_i^k$$
- Dwa procesy, P_i i P_j , są **niezależne**, jeśli

$$D_i \cap D_j = \emptyset$$
- Dwa procesy, P_i i P_j , **współpracują** (są w interakcji), jeśli

$$D_i \cap D_j \neq \emptyset$$

Współbieżność i synchronizacja procesów (12)

Systemy operacyjne



Dane współdzielone a lokalne

- Dane lokalne (prywatne) procesu P_i to takie, które są przetwarzane wyłącznie przez P_i , formalnie zatem jest to zbiór:
$$D_i \setminus \bigcup_{1 \leq j \leq n, j \neq i} D_j$$
- Dane współdzielone przez proces P_i to takie, które przetwarzane są oprócz P_i przez co najmniej jeszcze jeden inny proces, formalnie zatem jest to zbiór:
$$D_i \cap \bigcup_{1 \leq j \leq n, j \neq i} D_j$$

Współbieżność i synchronizacja procesów (13)

Systemy operacyjne



Dane wejściowy i wyjściowe

- Niech $D_i^R \subseteq D_i$ oznacza zbiór danych czytanych przez proces P_i , a $D_i^M \subseteq D_i$ oznacza zbiór danych modyfikowanych przez proces P_i
- Dane wejściowe procesu P_i to takie dane współdzielone, które są czytane przez proces P_i , formalnie zatem jest to zbiór:
$$D_i^R \cap \bigcup_{1 \leq j \leq n, j \neq i} D_j$$
- Dane wyjściowe procesu P_i to takie dane współdzielone, które są modyfikowane przez proces P_i , formalnie zatem jest to zbiór:
$$D_i^M \cap \bigcup_{1 \leq j \leq n, j \neq i} D_j$$

Współbieżność i synchronizacja procesów (14)

Systemy operacyjne



Przykład przetwarzania współbieżnego

```
n: integer := 0; /* zmienna współdzielona */
```

wątki	wątek A	wątek B
instrukcje		
wysokopoziomowe	$n := n + 1$	$n := n + 1$
RISC	load R_A, n add $R_A, 1$ store R_A, n	load R_B, n add $R_B, 1$ store R_B, n
CISC	inc n	inc n

Współbieżność i synchronizacja procesów (15)

Systemy operacyjne



Przykład przeplotu instrukcji RISC

	przeplot 1	przeplot 2
przepływ sterowania	{A} load R _A , n	{A} load R _A , n
	{A} add R _A , 1	{A} add R _A , 1
	{A} store R _A , n	// n = 0
	// n = 1	{B} load R _B , n
	{B} load R _B , n	{B} add R _B , 1
	{B} add R _B , 1	{A} store R _A , n
wartość n	2	1

Współbieżność i synchronizacja procesów (16)

Systemy operacyjne



Przykład przeplotu instrukcji CISC

	przeplot 1	przeplot 2
przepływ sterowania	{A} inc n	{B} inc n
	{B} inc n	{A} inc n
wartość n	2	2

Współbieżność i synchronizacja procesów (17)

Systemy operacyjne



Istota synchronizacji

- Celem synchronizacji jest kontrola przepływu sterowania pomiędzy procesami tak, żeby dopuszczalne stały się tylko przeploty instrukcji zgodne z intencją programisty.
- Synchronizacja na najniższym poziomie polega na wykonaniu specjalnych instrukcji, które powodują zatrzymanie postępu przetwarzania.
- Synchronizacja na wyższym poziomie polega na użyciu specjalnych konstrukcji programotwórczych lub odpowiednich definicji struktur danych.

Współbieżność i synchronizacja procesów (18)

Systemy operacyjne



Poprawność programów współbieżnych

- Własność bezpieczeństwa (ang. safety) — w każdym stanie przetwarzania muszą być spełnione pewne warunki.
- Własność żywotności (ang. liveness) — w wyniku przetwarzania muszą w końcu zajść pewne warunki.

Współbieżność i synchronizacja procesów (19)

Systemy operacyjne



Własność uczciwości programów współbieżnych

- Uczciwość słaba — nieprzerwanie zgłaszane żądanie procesu będzie kiedyś obsłużone.
- Uczciwość mocna — nieskończenie wiele razy zgłaszane żądanie procesu będzie kiedyś obsłużone.
- Oczekiwanie liniowe — żądanie procesu będzie obsłużone po najwyżej jednokrotnym obsłużeniu żądań innych procesów.
- FIFO — żądania będą realizowane w kolejności zgłoszeń.

Współbieżność i synchronizacja procesów (20)

Systemy operacyjne



Klasyfikacja mechanizmów synchronizacji

- Zapis lub odczyt współdzielonych danych
- Złożone operacje atomowe na współdzielonych danych (np. **test&set**, **exchange**)
- Mechanizmy wspierane przez system operacyjny
 - semafony
 - mechanizmy POSIX (zamki oraz zmienne warunkowe)
- Mechanizmy strukturalne (wspierane przez wysokopoziomowe języki programowania)
 - monitory
 - regiony krytyczne

Współbieżność i synchronizacja procesów (21)

Systemy operacyjne



Wzajemne wykluczanie — sformułowanie problemu

- W systemie działa n procesów $P_0, P_1, \dots, P_{n-1}$.
- W programie każdego procesu znajduje się fragment kodu zwany sekcją krytyczną (ang. critical section).
- Sekcja krytyczna wykonywana jest w danej chwili przez co najwyżej jeden proces.

Współbieżność i synchronizacja procesów (22)

Systemy operacyjne



Ogólna postać algorytmu wzajemnego wykluczania

```

    graph TD
      A[reszta (ang. remainder section)] --> B[sekcja wejściowa (ang. entry section)]
      B --> C[sekcja krytyczna (ang. critical section)]
      C --> D[sekcja wyjściowa (ang. exit section)]
      D --> A
  
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (23)

Systemy operacyjne



Poprawność rozwiązania problemu wzajemnego wykluczania

- Wzajemne wykluczanie — warunek bezpieczeństwa,
- Postęp (ang. progress) — warunek żywotności z punktu widzenia systemu,
- Ograniczone czekanie (ang. lockout-freedom) — warunek żywotności z punktu widzenia procesu.

Współbieżność i synchronizacja procesów (24)

Systemy operacyjne



Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 1

Algorytm dla procesu P_i przy dwóch procesach P_i i P_j

```

shared numer: Integer :=  $i$ ;

while numer  $\neq i$  do } sekcja wejściowa
  nic;
  sekcja krytyczna $_i$ ;
  numer :=  $j$ ;           $\leftarrow$  sekcja wyjściowa
  reszta $_i$ ;
  
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (25)

Systemy operacyjne



Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 2

Algorytm dla procesu P_i przy dwóch procesach P_i i P_j
(dla uproszczenia prezentacji założono, że $i = 0$, a $j = 1$)

```

shared znacznik: array [0..1] of
  Boolean := false;

  znacznik[ $i$ ] := true;
  while znacznik[ $j$ ] do } sekcja wejściowa
    nic;
    sekcja krytyczna $_i$ ;
    znacznik[ $i$ ] := false;  $\leftarrow$  sekcja wyjściowa
    reszta $_i$ ;
  
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (26)

Systemy operacyjne



Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 3

```

shared znacznik: array [0..1] of
  Boolean := false;

  znacznik[ $i$ ] := true;
  while znacznik[ $j$ ] do } sekcja wejściowa
    begin
      znacznik[ $i$ ] := false;
      znacznik[ $i$ ] := true;
    end;
    sekcja krytyczna $_i$ ;
    znacznik[ $i$ ] := false;  $\leftarrow$  sekcja wyjściowa
    reszta $_i$ ;
  
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (27)

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie 2 procesów — podejście 4



```

shared znacznik: array [0..1] of Boolean;
shared numer: Integer;

znacznik[i] := true;
numer := j;
while znacznik[j] and numer ≠ i do
    nic;
sekcja krytycznai;
znacznik[i] := false;      ← sekcja wyjściowa
resztai;
  
```

sekcja wejściowa

sekcja wyjściowa

Współbieżność i synchronizacja procesów (28)

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie n procesów — algorytm piekarni ⁽¹⁾



Algorytm dla procesu P_i przy n procesach ($i = 0 \dots n-1$)

```

shared wybieranie: array [0.. $n-1$ ] of Boolean := false;
shared numer: array [0.. $n-1$ ] of Integer := 0;

local k: Integer;

wybieranie[i] := true;
numer[i] := max(numer[0], numer[1], ...) + 1;
wybieranie[i] := false;
  
```

drzwi

Współbieżność i synchronizacja procesów (29)

Systemy operacyjne

Wzajemne wykluczanie n procesów — algorytm piekarni ⁽²⁾



```

1) for k := 0 to  $n-1$  do begin
2)   if k ≠ i then begin
3)     while wybieranie[k] do nic;
4)     while numer[k] ≠ 0 and
5)       (numer[k], k) < (numer[i], i) do
6)       nic;
7)   end;
8) end;
9) sekcja krytycznai;
10) numer[i] := 0;      ← sekcja wyjściowa
11) resztai;
  
```

sekcja wejściowa

sekcja wyjściowa

Współbieżność i synchronizacja procesów (30)

Systemy operacyjne



Operacja test&set

```
function test&set(var l: Boolean): Boolean;
begin
  test&set := l;
  l := true;
end;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (31)

Systemy operacyjne



Operacja exchange

```
procedure exchange(var a,b: Boolean);
var tmp: Boolean;
begin
  tmp := a;
  a := b;
  b := tmp;
end;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (32)

Systemy operacyjne



Wzajemne wykluczanie z użyciem instrukcji test&set

```
shared zamek: Boolean;

while test&set(zamek) do } sekcja wejściowa
  nic;
sekcja krytyczna;
zamek := false;          ← sekcja wyjściowa
reszta;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (33)

Systemy operacyjne

 Wzajemne wykluczanie z użyciem instrukcji exchange

```
shared zamek: Boolean;  
local klucz: Boolean;  
  
klucz := true;  
repeat exchange(zamek, klucz);  
until klucz = false; } sekcja  
sekcja krytyczna;      wejściowa  
zamek := false;        ← sekcja wyjściowa  
reszta;
```

Współbieżność i synchronizacja procesów (34)
