
Transport

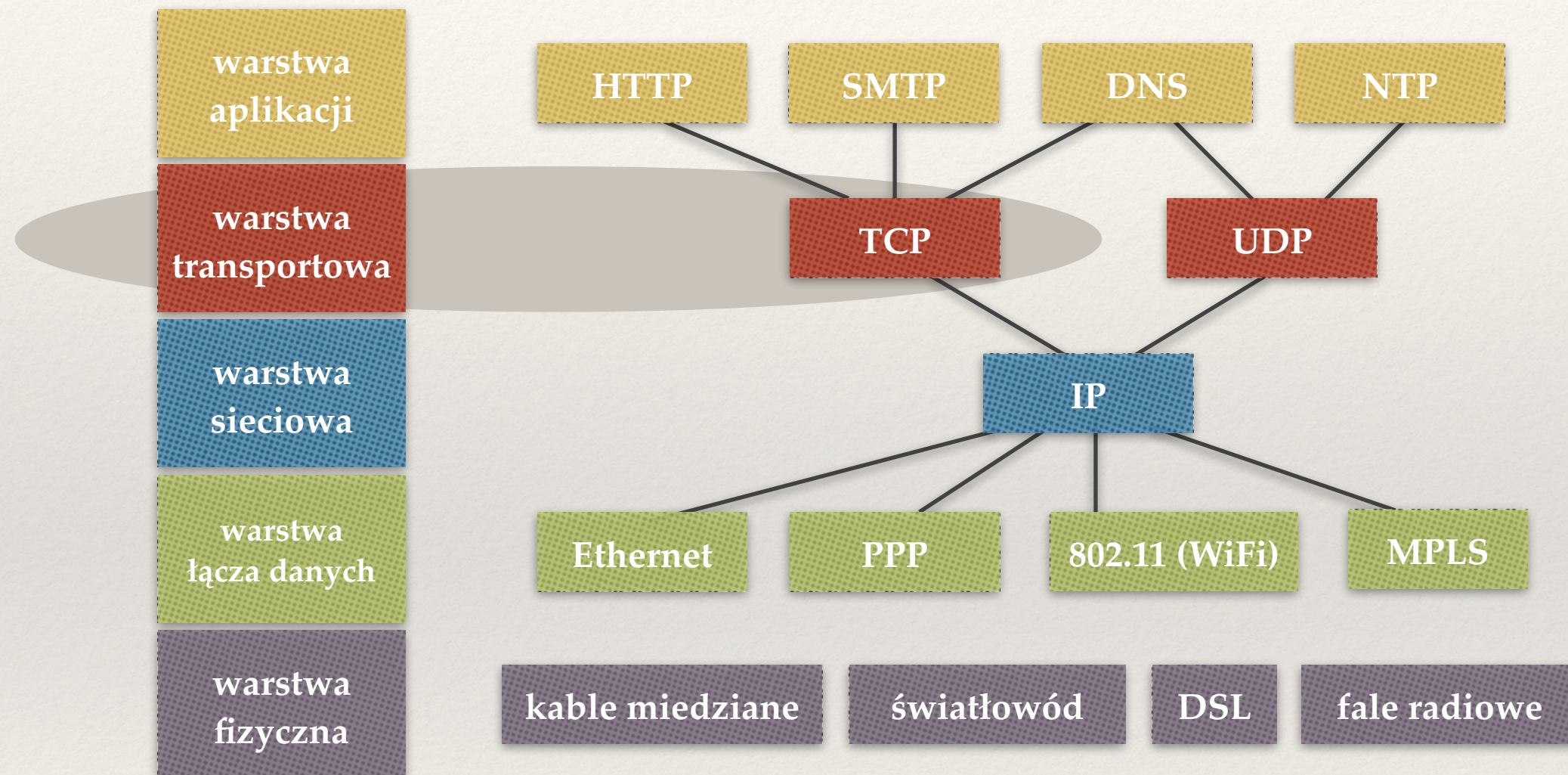
część 3: kontrola przeciążenia

Sieci komputerowe

Wykład 8

Marcin Bieńkowski

Protokoły w Internecie



Podsumowanie mechanizmów warstwy transportowej

Warstwa sieci = zawodna usługa przesyłania pakietów

- ❖ Tylko zasada dołożenia wszelkich starań (*best effort*)

- ❖ **Pakiety mogą zostać:**
 - ♦ uszkodzone,
 - ♦ zgubione,
 - ♦ opóźnione,
 - ♦ zamienione (kolejność),
 - ♦ zduplikowane (przez wyższe lub niższe warstwy).

Podstawowe mechanizmy w warstwie transportowej

- ❖ **Segmentacja:** dzielimy przesyłany strumień danych na kawałki; dla uproszczenia będziemy wszystko liczyć w segmentach.
- ❖ **Potwierdzenia (ACK):** małe pakiety kontrolne potwierdzające otrzymanie danego segmentu.
- ❖ **Timeout (przekroczenie czasu oczekiwania):** jeśli nie otrzymamy potwierdzenia przez pewien czas (typowy dla łącza, np. $2 * RTT$).
- ❖ **Retransmisje:** ponowne wysłanie danego segmentu w przypadku przekroczenia czasu oczekiwania.

Co umiemy już zapewniać?

❖ **Niezawodny transport**

- ♦ Mechanizmy ARQ (Automatic Repeat reQuest) = wysyłanie do skutku

❖ **Kontrola przepływu**

- ♦ Nadawca powinien dostosowywać prędkość transmisji do szybkości z jaką odbiorca może przetwarzać dane.

❖ **Jak?**

- ♦ Najczęściej: okno przesuwne + potwierdzenia skumulowane.

Przypomnienie: przesuwne okno nadawcy



Akcje:

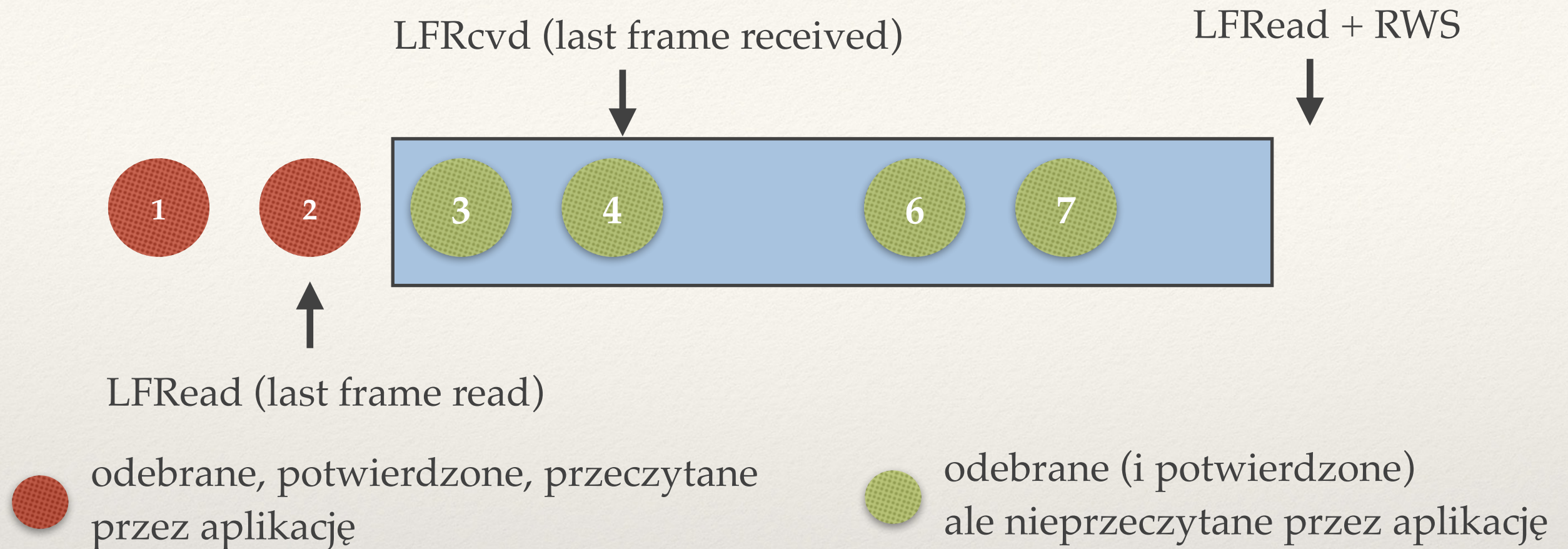
- ❖ Otrzymanie ACK → sprawdzamy, czy możemy przesunąć okno.
- ❖ Przesunięcie okna → wysyłamy dodatkowe segmenty.
- ❖ Timeout dla (niepotwierdzonego) segmentu → wysyłamy go ponownie.

Przypomnienie: okno odbiorcy, potwierdzanie skumulowane

❖ Wysyłanie ACK:

- ♦ Wysyłamy tylko jeśli otrzymamy segment $S \leq \text{LFRead} + \text{RWS}$
- ♦ W razie potrzeby aktualizujemy LFRcvd (przesuwamy okno w prawo) a następnie wysyłamy **ACK dla LFRcvd**.

Przypomnienie: okno odbiorcy, potwierdzanie skumulowane



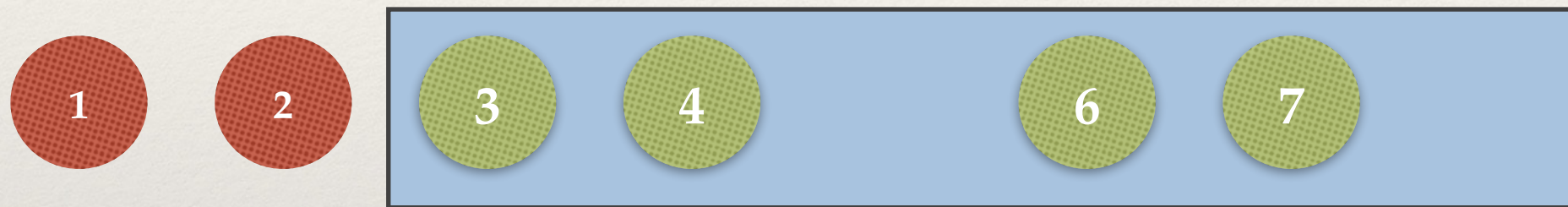
❖ Wysyłanie ACK:

- ✦ Wysyłamy tylko jeśli otrzymamy segment $S \leq \text{LFRRead} + \text{RWS}$
- ✦ W razie potrzeby aktualizujemy LFRcvd (przesuwamy okno w prawo) a następnie wysyłamy **ACK dla LFRcvd**.

Przypomnienie: oferowane okno

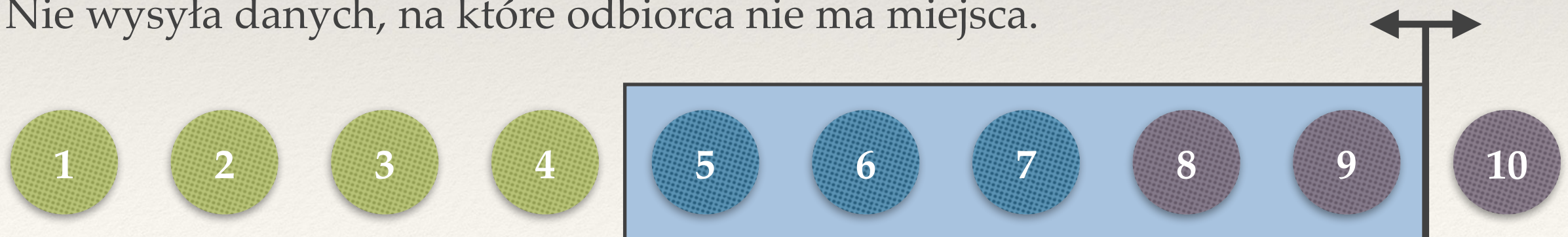
Odbiorca:

- ❖ Oferowane okno = wolne miejsce w buforze
- ❖ Oferowane okno wysyłane nadawcy (zazwyczaj razem z ACK).
- ❖ Np.: pakiety potwierdzone, ale aplikacja wolno czyta → oferowane okno jest małe.



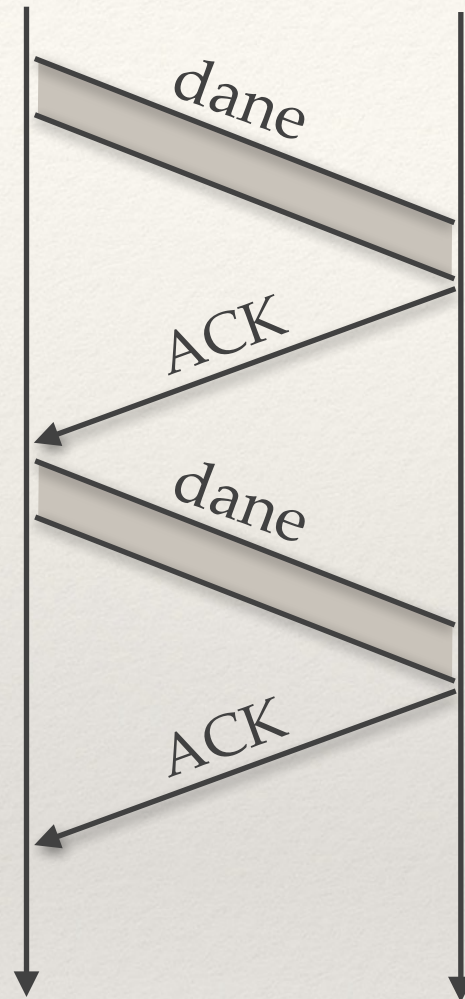
Nadawca:

- ❖ Zmienia SWS (rozmiar swojego okna) na rozmiar oferowanego okna.
- ❖ Nie wysyła danych, na które odbiorca nie ma miejsca.

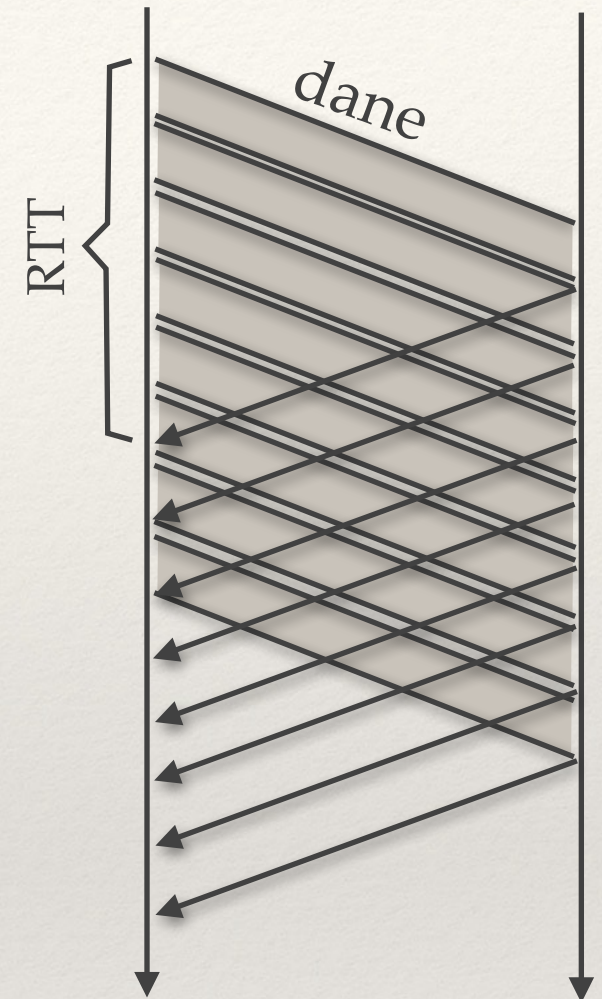


SWS a prędkość transmisji

SWS = 1:



większe SWS:

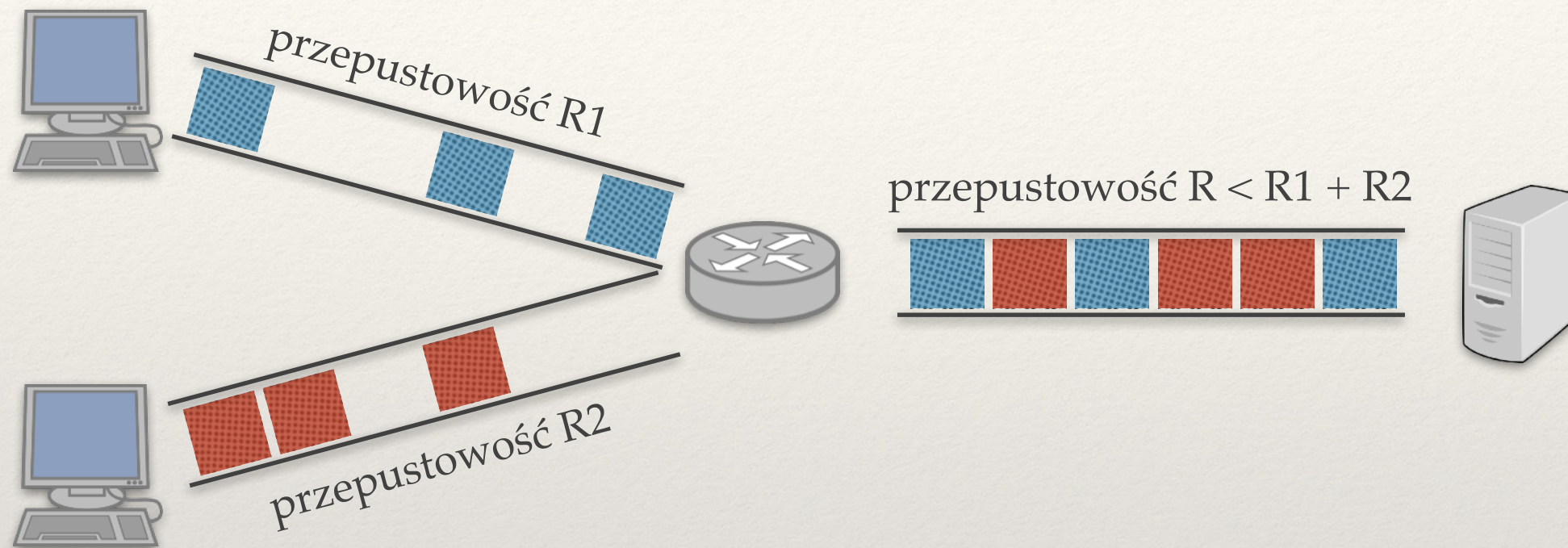


- ❖ Dane wysyłane są ze średnią prędkością SWS / RTT .
- ❖ Okno mniejsze od $BDP = przepustowość * RTT$
→ nadawca nie jest w stanie wykorzystać całego łącza.

Problem przeciążenia

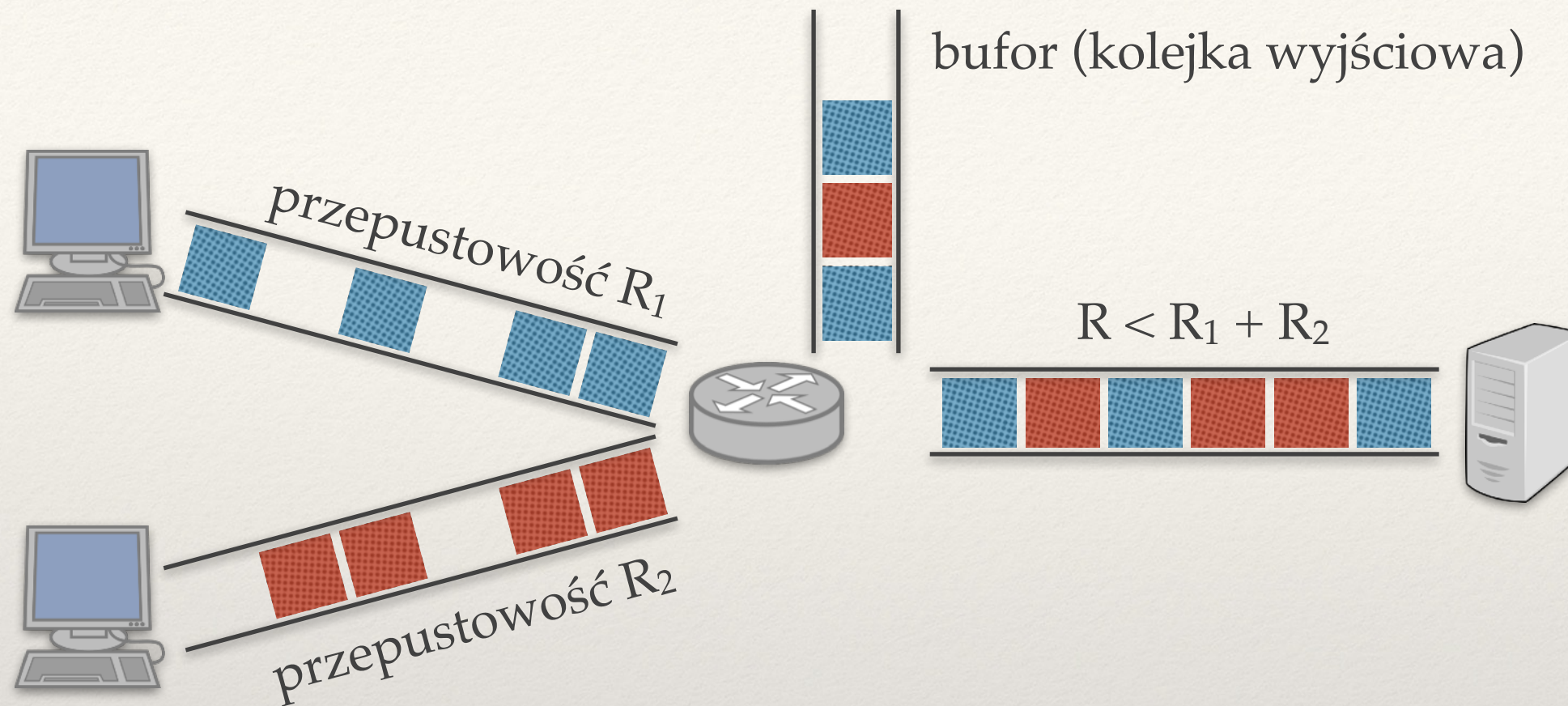
Statystyczny multipleksing

Różne strumienie danych przesyłane tym samym łączem.



Założenie: różne komputery wykorzystują łącze w innych momentach
→ lepsze wykorzystanie łącza.

Bufory



Bufory przy łączach wyjściowych:

- ❖ Pomagają przy **przejściowym** nadmiarze pakietów.
- ❖ Jeśli bufor się przepełni (**przeciążenie**) → pakiety są odrzucane.
- ❖ Dlaczego nie zrobić większych buforów?

Zwiększyć bufor?

- ❖ Rozmiar bufora na trasie nie wpływa na przepustowość.
- ♦ Przepustowość na trasie wynika z najwolniejszego łącza.

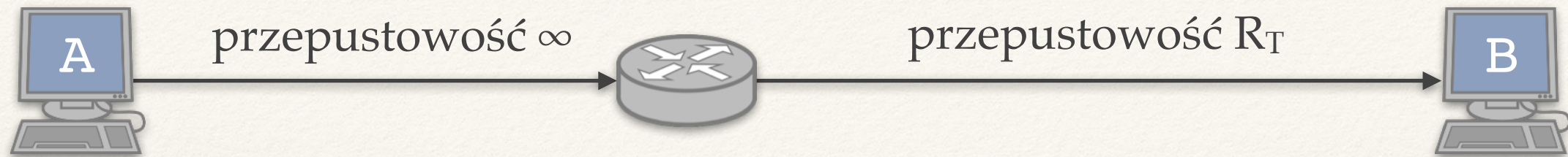
Zwiększyć bufor?

- ❖ Rozmiar bufora na trasie nie wpływa na przepustowość.
 - ♦ Przepustowość na trasie wynika z najwolniejszego łącza.
- ❖ Jeśli daną trasą będziemy cały czas przesyłać więcej niż jej przepustowość, to bufor będzie całkowicie wypełniony.
 - ♦ większe bufor → większe kolejki
 - ♦ większe kolejki → większe opóźnienie!

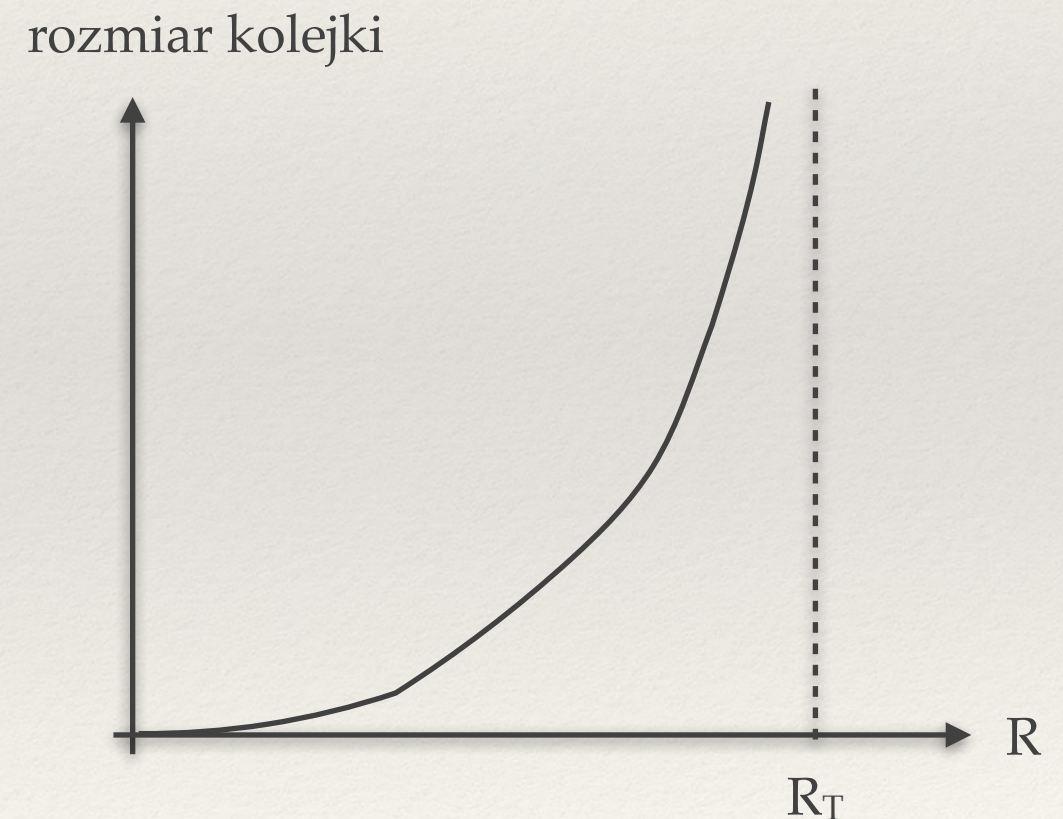
Zwiększyć bufor?

- ❖ Rozmiar bufora na trasie nie wpływa na przepustowość.
 - ♦ Przepustowość na trasie wynika z najwolniejszego łącza.
- ❖ Jeśli daną trasą będziemy cały czas przesyłać więcej niż jej przepustowość, to bufory będą całkowicie wypełnione.
 - ♦ większe bufory → większe kolejki
 - ♦ większe kolejki → większe opóźnienie!
- ❖ Przy dużych buforach pakiety są tak opóźniane, że TCP zaczyna wysyłać je ponownie → jeszcze bardziej zwiększa przeciążenie!

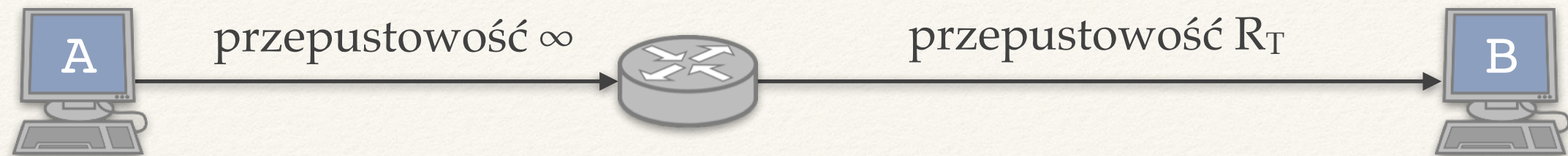
Rozmiar kolejki



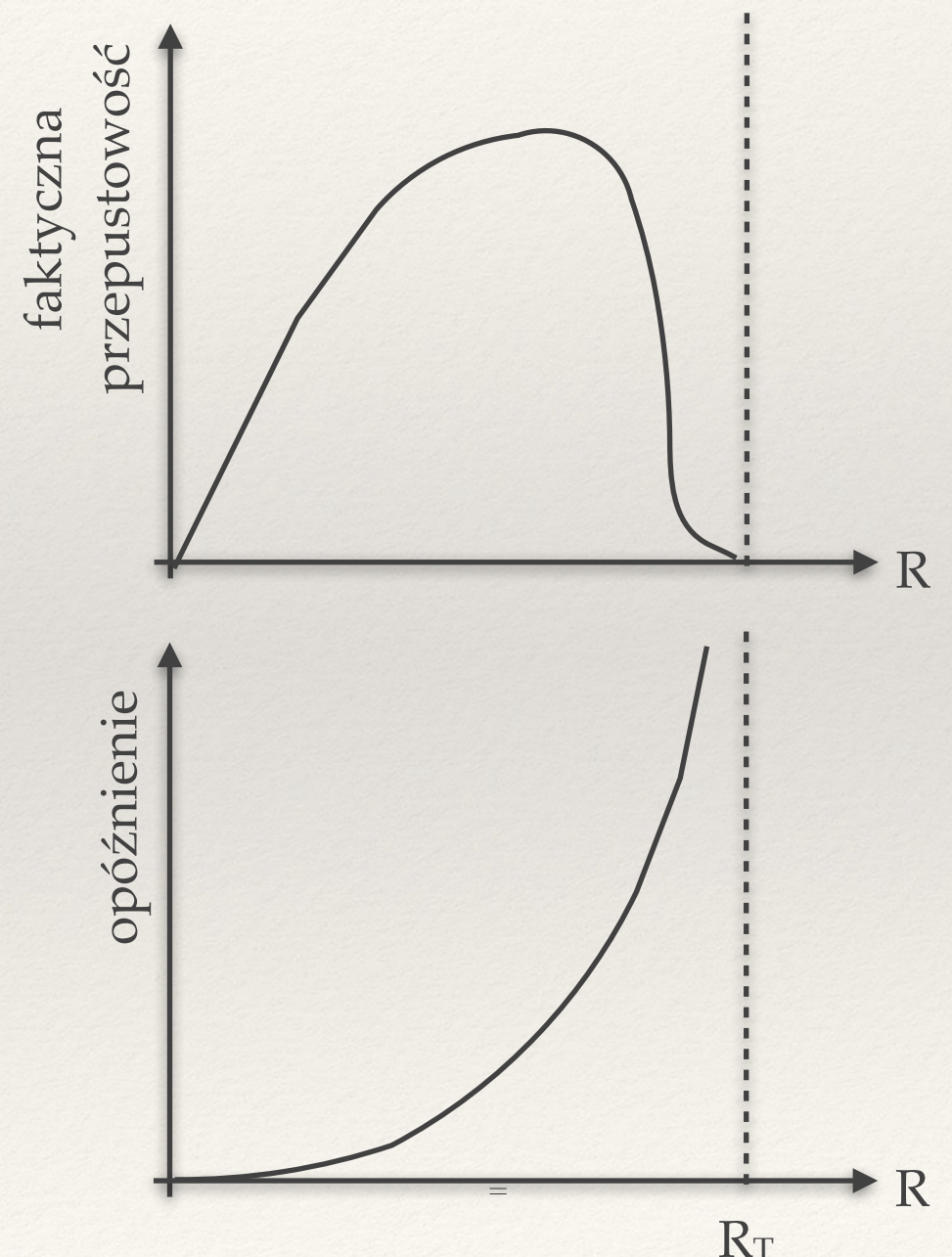
- ❖ Załóżmy, że pakiety wysyłane są od A do B losowo, ze **średnią** prędkością R .
- ❖ Matematyczna teoria kolejek → wykres rozmiaru kolejki.
- ❖ Opóźnienie jest liniową funkcją rozmiaru kolejki.



Opóźnienie i faktyczna przepustowość (1)



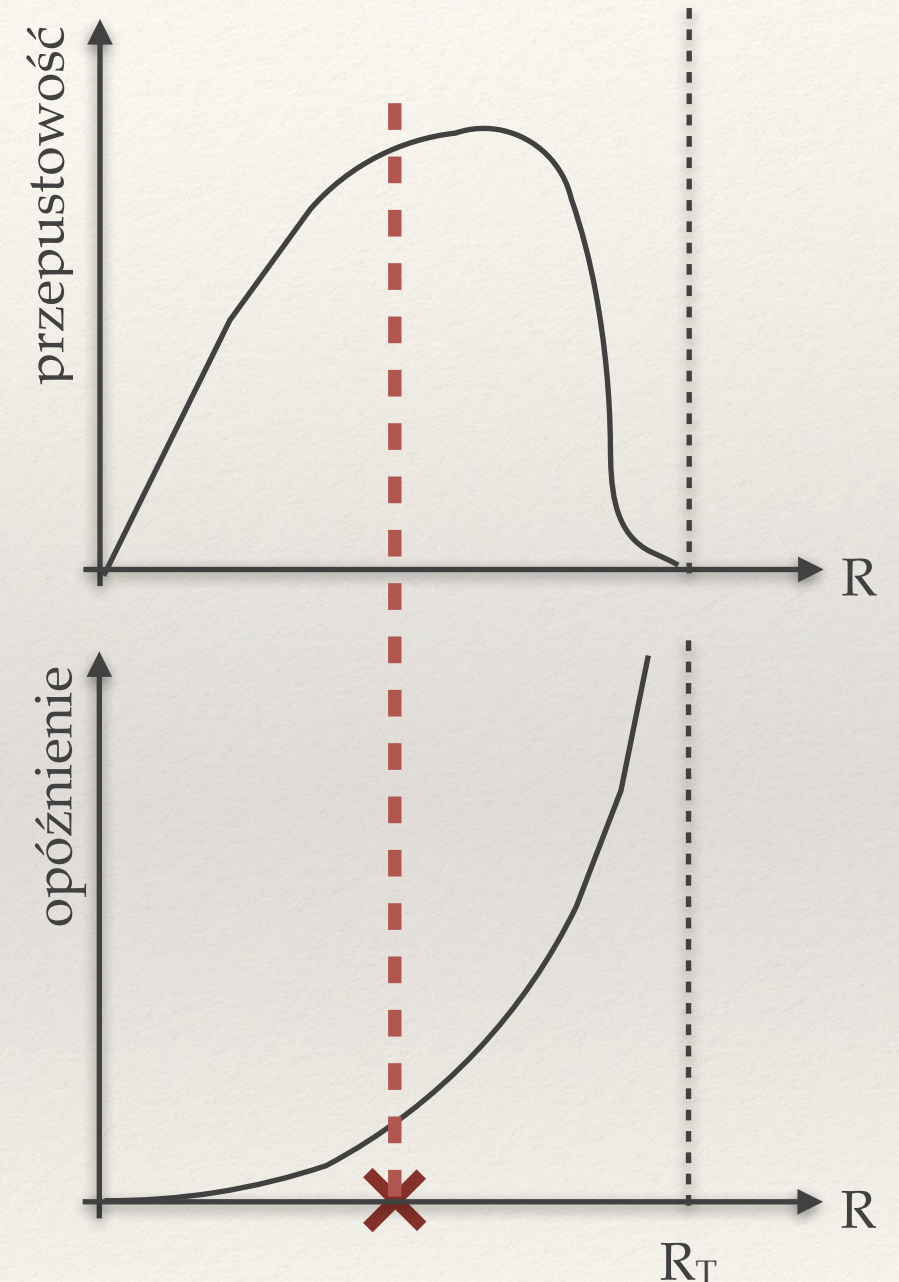
- ❖ Potrzebujemy sposobu na spowolnienie strumienia danych.
- ❖ W przeciwnym przypadku:
 - ✦ bardzo duże opóźnienia,
 - ✦ bardzo małą faktyczną przepustowość (dużo duplikatów).



Opóźnienie i faktyczna przepustowość (2)

Stan bliski przeciążenia jest dobry.

- ❖ Pełne kolejki
→ większe opóźnienia.
- ❖ Puste kolejki
→ moglibyśmy nadawać szybciej!
- ❖ Chcemy mieć mechanizm, który będzie utrzymywać obciążenie w okolicach optymalnego punktu.



Cele kontroli przeciążenia

- ❖ **Wysokie wykorzystanie łączy.**
 - ♦ Zajęte łącza = szybkie przesyłanie danych.
 - ♦ Małe opóźnienia

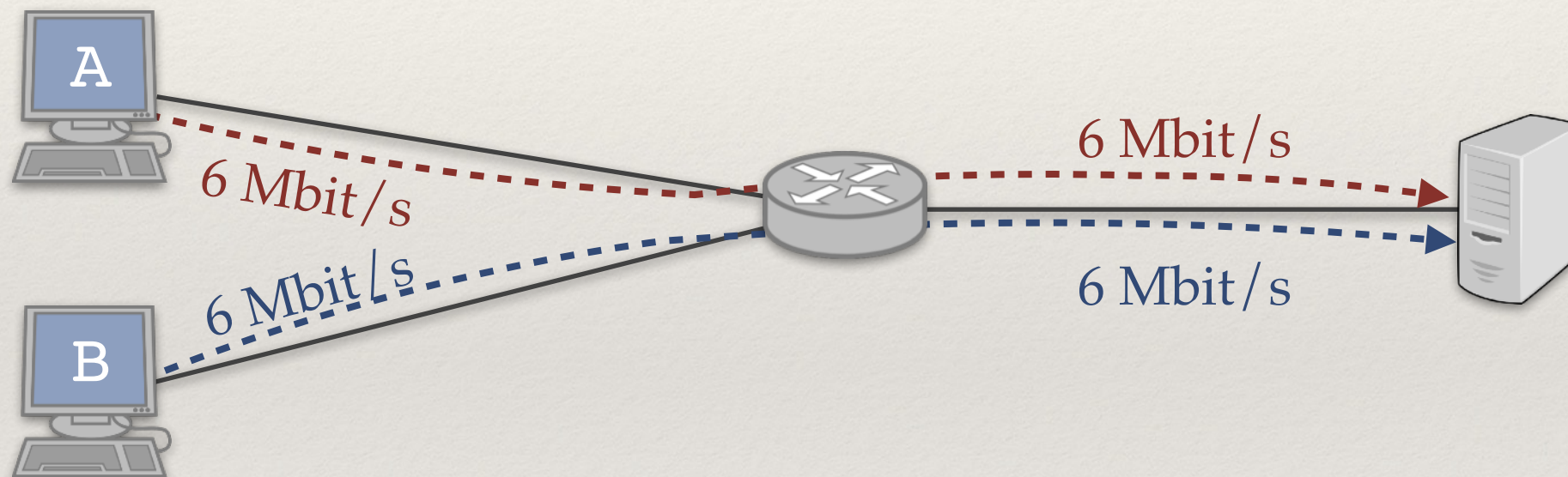
- ❖ **Sprawiedliwy podział łączy (*fairness*).**
 - ♦ Co to znaczy?

- ❖ **Dodatkowe cele**
 - ♦ Rozproszony algorytm.
 - ♦ Szybko reaguje na zmieniające się warunki.

Sprawiedliwy podział łącza

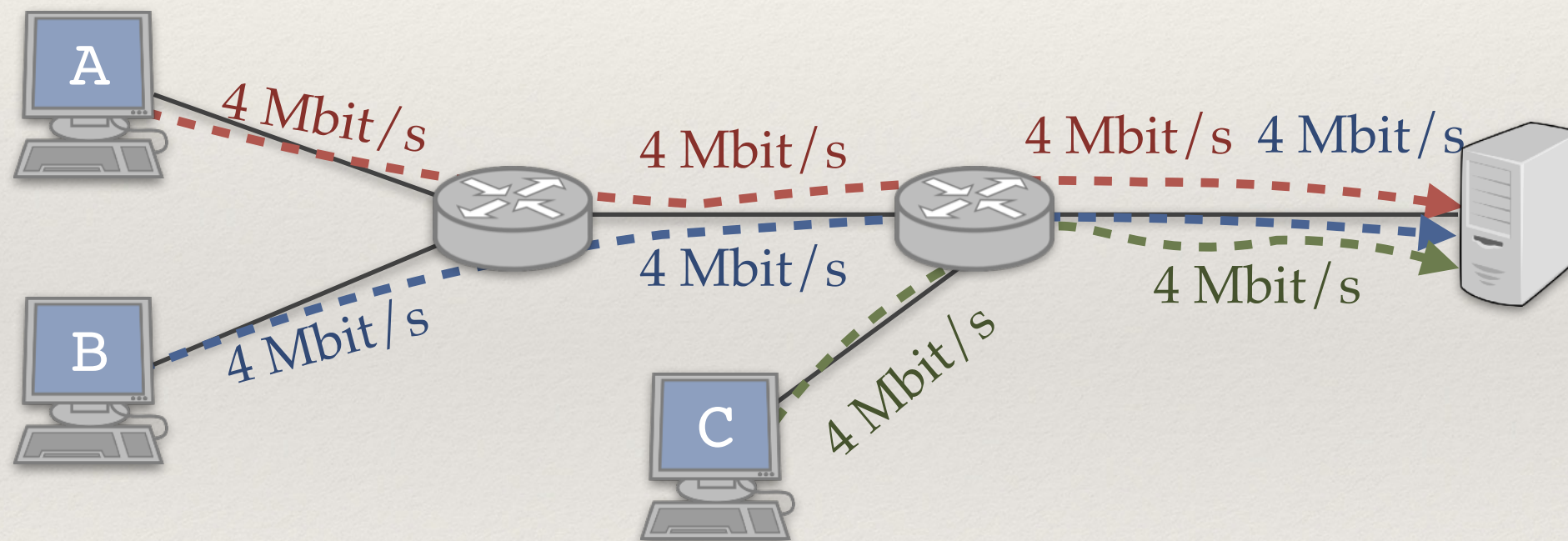
Sprawiedliwy podział łącza: przykład 1

- ❖ Każde łącze ma przepustowość 12 Mbit/s.
- ❖ Każdy komputer chce wysyłać do serwera jak najszybciej.



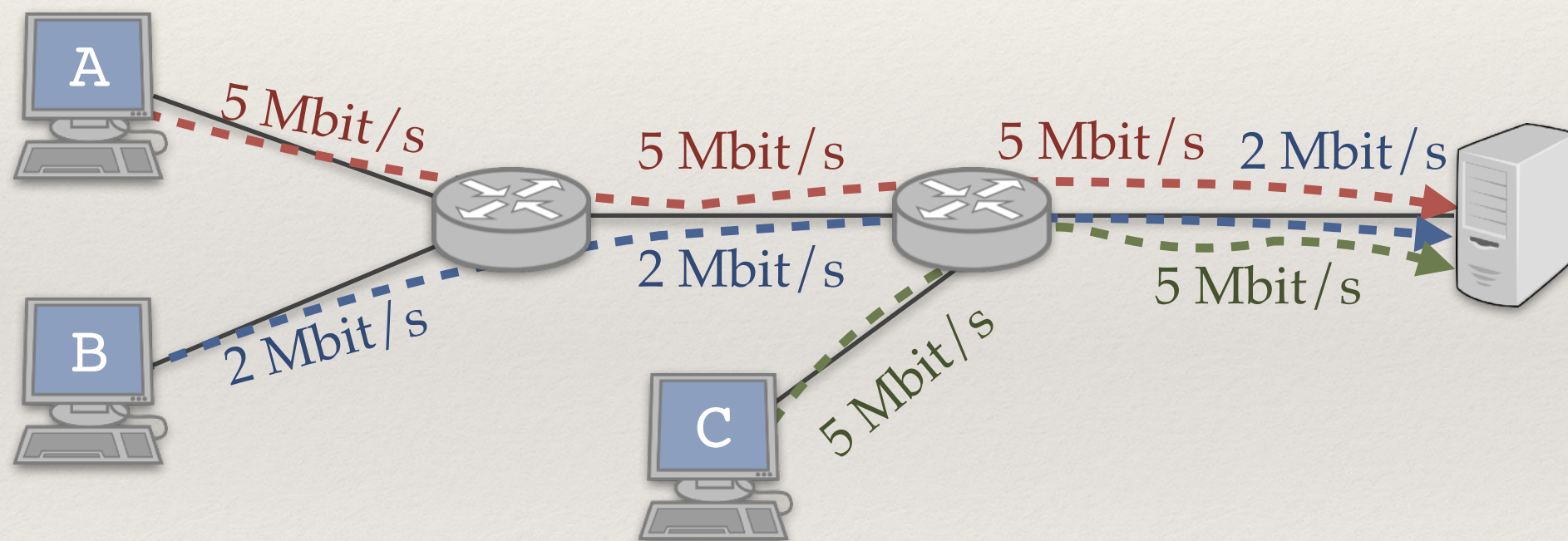
Sprawiedliwy podział łącza: przykład 2

- ❖ Każde łącze ma przepustowość 12 Mbit/s.
- ❖ Każdy komputer chce wysłać do serwera jak najszybciej.



Sprawiedliwy podział łącza: przykład 3

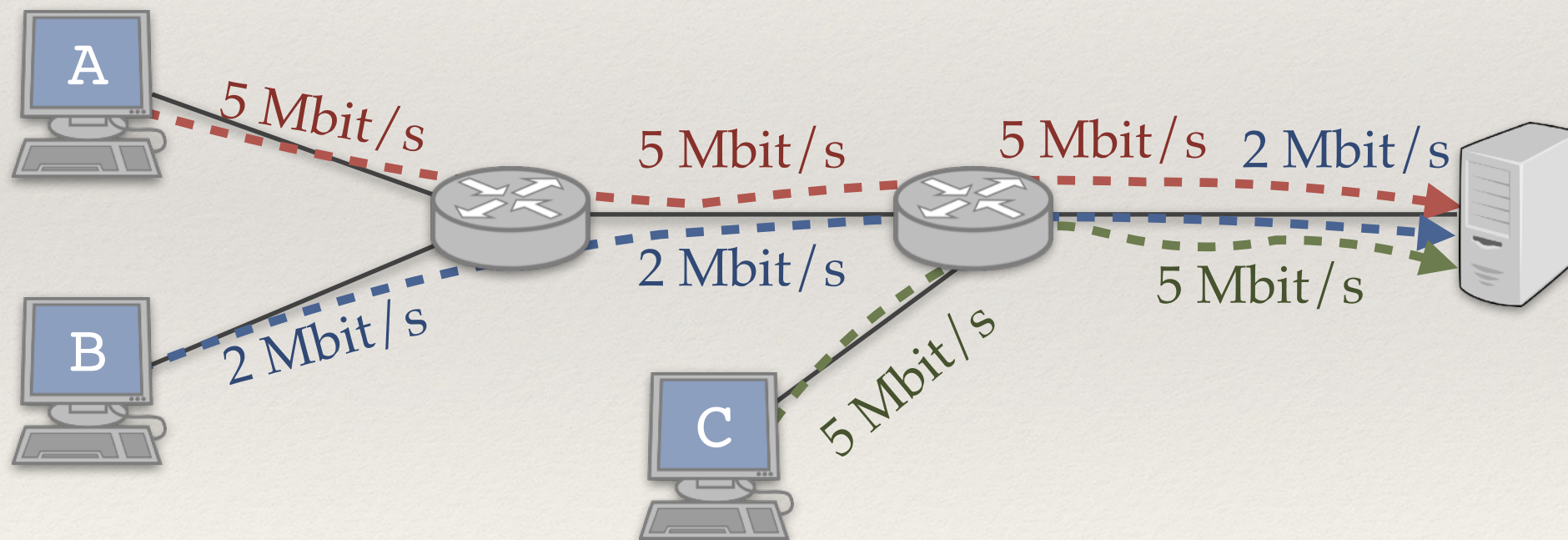
- ❖ Każde łącze ma przepustowość 12 Mbit/s, poza łączem między B a routerem, które ma przepustowość 2 Mbit/s.
- ❖ Każdy komputer chce wysyłać do serwera jak najszybciej.



- ❖ Czy to przypisanie jest „sprawiedliwe”, czy też powinniśmy dać B proporcjonalnie mniej łącza?

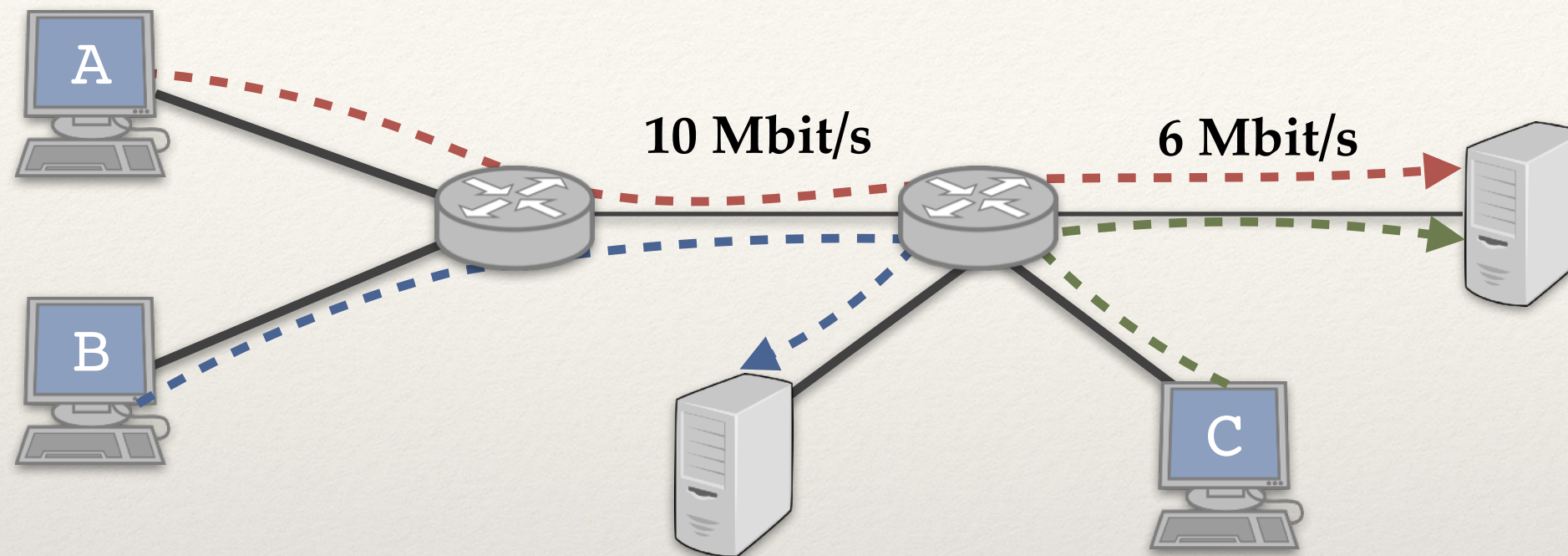
Max-Min fairness

- ❖ „Maksymalizuj minimalną przepustowość”
- ❖ Równoważnie: przypisanie jest *max-min fair*, jeśli nie można zwiększyć szybkości żadnego ze strumieni bez spowolnienia innego strumienia, który jest wolniejszy lub tak samo szybki.



Sprawiedliwy podział łącza vs. przepustowość

Nieoznaczone łącza mają nieskończoną przepustowość.



	„sprawiedliwe“	„niesprawiedliwe“
A	3 Mbit/s	1 Mbit/s
B	7 Mbit/s	9 Mbit/s
C	3 Mbit/s	5 Mbit/s
suma	13 Mbit/s	15 Mbit/s

AIMD

Kontrola przeciążenia w warstwie transportowej

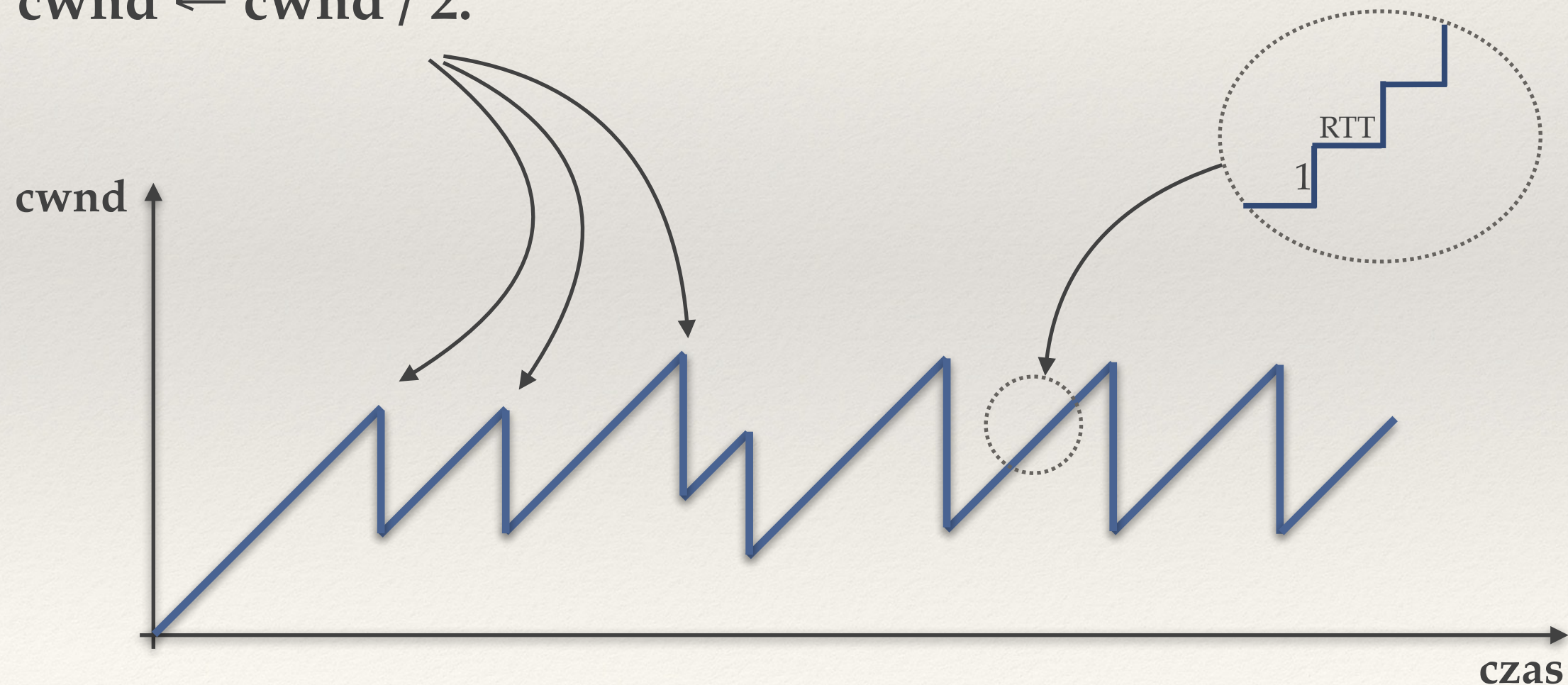
- ❖ Algorytm dla nadawcy.
- ❖ Wykorzystuje istniejące mechanizmy (okno przesuwne, modyfikuje rozmiar okna).
- ❖ Reaguje na obserwowane zdarzenia (utrata pakietów).
- ❖ Szacuje, ile wysłanych pakietów może bezproblemowo być „w trasie” do celu (wysłanych i jeszcze niepotwierdzonych).

Kontrola przepływu vs. kontrola przeciążenia

- ❖ Kontrola przepływu = nie chcemy zalać odbiorcy danymi.
 - ♦ $SWS = \text{oferowane okno}$.
- ❖ Kontrola przeciążenia = nie chcemy zalać sieci danymi.
 - ♦ Parametr $cwnd$ (*congestion window*) obliczany przez nadawcę.
 - ♦ $SWS = \min \{ \text{oferowane okno}, cwnd \}$.
- ❖ Będziemy zakładać, że oferowane okno $= \infty$.

AIMD (Additive Increase, Multiplicative Decrease)

- ❖ Pakiet wysłany poprawnie (otrzymaliśmy ACK):
 $\text{cwnd} \leftarrow \text{cwnd} + 1 / \text{cwnd}.$
(W ciągu RTT wysyłane cwnd segmentów, więc cwnd zwiększa się o 1).
- ❖ Pakiet zgubiony lub opóźniony (ACK nie dociera przed RTO)
 $\text{cwnd} \leftarrow \text{cwnd} / 2.$



Inny sposób patrzenia:

- ❖ AIMD nie kontroluje szybkości wysyłania.
- ❖ AIMD kontroluje liczbę pakietów (danego strumienia), która jednocześnie może być w sieci.

animacje

Inny sposób patrzenia:

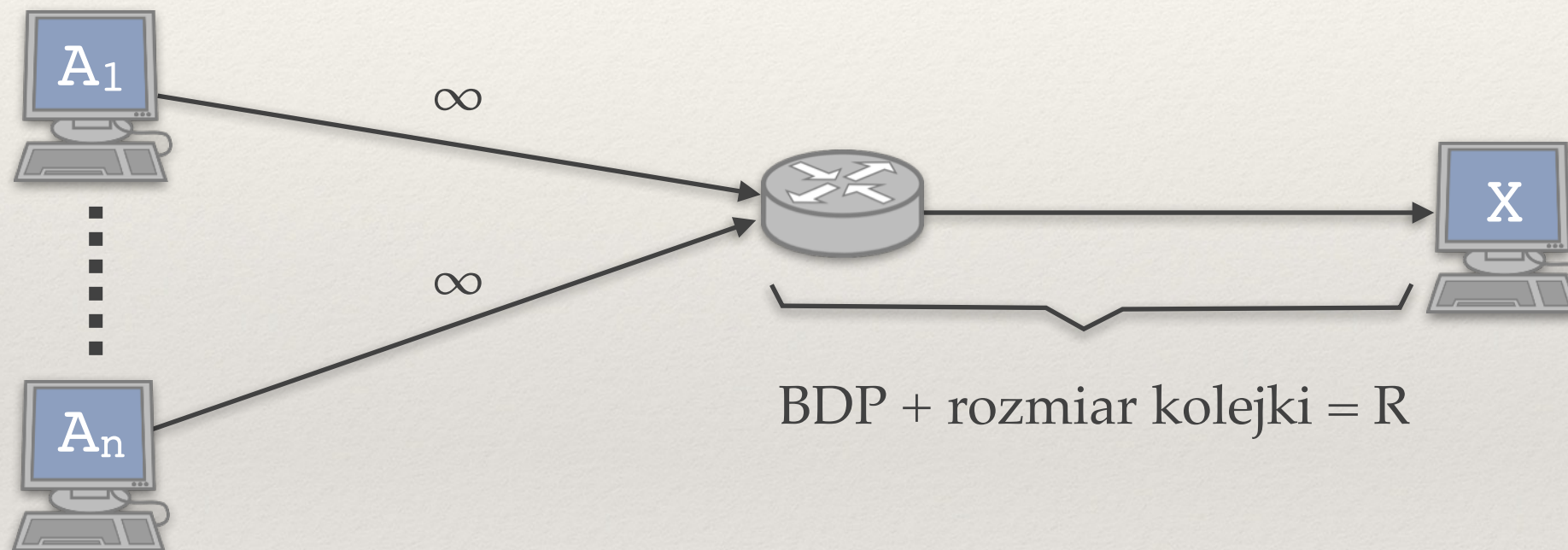
- ❖ AIMD nie kontroluje szybkości wysyłania.
- ❖ AIMD kontroluje liczbę pakietów (danego strumienia), która jednocześnie może być w sieci.

animacje

- ❖ Przy odpowiednio dużych buforach, najbardziej krytyczne łącze jest cały czas wykorzystane w 100%.

AIMD vs. sprawiedliwy podział i efektywność

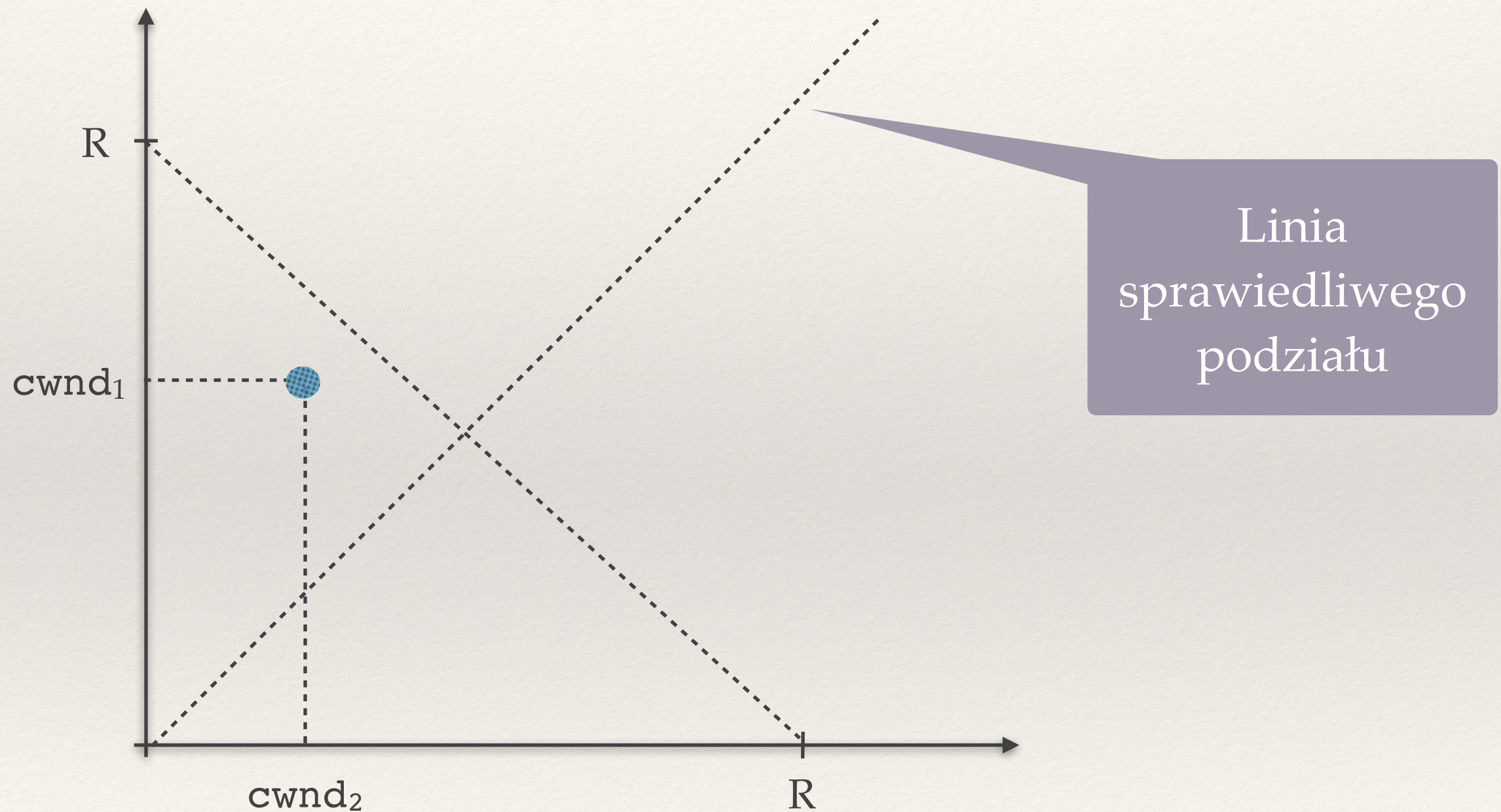
Własność AIMD: $A_1 \dots A_n$ rozpoczynają transmisje do X w dowolnych momentach \rightarrow ich rozmiary okien zbiegną do R/n .



Pokażemy to dla $n = 2$ na obrazku.

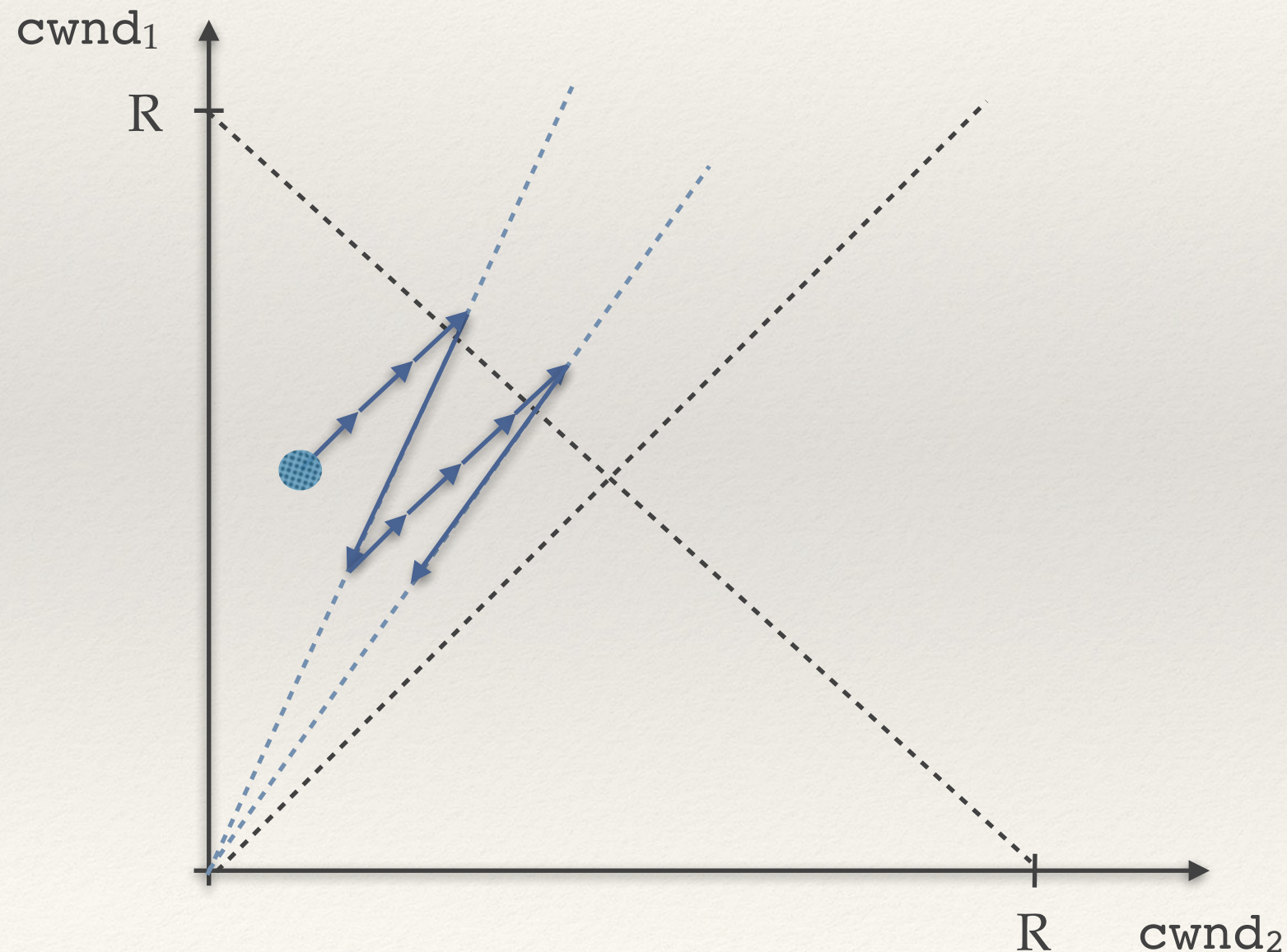
Sprawiedliwość podziału i efektywność (1)

- ❖ Pakiety gubią się wtedy i tylko wtedy, jeśli $cwnd_1 + cwnd_2 > R$



Sprawiedliwość podziału i efektywność (2)

- ❖ Rozmiary $cwnd_1$ i $cwnd_2$ jednocześnie rosną o 1 lub maleją dwukrotnie
- ❖ Docelowo mamy sprawiedliwy podział łącza i $cwnd_1 + cwnd_2$ oscylujące w przedziale $[R/2, R]$.



Kontrola przeciążenia w TCP

Kontrola przeciążenia w TCP

❖ AIMD w TCP:

- ♦ **ACK pakietu** (explicite albo wnioskowany z potwierdzenia skumulowanego) → zwiększamy cwnd o $MSS * MSS / cwnd$.
 - Co RTT wysyłane jest cwnd / MSS segmentów: wszystkie będą potwierdzone → zwiększymy cwnd o MSS.
- ♦ **Pakiet zaginął** (przekroczony timeout albo otrzymaliśmy podwójne potwierdzenie) → zmniejszamy cwnd dwukrotnie.

Kontrola przeciążenia w TCP

❖ AIMD w TCP:

- ♦ **ACK pakietu** (explicite albo wnioskowany z potwierdzenia skumulowanego) → zwiększamy cwnd o $MSS * MSS / cwnd$.
 - Co RTT wysyłane jest cwnd / MSS segmentów: wszystkie będą potwierdzone → zwiększymy cwnd o MSS.
- ♦ **Pakiet zaginął** (przekroczony timeout albo otrzymaliśmy podwójne potwierdzenie) → zmniejszamy cwnd dwukrotnie.

Nie do końca prawda.

To jest tylko faza „unikania przeciążenia”.

Dodatkowo TCP wprowadza fazę „wolnego startu”

Wolny start w TCP

❖ Faza wolnego startu:

- ♦ Zaczynamy od $cwnd = MSS$.
- ♦ Po każdym ACK zwiększamy $cwnd$ o MSS .
 - \rightarrow Co RTT $cwnd$ zwiększa się dwukrotnie.
- ♦ Faza trwa do utraty pierwszego pakietu.

❖ Strata pakietu w dowolnej fazie:

- ♦ $ssthresh \leftarrow cwnd / 2$.
- ♦ uruchamiamy fazę wolnego startu do momentu, gdy $cwnd > ssthresh$.

Wolny start w TCP

❖ Faza wolnego startu:

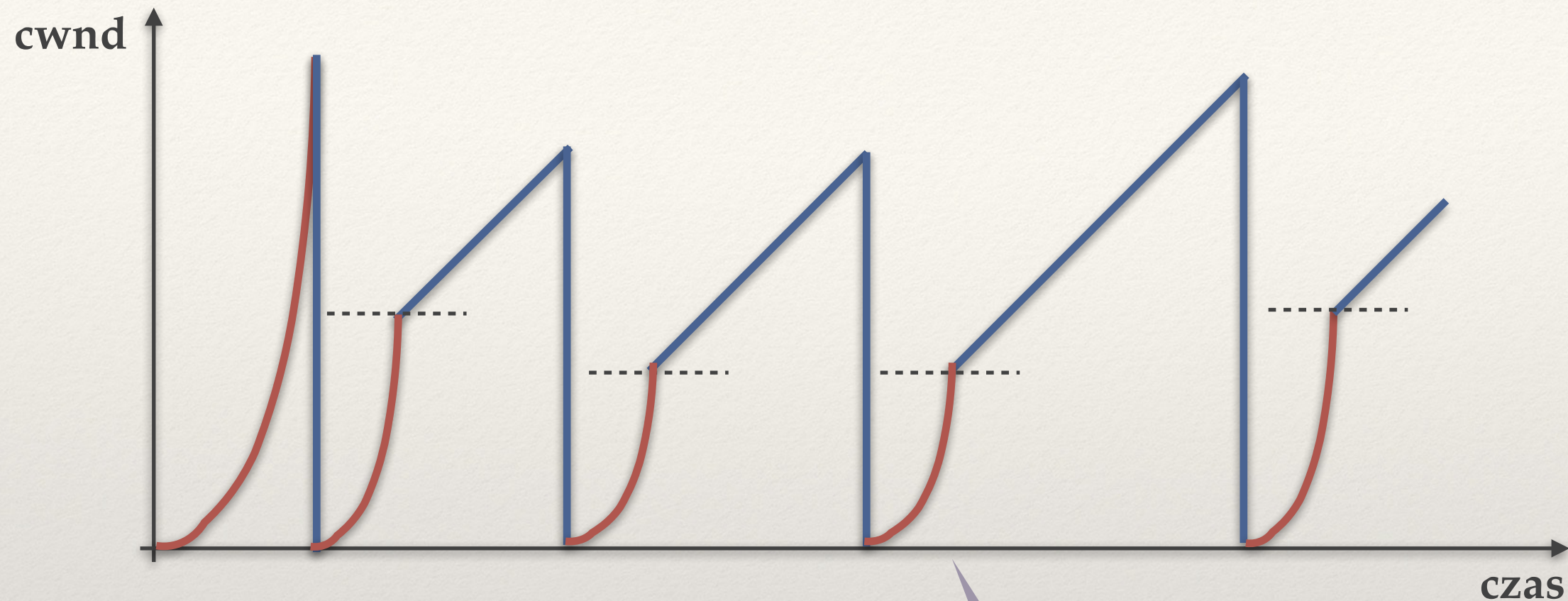
- ♦ Zaczynamy od $cwnd = MSS$.
- ♦ Po każdym ACK zwiększamy $cwnd$ o MSS .
 - \rightarrow Co RTT $cwnd$ zwiększa się dwukrotnie.
- ♦ Faza trwa do utraty pierwszego pakietu.

Wolny start = nie ustawiamy okna od razu na oferowane przez odbiorcę.

❖ Strata pakietu w dowolnej fazie:

- ♦ $ssthresh \leftarrow cwnd / 2$.
- ♦ uruchamiamy fazę wolnego startu do momentu, gdy $cwnd > ssthresh$.

AIMD w TCP: przykład

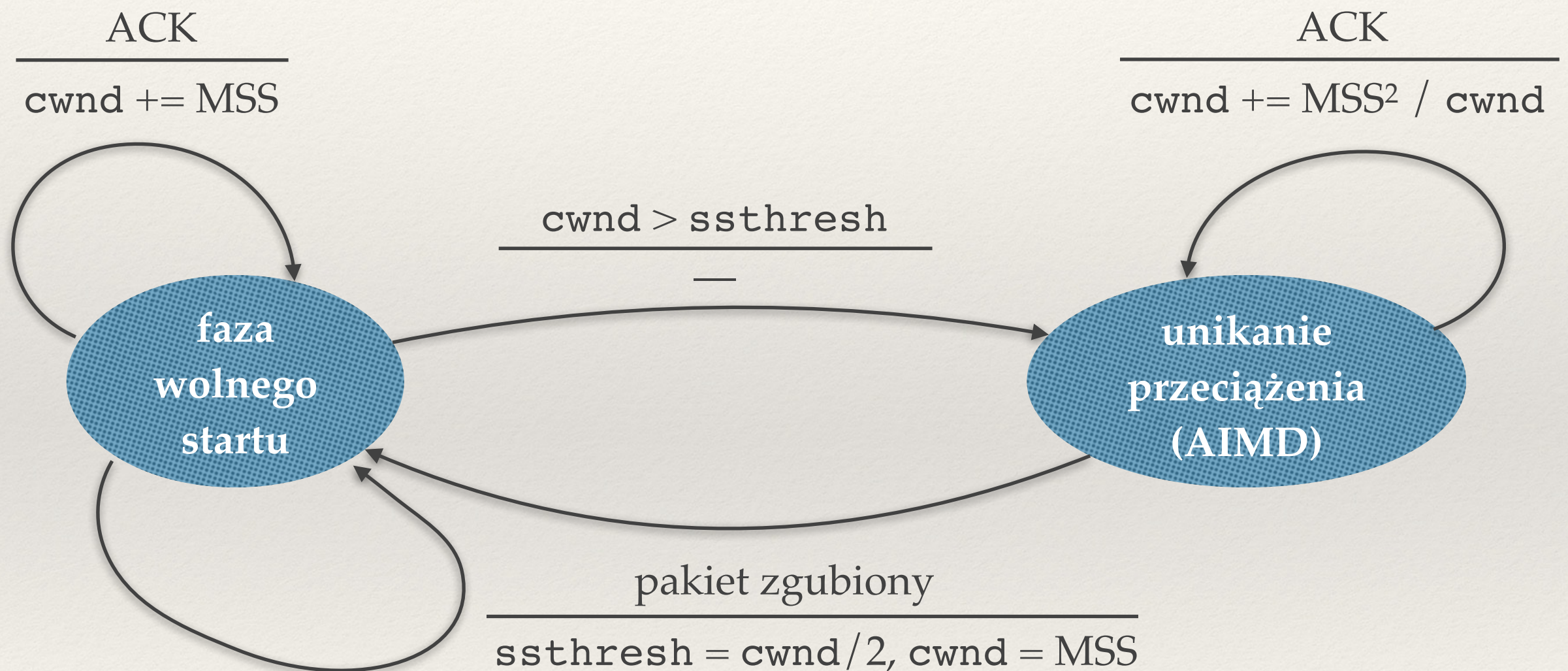


- faza wolnego startu
- faza unikania przeciążenia
- - - ssthresh

Fazy wolnego startu mają logarytmiczną długość, poza nimi TCP wykonuje AIMD.

Fazy w TCP: diagram przejścia

Inicjalizacja: faza wolnego startu, $ssthresh = \infty$, $cwnd = MSS$.



Źródła informacji o utracie pakietu

❖ Timeout dla pakietu

❖ Wielokrotny ACK

- ♦ Przykładowo: odbiorca dostaje segmenty 1, 2, 3, 5, 6
→ wysyła ACK 1, ACK 2, ACK 3, ACK 3, ACK 3.
- ♦ Statystycznie mniejsza szansa, że mamy do czynienia z dłuższym przeciążeniem (kolejne pakiety doszły do odbiorcy)!
- ♦ **Szybka retransmisja** (wysyłamy brakujący segment bez czekania na timeout).
- ♦ **Szybkie przywracanie** (pomijamy fazę krótkiego startu):
 $ssthresh = cwnd / 2; cwnd = ssthresh.$

Wspomaganie przez routery

RED (Random Early Detection)

- ❖ Router na trasie wyrzuca losowe pakiety.
- ❖ Prawdopodobieństwo wyrzucenia ustalane jako rosnąca funkcja **średniej** długości kolejki.
 - ✦ Nie reaguje na krótkotrwałe zwiększenia kolejki.
- ❖ Krótsze kolejki → mniejsze opóźnienia.
- ❖ Desynchronizacja strumieni (zmniejszają prędkości w różnych momentach).

ECN (Explicit Congestion Notification)

- ❖ Prawdopodobne przeciążenie
→ router ustawia bity ECN w nagłówku IP.
- ❖ Odbiorca ustawia bity ECN w nagłówku TCP ACK.
- ❖ Nadawca reaguje tak, jak na utratę pakietu.

nagłówek IP:

wersja	IHL	typ usługi	całkowita długość pakietu
pola związane z fragmentacją pakietu			
TTL	protokół		suma kontrolna nagłówka IP
źródłowy adres IP			
docelowy adres IP			

nagłówek TCP:

port źródłowy				port docelowy	
numer sekwencyjny (numer pierwszego bajtu w segmencie)					
numer ostatniego potwierdzanego bajtu + 1					
offset	000	ECN	U-A-P-R-S-	oferowane okno	
suma kontrolna				wskaźnik pilnych danych	
dodatkowe opcje, np. potwierdzanie selektywne					

Problemy z kontrolą przeciążenia

Problemy

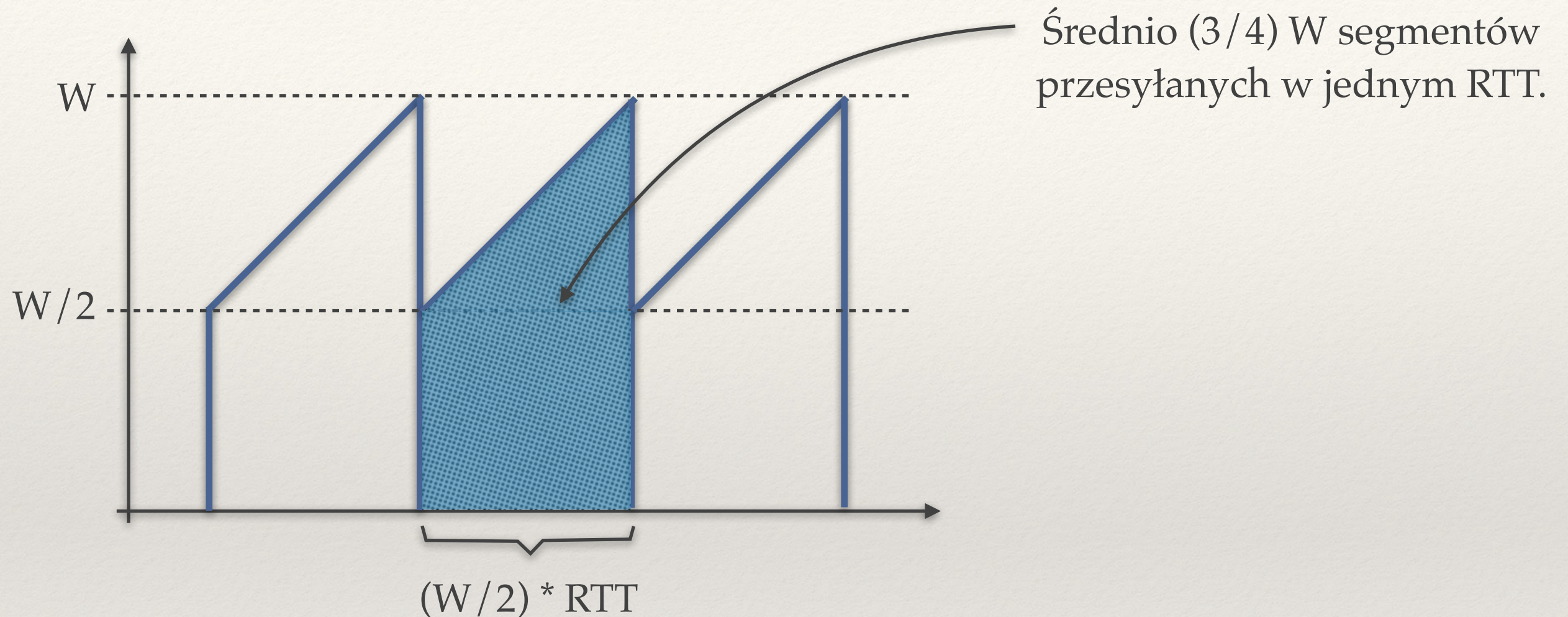
- ❖ Krótkie połączenia.
- ❖ Przepustowość proporcjonalna do $1/\sqrt{p}$, gdzie p jest frakcją traconych pakietów.
- ❖ Podatność na oszukiwanie.

Krótkie połączenia

- ❖ Większość połączeń przesyła poniżej 100 KB danych.
- ❖ Nie wychodzą poza fazę wolnego startu!
- ❖ Remedium: trwałe połączenia, HTTP 2

Przepustowość vs. straty segmentów (1)

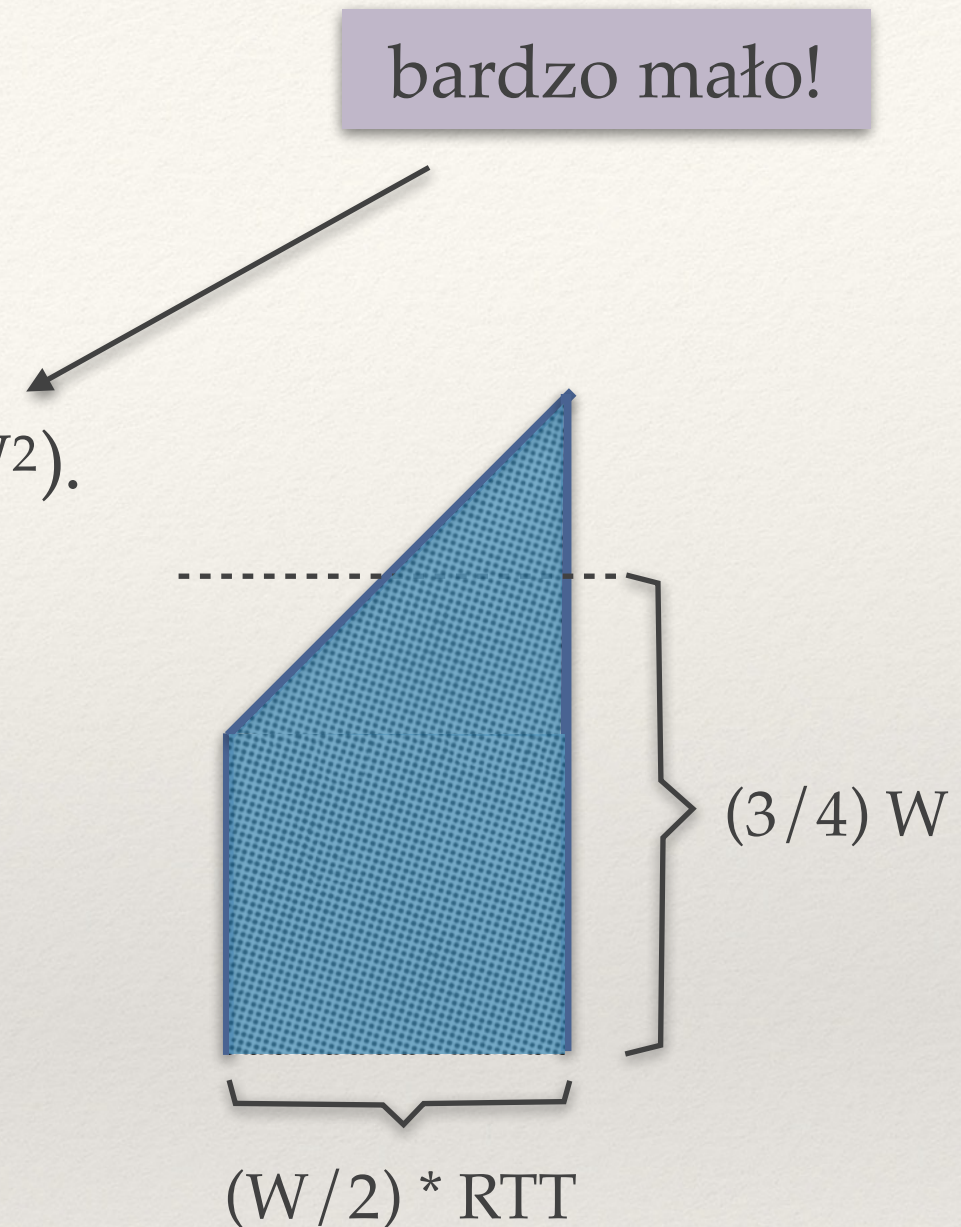
- ❖ Rozważmy stabilny stan i pomińmy fazy wolnego startu.



- ❖ W jednej fazie: przesyłanych $(3/8) W^2$ segmentów, jeden gubiony.
- ❖ Średnia prędkość przesyłania: $(3/4) W / RTT$.

Przepustowość vs. straty segmentów (2)

- ❖ Frakcja traconych segmentów: $p = 8/3 (1/W^2)$.



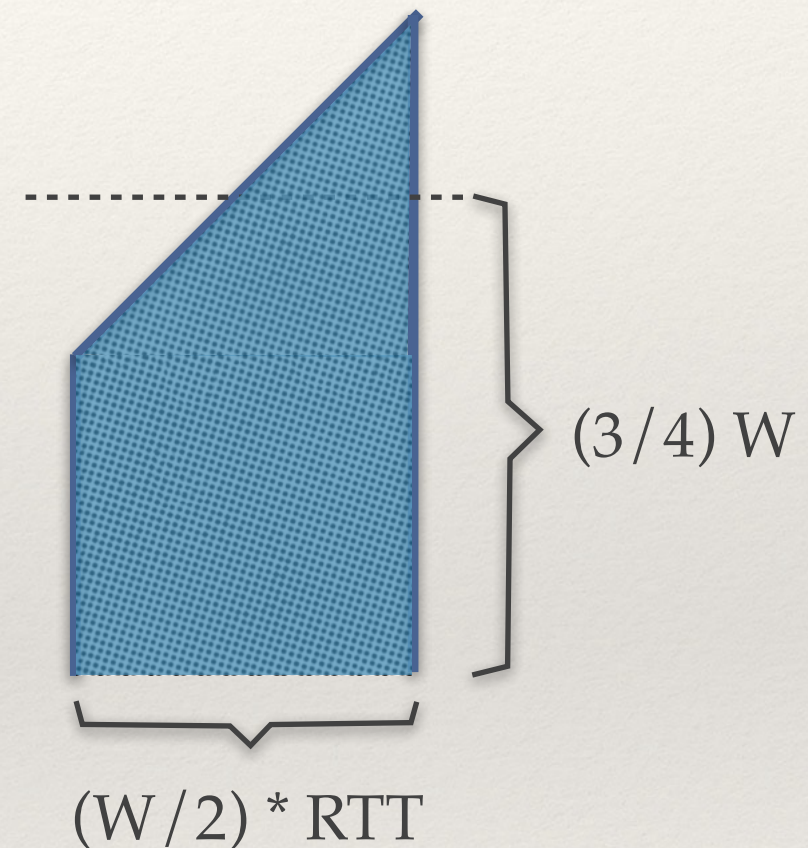
Przepustowość vs. straty segmentów (2)

- ❖ Frakcja traconych segmentów: $p = 8/3 (1/W^2)$.

- ❖ Średnia prędkość przesyłania (segment / sek.)

$$T = \frac{3}{4} \cdot \frac{W}{RTT} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{RTT \cdot \sqrt{p}}$$

bardzo mało!



Łączy o dużym BDP

- ❖ Prędkość przesyłania: $T = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\text{RTT} \cdot \sqrt{p}}$ segmentów / sekundę.
- ❖ Transmisja RTT = 100 ms, MSS = 1500 bajtów, łącze 10 Gbit/s.
- ❖ Żeby osiągnąć $T = 10 \text{ Gbit/s}$, $p \approx 2 \cdot 10^{-10}$:
 - ✦ Co najwyżej jeden tracony segment na $2 \cdot 10^{10}$ segmentów.
 - ✦ Nie do zrealizowania w praktyce.
- ❖ Dla takich łączy FastTCP ze zmodyfikowanym AIMD: powyżej pewnej wartości cwnd zwiększane szybciej i zmniejszane wolniej.

TCP w WiFi

- ❖ Przepustowość proporcjonalna do $1/\sqrt{p}$, gdzie p jest frakcją traconych pakietów.
- ❖ Pakiety tracone niekoniecznie przez przeciążenie, np. w sieciach bezprzewodowych tracone przez interferencje!
- ❖ Żeby TCP działało sensownie konieczne są retransmisje dokonywane przez warstwy niższe (warstwę łącza danych).

Transmisje o mniejszym RTT są preferowane

- ❖ Prędkość przesyłania: $T = (3/4) W / \text{RTT}$ (segmentów / sek).
- ❖ Dwie transmisje korzystającego z tego samego łącza o małej przepustowości: ich okna przeciążenia (W) są takie same.
- ❖ Prędkości transmisji proporcjonalne do $1 / \text{RTT}$: transmisje o mniejszym RTT przesyłane szybciej!

Nadużycia

- ❖ Zaczynanie wolnego startu z $cwnd > 1 \text{ MSS}$.
- ❖ Szybsze zwiększanie $cwnd \rightarrow$ niesprawiedliwy podział łącza.
- ❖ Otwieranie wielu połączeń (np. aplikacje P2P), bo każde połączenie ma takie samo $cwnd$.

Lektura dodatkowa

- ❖ Kurose & Ross: rozdział 3.
- ❖ Tanenbaum: rozdział 6.
- ❖ TCP Congestion Control RFC: <https://tools.ietf.org/html/rfc5681>

Zagadnienia

- ❖ Czym różni się kontrola przepływu od kontroli przeciążenia?
- ❖ Co to jest przeciążenie?
- ❖ Na czym polega mechanizm opóźnionych potwierdzeń?
- ❖ Jaka jest zależność między rozmiarem okna nadawcy a prędkością transmisji?
- ❖ Czy nieskończone bufory rozwiązałyby problem przeciążenia?
- ❖ Jak zależy średni rozmiar kolejki od średniej prędkości nadchodzenia pakietów?
- ❖ Jakie są cele kontroli przeciążenia?
- ❖ Jak można definiować sprawiedliwy podział łącza? Co to jest *max-min fairness*?
- ❖ Na jakiej podstawie zmienia się rozmiar okna przeciążenia?
- ❖ Kiedy TCP wnioskuje, że pakiet zaginął?
- ❖ Opisz algorytm ustalania rozmiaru okna przeciążenia
- ❖ Rozwiń skrót AIMD. Czego dotyczy?
- ❖ W jaki sposób AIMD gwarantuje sprawiedliwy podział łącza?
- ❖ Opisz fazy unikania przeciążenia i wolnego startu w TCP.
- ❖ Opisz mechanizm szybkiej retransmisji i szybkiego przywracania.
- ❖ Na czym polega mechanizm RED?
- ❖ Opisz działanie mechanizmu ECN (*explicit congestion notification*).
- ❖ Jaka jest relacja w AIMD między przepustowością a traconymi pakietami?
- ❖ Jakie modyfikacje wprowadza FastTCP do AIMD? Dlaczego?