

Systemy operacyjne

Pamięć wirtualna

Dariusz Wawrzyniak



Systemy operacyjne



Plan wykładu

- Stronicowanie na żądanie
 - obsługa błędu strony
 - wymiana
- Problemy realizacji stronicowania na żądanie
 - problem wyboru ofiary
 - problem wznowiania rozkazów
- Algorytmy wymiany
 - algorytmy wymiany na żądanie
 - algorytmy wymiany ze sprowadzaniem na żądanie
 - algorytmy wstępnego stronicowania

Pamięć wirtualna (2)

Systemy operacyjne



Mechanizm stronicowania na żądanie

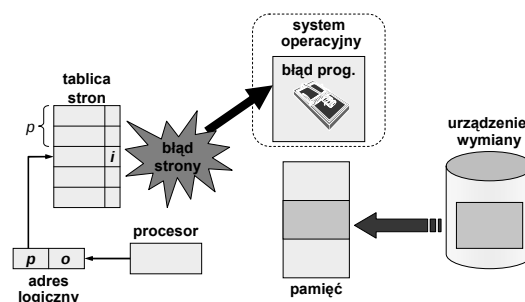
- Działanie mechanizmu: strony są sprowadzane do pamięci tylko wówczas, gdy jest to konieczne, czyli wówczas gdy następuje odniesienie do komórki o adresie, znajdującym się na tej stronie
- Wymagania sprzętowe
 - tablica stron z bitem poprawności (ang. valid-invalid bit) dla każdej pozycji (dodatkowo z bitem modyfikacji i odniesienia),
 - mechanizm reakcji na odniesienie do strony niepoprawnej,
 - urządzenie wymiany (ang. swap device) — pamięć pomocnicza.

Pamięć wirtualna (3)

Systemy operacyjne



Obsługa błędu strony

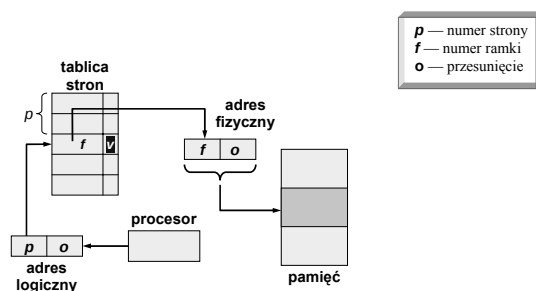


Pamięć wirtualna (4)

Systemy operacyjne



Powtórne wykonania rozkazu



Pamięć wirtualna (5)

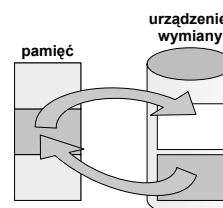
Systemy operacyjne



Zastępowanie stron

Problem zastępowania (wymiany, ang. page replacement) stron pojawia się, gdy w pamięci fizycznej brakuje wolnych ramek i konieczne jest zwolnienie jakiejś ramki poprzez usunięcie z niej strony.

Jeśli strona była modyfikowana w pamięci, konieczne jest zapisanie jej w obszarze wymiany ⇒ konieczność wprowadzenia bitu modyfikacji (ang. modify bit), zwanego też bitem zabrudzenia (ang. dirty bit).



Pamięć wirtualna (6)

Systemy operacyjne

 **Koszt wymiany stron ⁽¹⁾**

- Całkowity koszt sprowadzenia stron w ogólnym przypadku dany jest wzorem:

$$\sum_i h(k_i)$$

gdzie:

- t — dyskretna chwila czasu, w której następuje odniesienie do pamięci (do strony)
- k_t — liczba stron sprowadzanych w chwili t ,
- $h(k)$ — koszt jednorazowego sprowadzenia grupy k stron, przy czym $h(0) = 0$, $h(1) = 1$.

Pamięć wirtualna (7)

Systemy operacyjne

 **Koszt wymiany stron ⁽²⁾**

- W przypadku zastosowania dysku jako urządzenia wymiany, na czas sprowadzania wpływ mają:
 - T_w — czas oczekiwania (suma czasu oczekiwania w kolejce do urządzenia oraz czasu przygotowania urządzenia do transmisji)
 - T_{tr} — czas dostępu do danych
- Postać funkcji $h(k)$ dla dysku jest zatem następująca: $h(k) = T_w + k \cdot T_{tr}$
- Własność funkcji $h(k)$ przy założeniu, że $T_w > 0$ i $k > 0$: $h(k) < k \cdot (T_w + T_{tr}) \Rightarrow 1 \leq h(k) \leq k \cdot h(1)$

Pamięć wirtualna (8)

Systemy operacyjne

 **Koszt wymiany stron ⁽³⁾**

- Koszt wymiany można aproksymować za pomocą parametrów FN (liczba wygenerowanych błędów strony) i TN (liczba transmisji stron).
- Całkowity czas oczekiwania na urządzenie (istotna składowa czasu wymiany) również jest zależny od liczby błędów strony.
- Wniosek: należy minimalizować liczbę błędów strony i tym samym redukować czas realizacji wymiany, czyli koszt.

Pamięć wirtualna (9)

Systemy operacyjne

 **Problemy zastępowania stron**

- Problem wyboru ofiary — niewłaściwy wybór ramki-ofiary powoduje wzrost kosztu wymiany.
 - W skrajnym przypadku może dojść do zjawiska migotania, w przypadku którego często dochodzi do wystąpienia odniesienia do właśnie usuniętej strony.
- Problem wznowiania rozkazów — w przypadku wielokrotnego odniesienia do pamięci w jednym cyklu rozkazowym należy zapewnić, że wszystkie adresowane strony są jednocześnie dostępne w ramach w pamięci fizycznej.

Pamięć wirtualna (10)

Systemy operacyjne

 **Problem wyboru ofiary**

- Zakładając, że przyszły ciąg odniesień do pamięci nie jest znany, na podstawie historii odniesień należy wybrać taką ramkę, do której prawdopodobieństwo odniesienia w przyszłości jest małe.
- Podstawowa własność programów, na podstawie której można szacować takie prawdopodobieństwo, nazywana jest lokalnością.

Pamięć wirtualna (11)

Systemy operacyjne

 **Własność lokalności**

- Lokalność czasowa — tendencja procesów do generowania w stosunkowo długich przedziałach czasu odniesień do niewielkiego podzbioru stron wirtualnych zwanego zbiorem stron aktywnych.
 - Formalnie jest to tendencja procesu do generowania z dużym prawdopodobieństwem w przedziale czasu $(t, t + \tau)$ odniesień do stron adresowanych w przedziale czasu $(t - \tau, t)$.
- Lokalność przestrzenna — tendencja procesu do generowania z dużym prawdopodobieństwem kolejnych odniesień do stron o zbliżonych numerach (stron sąsiednich) lub stron o numerach skojarzonych w trakcie przetwarzania.

Pamięć wirtualna (12)

Systemy operacyjne



Problem efektywności systemu z pamięcią wirtualną

- Efektywność działania systemu pamięci wirtualnej zależy od precyzji identyfikacji zbioru stron aktywnych i możliwości utrzymania ich w pamięci fizycznej.
- Wobec braku a priori pełnego ciągu odniesień do stron wirtualnych identyfikacja takiego zbioru może wynikać z różnych przesłanek, czego skutkiem jest duża różnorodność algorytmów wymiany.

Pamięć wirtualna (13)

Systemy operacyjne



Klasyfikacja algorytmów wymiany z względu na okoliczności sprowadzania i usuwania stron

- Algorytmy wymiany na żądanie
 - sprowadzenia odbywa się na żądanie — strona sprowadzana jest dopiero wówczas, gdy następuje odniesienie do niej i nie ma jej w pamięci,
 - usuwanie odbywa się na żądanie — strona usuwana jest wówczas, gdy konieczne jest sprowadzenie innej strony w wyniku odniesienia i nie ma wolnej ramki
- Algorytmy wymiany ze sprowadzaniem na żądanie
 - tylko sprowadzanie odbywa się na żądanie
- Algorytmy wstępnego sprowadzania
 - sprowadzana jest strona żądana, a wraz z nią inne strony

Pamięć wirtualna (14)

Systemy operacyjne



Klasyfikacja algorytmów wymiany ze względu na sposób zastępowania stron

- Zastępowanie lokalne (ang. local replacement) — algorytm wymiany zastępuje tylko strony w ramach przydzielonych procesowi, który spowodował błąd strony.
- Zastępowanie globalne (ang. global replacement) — algorytm wymiany zastępuje strony znajdujące się w dostępnej puli ramek w całym systemie (w szczególności zatem usuwa strony innych procesów).

Pamięć wirtualna (15)

Systemy operacyjne



Klasyfikacja algorytmów wymiany ze względu na przydział ramek dla procesów

- Przydział statyczny — liczba ramek przydzielonych procesowi jest ustalona i nie ulega zmianie w trakcie przetwarzania.
- Przydział dynamiczny — liczba ramek przydzielonych procesowi może się zmieniać w trakcie przetwarzania.

Pamięć wirtualna (16)

Systemy operacyjne



Dobór liczby ramek

- Minimalna liczba ramek — zdefiniowana przez architekturę komputera (zależna od maksymalnej liczby komórek adresowanych przez jeden rozkaz).
- Liczba ramek przydzielona dla procesu
 - podział równomierny (ang. equal allocation)
 - podział proporcjonalny (ang. proportional allocation)
 - przydział zależny od priorytetu procesu

Pamięć wirtualna (17)

Systemy operacyjne



Algorytmy wymiany na żądanie

- MIN — zastępowana jest strona, która najdłużej nie będzie używana (optymalny w tej klasie)
- FIFO (ang. First In First Out) — zastępowana jest strona najstarsza (najwcześniej sprowadzona)
- LIFO (ang. Last In First Out) — zastępowana jest strona najmłodsza (najpóźniej sprowadzona)
- LRU (ang. Least Recently Used) — zastępowana jest najdawniej użyta strona (najdłużej nie używana)
- LFU (ang. Least Frequently Used) — zastępowana jest najrzadziej używana strona
- MFU (ang. Most Frequently Used) — zastępowana jest najczęściej używana strona

Pamięć wirtualna (18)

Systemy operacyjne

Przykład działania algorytmów wymiany na żądanie ⁽¹⁾

- W systemie pamięci wirtualnej są 4 ramki.
- Wszystkie ramki są początkowo puste
- W systemie pojawiają się następujące odniesień (odwołań) do stron: 1, 2, 3, 4, 1, 4, 3, 4, 5, 2, 1, 4, 3, 4

Pamięć wirtualna (19)

Systemy operacyjne

Przykład działania algorytmów wymiany na żądanie ⁽²⁾

Dalszy ciąg odniesień:
2, 1, 4, 3, 4

Pamięć wirtualna (20)

Systemy operacyjne

Przykład anomalii Belady'ego

Następujący ciąg odniesień obsługiwany jest zgodnie z algorytmem FIFO w systemie z 3, a następnie 4 ramkami:
1, 2, 3, 4, 1, 2, 5, 1, 2, 3, 4, 5

Pamięć wirtualna (21)

Systemy operacyjne

Zagadnienia implementacyjne

- Implementacja algorytmu FIFO
- Implementacja algorytmu LRU
- Algorytmy przybliżające metodę LRU
 - algorytm dodatkowych bitów odwołań
 - algorytm drugiej szansy (FINUFO)
 - ulepszony algorytm drugiej szansy

Pamięć wirtualna (22)

Systemy operacyjne

Implementacja algorytmu FIFO

- Utrzymywanie listy numerów stron w kolejności ich sprowadzania do pamięci
- Umieszczanie numeru sprowadzanej strony na końcu listy
- Usuwanie z pamięci (i z listy) strony, której numer znajduje się na początku listy

Pamięć wirtualna (23)

Systemy operacyjne

Implementacja algorytmu LRU

- Licznik — przy każdym odniesieniu do pamięci zwiększana jest wartość pewnego licznika i wpisywana do odpowiedniej pozycji opisującej stronę w tablicy stron (lub w innej specjalnej strukturze systemu operacyjnego). Z pamięci usuwana jest wówczas strona z najmniejszą wartością tego licznika, co wymaga przejrzania całej tablicy stron.
- Stos — numery stron, do których następuje odniesienie, odkładane są na szczytę stosu. Przed odłożeniem na szczytę numer strony musi być wydobyty ze środka stosu, czyli z miejsca, gdzie był ostatnio odłożony. W tej implementacji z pamięci usuwana jest strona, która jest na dnie stosu.

Pamięć wirtualna (24)

Systemy operacyjne



Algoritmy przybliżające metodę LRU

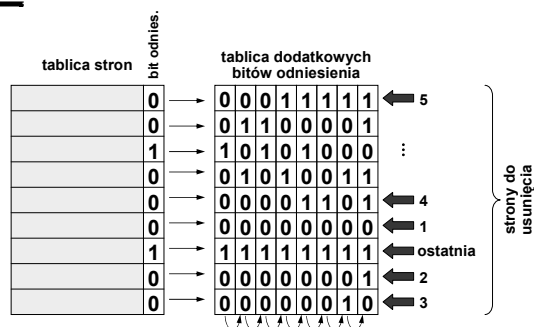
- Niezbędne wspomaganie sprzętowe:
 - bit odniesienia (ang. reference bit) — ustawiany, gdy następuje odniesienie do strony,
 - bit modyfikacji (ang. modify bit) — ustawiany, gdy następuje zapis na stronie.
- Algoritmy korzystające ze wspomaganie sprzętowego:
 - algorytm dodatkowych bitów odniesienia — wykorzystuje bit odniesienia,
 - algorytm drugiej szansy — wykorzystuje bit odniesienia,
 - ulepszony algorytm drugiej szansy — wykorzystuje bit odniesienia i bit modyfikacji.

Pamięć wirtualna (25)

Systemy operacyjne



Algorytm dodatkowych bitów odniesienia

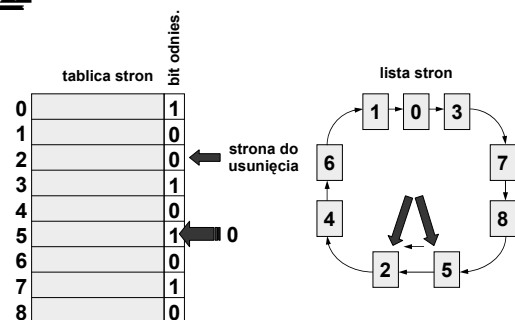


Pamięć wirtualna (26)

Systemy operacyjne



Algorytm drugiej szansy

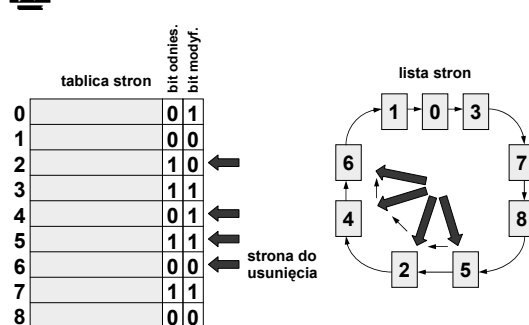


Pamięć wirtualna (27)

Systemy operacyjne



Ulepszony algorytm drugiej szansy



Pamięć wirtualna (28)

Systemy operacyjne



Algoritmy ze sprowadzaniem na żądanie

- VMIN — usuwane są strony, których koszt utrzymania w pamięci jest większy od kosztu ponownego sprowadzenia
- WS — usuwane są strony, do których nie było odniesień przez określony czas
- WSClock — przybliżona wersja algorytmu WS, oparta na bicie odniesienia
- PFF, VSWS — przydział i zwalnianie ramek procesów realizowane jest na podstawie częstości zgłaszania błędów strony

Pamięć wirtualna (29)

Systemy operacyjne



Zbiór roboczy

- Zbiór roboczy procesu (ang. working-set) — zbiór stron, które zostały zaadresowane w ciągu ostatnich τ odniesień do pamięci (w tzw. oknie zbioru roboczego)
- Okno zbioru roboczego (ang. working-set window) — zakres odniesień do pamięci, które adresują strony należące do zbioru roboczego
- Zbiór roboczy w chwili t przy rozmiarze okna τ oznaczony będzie jako $W(t, \tau)$
- Algorytm zbioru roboczego usuwa z pamięci wszystkie strony, które nie należą do zbioru roboczego.

Pamięć wirtualna (30)

Systemy operacyjne

Przykład zbioru roboczego

1, 2, 4, 5, 7, 3, 2, 4, 4, 6, 7, 4, 1

$r = 4$ $\left\{ \begin{array}{l} \{3, 4, 5, 7\} = \mathcal{W}(6, 4) \\ \{2, 3, 5, 7\} = \mathcal{W}(7, 4) \end{array} \right.$

$r = 6$ $\left\{ \begin{array}{l} \{2, 3, 4, 6, 7\} = \mathcal{W}(11, 6) \\ \{2, 4, 6, 7\} = \mathcal{W}(12, 6) \end{array} \right.$

Pamięć wirtualna (31)

Systemy operacyjne

Przykład wymiany stron w oparciu o zbiór roboczy

Ciąg odniesień: 1, 2, 4, 5, 7, 3, 2, 4, 4, 6, 7, 4, 1
Rozmiar okna: 5

Pamięć wirtualna (32)

Systemy operacyjne

Koncepcja identyfikacji zbioru roboczego

- Dla każdej ramki utrzymywany jest wirtualny (mierzony odniesieniami do pamięci) czas ostatniego odniesienia do niej.
- Po każdym odniesieniu do strony zwiększana jest wartość licznika odniesień i wpisywana do odpowiedniej tablicy na pozycji odpowiadającej ramce, w której znajdują się adresowana strona.
- Do zbioru roboczego należą te strony, dla których różnica pomiędzy bieżącą wartością licznika odniesień, a wartością wpisaną w tablicy jest mniejsza lub równa rozmiarowi okna zbioru roboczego.

Pamięć wirtualna (33)

Systemy operacyjne

Przybliżona realizacja koncepcji zbioru roboczego

- Wspomaganie sprzętowe — bit odniesienia.
- Okresowe (wyznaczone przez czasomierz lub przez wystąpienie błędu strony) zwiększanie licznika reprezentującego upływ czasu wirtualnego oraz sprawdzanie bitu odniesienia dla każdej z ramek.
- Jeśli bit odniesienia jest ustawiony, to skasowanie bitu odniesienia i wpisanie bieżącej wartości licznika do odpowiedniej tablicy na pozycji odpowiadającej ramce.
- Jeśli bit odniesienia jest skasowany, to sprawdzenie różnicy pomiędzy bieżącą wartością licznika a wartością wpisaną na odpowiedniej pozycji w tablicy i usunięcie strony, gdy różnica jest większa niż rozmiar okna.

Pamięć wirtualna (34)

Systemy operacyjne

Algorytm WSClock₍₁₎

- Dla każdej ramki (strony w ramce) utrzymywany jest wirtualny czas (przybliżony) ostatniego odniesienia.
- Wszystkie ramki pamięci (niezależnie od przynależności do procesu) powiązane są w cykl.
- W wyniku **wystąpienia błędu strony** sprawdzany jest bit odniesienia do strony wskazywanej jako kolejna do usunięcia.
- Jeśli bit odniesienia jest ustawiony, zostaje on skasowany, po czym następuje wskazanie następnej ramki w cyklu i sprawdzenie bitu odniesienia.

Pamięć wirtualna (35)

Systemy operacyjne

Algorytm WSClock₍₂₎

- Jeśli bit odniesienia jest skasowany, sprawdzana jest różnica pomiędzy wirtualnym czasem bieżącym, a czasem ostatniego odniesienia do wskazywanej strony:
 - jeśli różnica jest większa od rozmiaru okna zbioru roboczego, następuje wymiana strony w ramce,
 - w przeciwnym razie strona pozostaje i następuje wskazanie i sprawdzenie ramki następnej.
- W przypadku wykonania pełnego obrotu przez wskazówkę i stwierdzenia braku stron do wymiany następuje zawieszenie jakiegoś procesu.

Pamięć wirtualna (36)

Systemy operacyjne

Przykład działania algorytmu WSClock

czas bieżący: 51
rozmiar okna: 10

tablica stron	bit odnies.	czas odnies.
0	1	39
1	0	30
2	0	22
3	1	50
4	0	45
5	0	48
6	0	33
7	1	49
8	0	41

strona do usunięcia

lista stron

Pamięć wirtualna (37)

Systemy operacyjne

Algorytm zegarowy dwuwskazówkowy

- Wszystkie strony pamięci (niezależnie procesu) powiązane są w listę cykliczną.
- Lista przeglądana jest okresowo przez 2 wskazówki:
 - wiodąca (przednia) zeruje bit odniesienia,
 - zamykająca (tylna) wskazuje stronę do usunięcia.
- Jeśli bit odniesienia przed nadejściem tylnej wskazówki zostanie ponownie ustawiony, strona pozostaje w pamięci, w przeciwnym przypadku jest usuwana.
- Algorytm sterowany jest następującymi parametrami:
 - tempo przeglądania,
 - rozstaw wskazówek.

Pamięć wirtualna (38)

Systemy operacyjne

Przykład działania algorytmu zegarowego dwuwskazówkowego

tablica stron	bit odnies.
0	1
1	1
2	1
3	0
4	1
5	1
6	1
7	1
8	0

strona do usunięcia

lista stron

Pamięć wirtualna (39)

Systemy operacyjne

Algorytm PFF

- Jeśli częstotliwość błędów strony generowanych przez proces przekroczy ustalony poziom f_H , to dla stron tego procesu sprowadzanych do pamięci przydzielana są nowe ramki.
- Jeśli częstotliwość błędów strony spadnie poniżej ustalonego poziomu f_L , to
 - zwalniana jest jedna ramka procesu lub
 - zwalniane są wszystkie ramki ze stronami, do których nie było odniesienia od chwili wystąpienia ostatniego błędu strony w danym procesie.
- W szczególności $f_H = f_L$

Pamięć wirtualna (40)

Systemy operacyjne

Implementacja algorytmu PFF — kontrola częstości błędów strony

- Przy każdym błędzie strony generowanym przez proces zwiększany jest licznik błędów strony danego procesu oraz zerowane są bity odniesienia do jego stron.
- W określonych interwałach czasu, wyznaczanych przez czasomierz, sprawdzane są (a następnie zerowane) liczniki poszczególnych procesów.
- Jeśli wartość licznika jest większa od górnej granicy, to procesowi przydzielana jest dodatkowa ramka.
- Jeśli wartość licznika jest mniejsza od ustalonej dolnej granicy, to zwalniana jest:
 - jedna ramka lub
 - wszystkie ramki z wykasowanym bitem odniesienia.

Pamięć wirtualna (41)

Systemy operacyjne

Implementacja algorytmu PFF — kontrola okresu pomiędzy błędami strony

- Przy każdym błędzie strony sprawdzany jest czas jaki upłynął od poprzedniego błędu strony.
- Jeśli czas jest mniejszy od ustalonej wielkości T_{min} , to na potrzeby sprowadzanej strony przydzielana jest dodatkowa ramka.
- Jeśli czas jest większy od ustalonej wielkości T_{max} , to
 - zwalniana jest jedna ramka lub
 - zwalniane są wszystkie ramki z wykasowanym bitem odniesienia.
- Bit odniesienia dla stron pozostających w pamięci jest kasowany.

Pamięć wirtualna (42)

Systemy operacyjne



Algorytm VSWS

- Przy każdym błędzie strony zwiększany jest licznik błędów strony danego procesu — n .
- Co pewien okres czasu T_t , wynikający ze stanu wymiany, następuje kontrola odniesień do stron.
- W ramach kontroli wykonywane są następujące czynności:
 - strony, do których nie było odniesienia są usuwane (ich ramki są zwalniane),
 - bity odniesienia stron pozostających na następny okres (do których było odniesienie) są kasowane,
 - wartość licznika n jest zerowana.

Pamięć wirtualna (43)

Systemy operacyjne



Wielkość interwału czasu dla algorytmu VSWS

- Algorytm sterowany jest następującymi parametrami:
 - T_{max} — maksymalna wielkość interwału czasu,
 - T_{min} — minimalna wielkość interwału czasu,
 - n_{max} — maksymalna liczba błędów strony.
- Kontrola następuje w chwili t , po czasie T_t od momentu poprzedniej kontroli, ustalonym następująco:

Pamięć wirtualna (44)

Systemy operacyjne



Techniki poprawy efektywności wymiany

- Wymiana ramek zamiast wymiany stron — przyspieszenie wymiany brudnej strony
- Buforowanie usuniętych stron zamiast usuwania — mniej kosztowna obsługa błędu strony
- Czyszczenie stron — ułatwienie ewentualnej wymiany
- Utrzymywanie listy brudnych stron do usunięcia — opóźnienie zapisu stron w obszar wymiany

Pamięć wirtualna (45)

Systemy operacyjne



Algorytmy wstępnego stronicowania

- DPMIN — sprowadzane są wszystkie strony potrzebne w najbliższej przyszłości, które mieszczą się dostępnych ramkach
- OBL — sprowadzana jest strona żądana oraz strona następna (wg. numeracji w tablicy stron)
- SL — na podstawie wcześniejszych odniesień i błędów strony budowana jest tablica skojarzeń stron sprowadzanych po sobie i informacja taka wykorzystywana jest przez następny sprowadzaniu
- FDPA — podejście uwzględniające sugestie programisty co do stron potrzebnych w przyszłości

Pamięć wirtualna (46)

Systemy operacyjne



Algorytm SL

- System utrzymuje dodatkową tablicę $pred$, gdzie dla każdej strony pamiętana jest strona, sprowadzona po niej do pamięci. Początkowo $pred[i] = i + 1$.
- u jest zmienną przechowującą nr strony ostatnio sprowadzanej do pamięci w wyniku odniesienia do niej.
- W chwili wystąpienia błędu strony następuje sprowadzenie żądanej strony — p . Jeśli przy poprzedniej wymianie nie dokonano wstępnego sprowadzenia lub nie było odniesienia do strony wstępnie sprowadzonej do chwili obecnej $pred[u] := p$.
- Jeśli strona $q = pred[p]$ nie znajduje się w pamięci, to następuje również jej sprowadzenia.
- $u := p$

Pamięć wirtualna (47)

Systemy operacyjne



Algorytm FDPA₍₁₎

- W programie występują dodatkowe instrukcje dla systemu operacyjnego:
 - $FREE(p)$ — strona p nie będzie wykorzystywana w niedalekiej przyszłości,
 - $PRE(p)$ — strona p będzie wkrótce wykorzystywana.
- Wykonanie takiej instrukcji skutkuje ustawieniem odpowiednich bitów dla strony:
 - bitu usunięcia — D ,
 - bitu wstępnego sprowadzenia — P .

Pamięć wirtualna (48)

Systemy operacyjne

**Algorytm FDPA⁽²⁾**

- W przypadku wystąpienia błędu strony sprowadzana jest strona żądana, ewentualnie wymieniana z jakąś stroną z ustawionym bitem D . Jeśli nie ma takiej strony stosowany jest inny algorytm usuwania np. LRU, z pominięciem stron, dla których ustawiony jest bit P .
- Jeśli w systemie są wolne ramki lub mogą zostać zwolnione przez usunięcie stron z ustawionym bitem D , to sprowadza się tyle stron z ustawionym bitem P , na ile pozwala potencjalna liczba wolnych ramek.
- W przypadku odniesienia do strony z ustawionym bitem P , bit ten jest kasowany.

Pamięć wirtualna (49)

Systemy operacyjne

**Segmentacja w systemie pamięci wirtualnej**

- Segmentacja na żądanie — wymiana segmentów pomiędzy pamięcią pierwszego i drugiego rzędu
- Skomplikowana wymiana — zróżnicowany rozmiar segmentów
- Mniejsza przewidywalność czasu dostępu — zróżnicowany czas przesyłania zawartości segmentu

Pamięć wirtualna (50)