STUDIA INFORMATICA 2003
Volume 24 Number 2A (53)

Joanna DOMAŃSKA, Tadeusz CZACHÓRSKI
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

# WPŁYW SAMOPODOBNEJ NATURY RUCHU NA ZACHOWANIE MECHANIZMU CIEKNĄCEGO WIADRA*

**Streszczenie.** W niniejszym artykule opisano wpływ doboru źródła ruchu na szacowanie rozkładu długości kolejek oraz prawdopodobieństwa strat pakietów w ruchu sieciowym regulowanym za pomocą mechanizmu cieknącego wiadra. Porównano model tego mechanizmu używający poissonowskiego źródła ruchu z modelem używającym źródła generującego ruch samopodobny.

**Słowa kluczowe:** cieknące wiadro, samopodobieństwo, ocena efektywności, modele kolejkowe.

# THE INFLUENCE OF TRAFFIC SELF-SIMILARITY ON THE PERFORMANCE OF LEAKY BUCKET MECHANISM

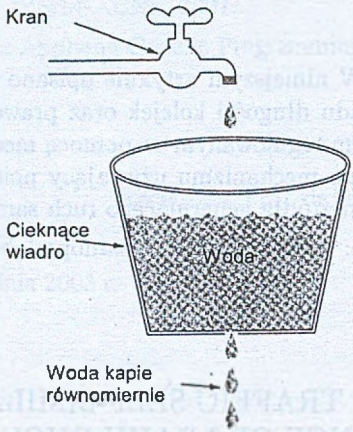
**Summary.** The article discusses the relations between the characteristics of input traffic and the queue distribution and packet loss probability observed at leacky bucket mechanism which supervises the traffic. The performance of leacky bucket mechanism with Poisson input traffic is compared with the one in presence of self-similar traffic. The analysis is based on discrete time Markov models and on simulation. Numerical results confirm strong influence od self-similarity on the performance of leacky bucket mechanism.

**Keywords:** leacky bucket, self-similarity, performance evaluation, queueing models.

*Artykuł jest wynikiem prac w ramach grantu KBN Nr 7 T11C 020 21

## 1. Zasada działania mechanizmu cieknącego wiadra

Mechanizm cieknącego wiadra zapobiega zbyt dużym odchyleniom bieżącej charakterystyki źródła od założeń przyjętych w kontrakcie pomiędzy użytkownikiem a siecią. Zmniejszana jest w ten sposób możliwość powstania zatłoczenia w sieci, co podwyższa jakość usług. Zasadę działania miechanizmu cieknącego wiadra, zaproponowanego przez J.S. Turnera (1986) [10], oraz wytłumaczenie nazwy mechanizmu przedstawia rysunek 1: woda wpływa do wiadra z małą dziurą w dnie i niezależnie od tego, jak zmienia się strumień wejściowy, natężenie strumienia wyjściowego jest stałe (dopóki jest woda w wiadrze).

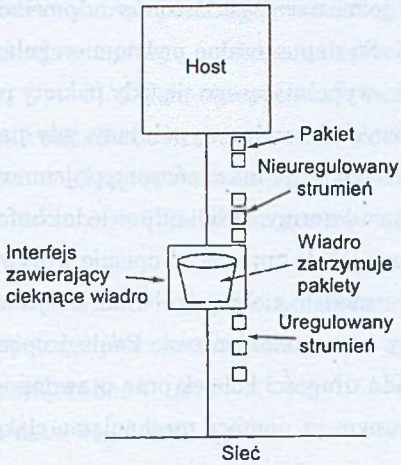



Rys. 1. Cieknące wiadro z wodą
Fig. 1. A leaky bucket with water

Jeżeli wiadro jest pełne, to nadmiar wody wypływa na zewnątrz i jest tracony. Tę samą zasadę można zastosować do przepływu pakietów, jak to pokazano na rysunku 2.

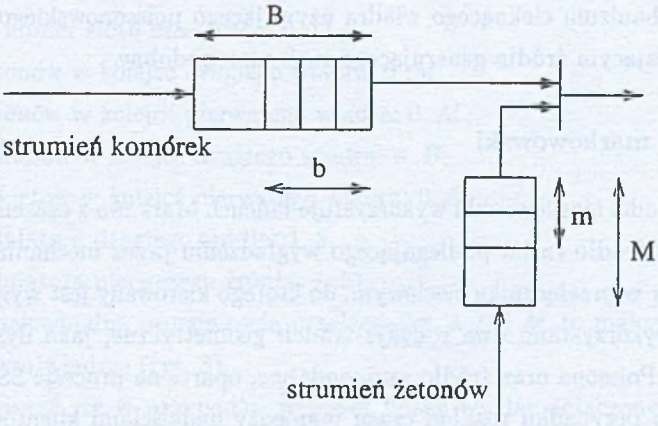
Każdy host jest podłączony do sieci poprzez interfejs realizujący zasadę cieknącego wiadra, reprezentowanego np. przez wewnętrzną kolejkę o ograniczonej pojemności. Mechanizm ten może być utworzony zarówno na drodze sprzętowej, jak i programowej (symulowany przez system operacyjny stacji).

W artykule analizowany jest zmodyfikowany algorytm cieknącego wiadra, zwany cieknącym wiadrem z żetonami (ang. *token bucket algorithm*), o bardziej elastycznym działaniu, uwzględniającym większe nieregularności strumienia wejściowego. Klasyczny algo-




Rys. 2. Cieknące wiadro z pakietami
Fig. 2. A leaky bucket with packets

rytm cieknącego wiadra narzuca sztywny strumień wyjściowy, niezależnie od zmienności strumienia wejściowego. W algorytmie z żetonami pakiety (komórki) wysyłane przez użytkownika mogą wejść do sieci, jeżeli uzyskają żeton (rysunek 3), a żetony są generowane przez sieć regularnie, w stałych odstępach czasu.




Rys. 3. Model mechanizmu cieknącego wiadra z żetonami
Fig. 3. Model of leaky bucket with tokens

Liczba generowanych w jednostce czasu żetonów odpowiada przyznanemu użykownikowi pasmu przepustowości. Są dopuszczalne pewnę nieregularności w strumieniu pakietów: oprócz bufora pakietów, wypełniającego się, gdy pakiety przychodzą zbyt często, jest przewidziany bufor rezerwowych żetonów, wypełniany, gdy pakiety przychodzą rzadziej, niż było to ustalone. Również ten bufor ma skończoną pojemność, która ogranicza dopuszczalne odchylenia strumienia od normy. Jeżeli odpowiedni bufor jest pełen, przychodzące pakiety lub żetony są tracone. Wiele opracowań opisuje wpływ tego mechanizmu na ruch komórek [6, 5, 7]. Istniejące modele cieknącego wiadra wykorzystują jednak źródła ruchu nie wykazującego cechy samopodobieństwa. Poniżej opisano wpływ doboru źródła ruchu na szacowanie rozkładu długości kolejek oraz prawdopodobieństwa strat pakietów w ruchu sieciowym regulowanym za pomocą mechanizmu cieknącego wiadra.

## 2. Model mechanizmu cieknącego wiadra z żetonami

Celem zbadania wpływu doboru źródła ruchu na szacowanie rozkładu długości kolejek oraz prawdopodobieństwa strat pakietów w ruchu sieciowym regulowanym za pomocą mechanizmu cieknącego wiadra z żetonami, utworzono analityczny model takiego mechanizmu. Aby potwierdzić prawidłowość uzyskanych wyników oraz rozszerzyć zakres analizowanych parametrów, utworzono również analogiczny model symulacyjny. Porównano model mechanizmu cieknącego wiadra używającego poissonowskiego źródła ruchu z modelem używającym źródła generującego ruch samopodobny.

### 2.1. Model markowowski

Utworzony model markowowski wykorzystuje łańcuch Markowa z czasem dyskretnym. Model obejmuje: źródło ruchu podlegającego wygładzeniu przez mechanizm cieknącego wiadra oraz bufor w przełączniku sieciowym, do którego kierowany jest wygładzony ruch.

W modelu wykorzystano dwa rodzaje źródeł: geometryczne, jako dyskretny odpowiednik procesu Poissona oraz źródło samopodobne, oparte na procesie SSMP(5) [1, 4].

W pierwszym przypadku rozkład czasu pomiędzy nadejściami klientów jest geometryczny, tzn. klient przychodzi w jednostce czasu z prawdopodobieństwem $\alpha$, a nie przychodzi z prawdopodobieństwem $1 - \alpha$. SSMP(5) oznacza, że rozkład czasu pomiędzy nadejściami klientów jest procesem typu SSMP (ang. Special Semi-Markov Process), tzn. że nadejście klienta w jednostce czasu zależy od stanu modulatora. Działanie mechani-

zmu cieknącego wiadra modelowano za pomocą dwóch kolejek służących do przechowywania pakietów, gdy przychodzą one zbyt często, oraz żetonów, gromadzących się, gdy pakiety przychodzą rzadziej (rys. 3). Celem obserwowania zachowania bufora w przełączniku przy różnym obciążeniu zmieniano liczbę strumieni dochodzących do przełącznika, kontrolowanych mechanizmem cieknącego wiadra. Rozkład czasu obsługi w przełączniku jest geometryczny z parametrem $\alpha = 0.25$. Żeton generowany jest co dwanaście slotów czasowych.

W przypadku geometrycznego modelu źródła ruchu oraz dwóch strumieni dochodzących do przełącznika stan systemu jest określony wektorem o następującej postaci:

(liczba pakietow w przełączniku: $0..K$,
aktualny numer slotu czasowego: 0..11,
liczba żetonów w kolejce drugiego wiadra: $0..M$,
liczba żetonów w kolejce pierwszego wiadra: $0..M$,
liczba pakietow w kolejce drugiego wiadra: $0..B$,
liczba pakietow w kolejce pierwszego wiadra: $0..B$),

gdzie $K$ jest maksymalną pojemnością przełącznika, a $B$ i $M$ to maksymalne długości kolejek w każdym wiadrze (rys. 3).

W przypadku samopodobnego modelu źródła ruchu oraz dwóch wiader dochodzących do przełącznika wektor stanu systemu ma postać:

(liczba pakietow w przełączniku: $0..K$,
aktualny numer slotu czasowego: 0..11,
liczba żetonów w kolejce drugiego wiadra: $0..M$,
liczba żetonów w kolejce pierwszego wiadra: $0..M$,
liczba pakietow w kolejce drugiego wiadra: $0..B$,
liczba pakietow w kolejce pierwszego wiadra: $0..B$,
stan modulatora drugiego źródła: 1..5,
stan modulatora pierwszego źródła: 1..5),

gdzie $K$ jest maksymalną pojemnością przełącznika, a $B$ i $M$ to maksymalne długości kolejek w każdym wiadrze (rys. 3).

Łatwo zauważyć, że w przypadku większej liczby wiader dołączonych do przełącznika, stan systemu powiększa się o dwa elementy dla każdego wiadra w przypadku źródeł geometrycznych oraz o trzy elementy dla każdego wiadra w przypadku źródeł samopodobnych.

Liczba stanów analizowanego systemu wzrasta wraz ze wzrostem maksymalnych długości kolejek (parametry $B$, $M$ i $K$). Przykładowo, dla modelu z dwoma wiadrami, liczba

stanów wynosi dla źródeł geometrycznych 21 906 stanów ($B = 10$, $M = 2$, $K = 9$) lub 106 846 stanów ($B = 16$, $M = 6$, $K = 15$), dla źródeł samopodobnych 547 551 stanów ($B = 10$, $M = 2$, $K = 9$) lub 2 671 151 stanów ($B = 16$, $M = 6$, $K = 15$).

Zwiększanie liczby wiader powoduje iloczynowy wzrost liczby stanów. Komplikuje to numeryczne rozwiązanie modelu, gdyż liczba stanów łańcucha Markowa określa rozmiar układu równań, który trzeba rozwiązać, aby uzyskać prawdopodobieństwa poszczególnych stanów (na podstawie których obliczane są rozkłady długości kolejek, prawdopodobieństwa strat, etc). Bardzo przydatna okazała się tutaj metoda projekcyjna rozwiązywania dużych, rzadkich układów równań liniowych - metoda podprzestrzeni Kryłowa [9]. Analizę uzyskanych wyników zawarto w sekcji 3.

### 2.2. Model symulacyjny

Do utworzenia symulacyjnego modelu działania mechanizmu cieknącego wiadra wykorzystano pakiet OMNeT++. Pakiet ten jest obiektowo zorientowanym symulatorem zdarzeń dyskretnych opartym na języku C++. Jest to pakiet niekomercyjny, dostępny w Internecie pod adresem: *http://www.hit.bme.hu/phd/vargaa/omnetpp.htm.*

Podobnie jak w modelu markowowskim, utworzono źródła geometryczne i samopodobne.

Symulacja samopodobnego źródła wykorzystującego modulację procesem Markowa wymagała ostrożności, ponieważ w macierzach tranzycji występowały duże różnice pomiędzy prawdopodobieństwami przejść. Zastosowano metodę kilkakrotnego losowania przy pojedynczej zmianie stanu modulatora – wprawdzie metoda ta spowalnia nieco generowanie klientów, ale za to jest precyzyjna i wiarygodna [8].

Stworzony model umożliwia dołączanie dowolnej liczby strumieni. Przyjęto, że żetony są generowane co 12 slot czasowy dyskretnego procesu nadejść pakietów. Przyjęto też geometryczny rozkład czasów obsługi w przełączniku, do którego dochodzą strumienie. Celem uzyskania wiarygodnych wyników wygenerowano 50 milionów klientów. Analizę uzyskanych wyników przedstawiono w sekcji 3.

## 3. Analiza rozkładu długości kolejek i prawdopodobieństw strat dla źródeł poissonowskich i samopodobnych

Aby porównać rozkłady długości kolejek oraz prawdopodobieństwa strat dla źródła geometrycznego i samopodobnego, należy odpowiednio dobrać parametr $\alpha$ źródła geometrycznego. Ponieważ $\alpha$ jest zarazem wartością średnią procesu geometrycznego, należy więc nadać jej wartość równą wartości średniej procesu nadejść SSMP(5). Dla macierzy stosowanej m.in. w [3] wartość wynosi $E_1(X) = 0.081435101$. Aby przeanalizować działanie mechanizmu cieknącego wiadra również przy większym obciążeniu, utworzono źródło samopodobne oparte na procesie SSMP(5), dla którego wartość średnia procesu nadejść $E_3(X) = 0.5$. Parametry macierzy tranzycji dla takiego źródła samopodobnego są następujące: $q = 1.927562$, $a = 31.690598$. Parametr Hursta [2] dla modelu źródła typu SSMP(5) jest w tym przypadku równy $H = 0.78$.

Aby przeanalizować zachowanie kolejki w przełączniku, do którego dochodzą wiadra przy różnym obciążeniu, zmieniano liczbę strumieni dochodzących do przełącznika (od dwóch do pięciu). Poniżej przedstawiono wyniki uzyskane dla następujących parametrów modelu: długość kolejki w wiadrze — $B = 10$, długość kolejki żetonów — $M = 2$, długość kolejki w przełączniku — $K = 9$, rozkład czasu obsługi w przełączniku — geometryczny z parametrem $\alpha = 0.25$.

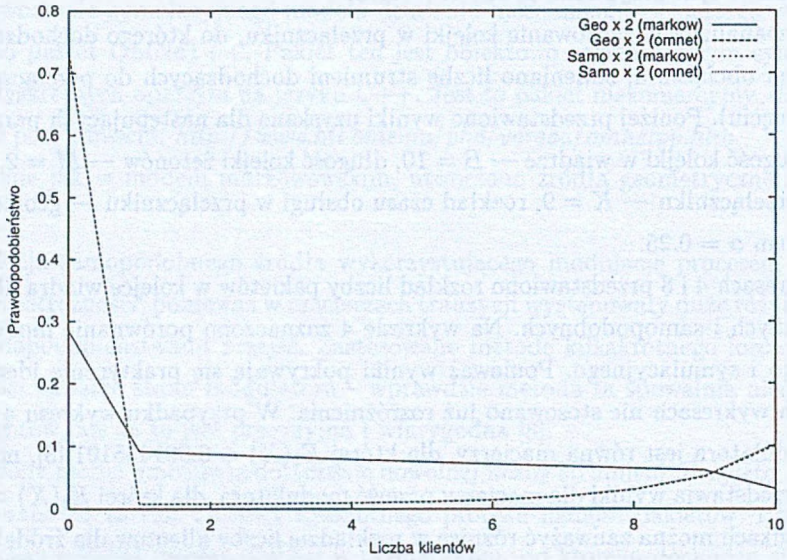
Na wykresach 4 i 8 przedstawiono rozkład liczby pakietów w kolejce wiadra dla źródeł geometrycznych i samopodobnych. Na wykresie 4 zaznaczono porównanie modelu markowowskiego i symulacyjnego. Ponieważ wyniki pokrywają się praktycznie idealnie, na pozostałych wykresach nie stosowano już rozróżnienia. W przypadku wykresu 4 macierz przejść modulatora jest równa macierzy, dla której $E_1(X) = 0.081435101$ [3], natomiast wykres 8 przedstawia wyniki dla macierzy przejść modulatora, dla której $E_3(X) = 0.5$. W obu przypadkach można zauważyć różnicę w rozkładzie liczby klientów dla źródeł geometrycznych i samopodobnych (niezależnie od obciążenia). Również prawdopodobieństwa utraty żetonu są zależne od rodzaju źródła:

- Dla macierzy, dla której $E_1(X) = 0.081435101$:
  - — prawdopodobieństwo utraty żetonu dla źródeł geometrycznych — 0.024705
  - — prawdopodobieństwo utraty żetonu dla źródeł samopodobnych — 0.356283
- Dla macierzy, dla której $E_3(X) = 0.5$:
  - — prawdopodobieństwo utraty żetonu dla źródeł geometrycznych — 0
  - — prawdopodobieństwo utraty żetonu dla źródeł samopodobnych — 0.102766

Na wykresach 5, 6, 9, 10 przedstawiono rozkłady liczby pakietów w przełączniku. Widoczne różnice w rozkładzie dla źródeł geometrycznych i samopodobnych wynikają nie tylko z różnego charakteru ruchu dochodzącego do wiadra, ale również z przedstawionych powyżej różnic w prawdopodobieństwach utraty żetonu. Ma to również wpływ na przedstawione na wykresach 7, 11 prawdopodobieństwa straty pakietów w przełączniku.

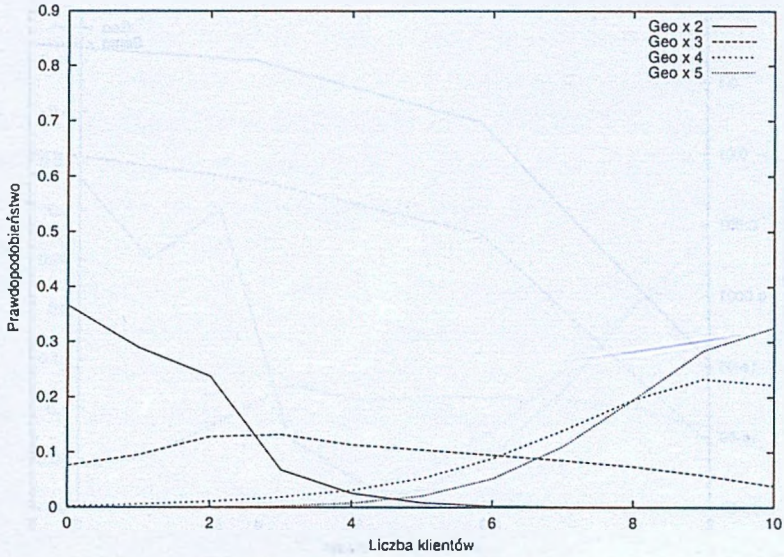
Różnice w wynikach dla źródeł geometrycznych i samopodobnych oznaczają, że samopodobieństwo ma duży wpływ na szacowanie długości kolejek w przełącznikach sieciowych również w przypadku wygładzania ruchu za pomocą mechanizmu cieknącego wiadra. Jednak wpływ ten jest inny niż w przypadku samego przełącznika pracującego bez mechanizmu cieknącego wiadra, który to przypadek był analizowany w [3].

Samopodobieństwo strumienia wejściowego ma również wpływ na straty żetonów w samym mechanizmie cieknącego wiadra.

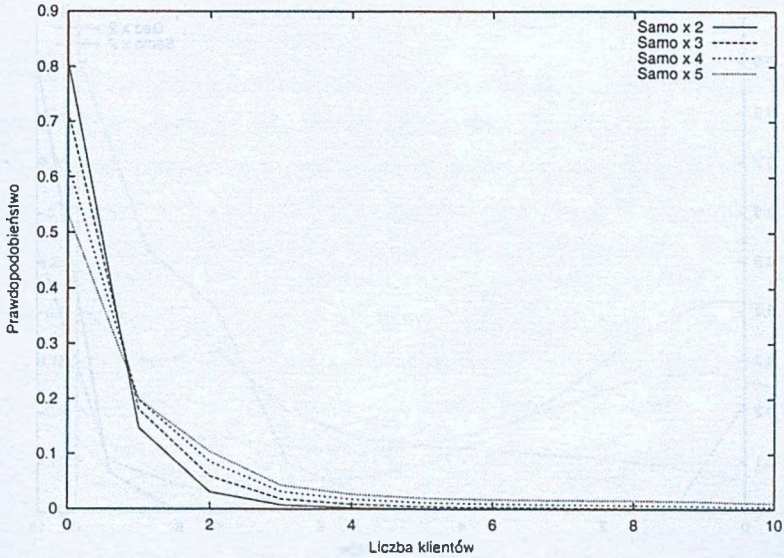



Rys. 4. Rozkład liczby klientów w kolejce wiadra (*macierz1*)

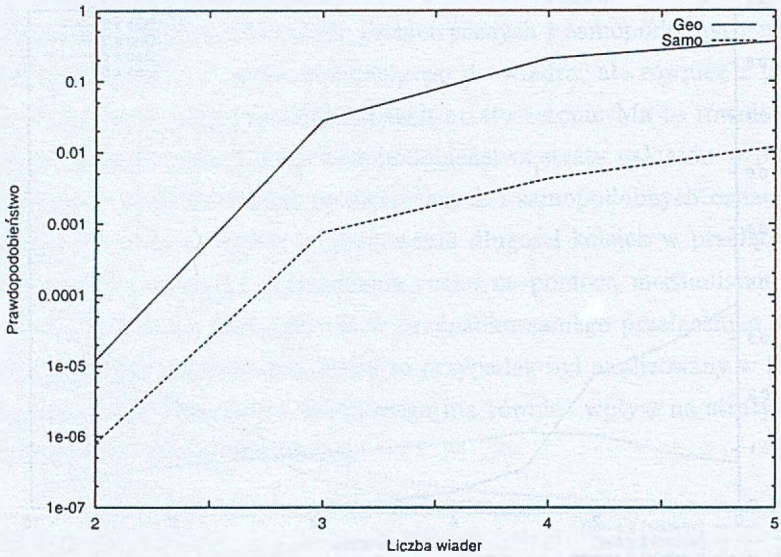
Fig. 4. Distribution of number of packets in leaky bucket queue, case (*macierz1*)



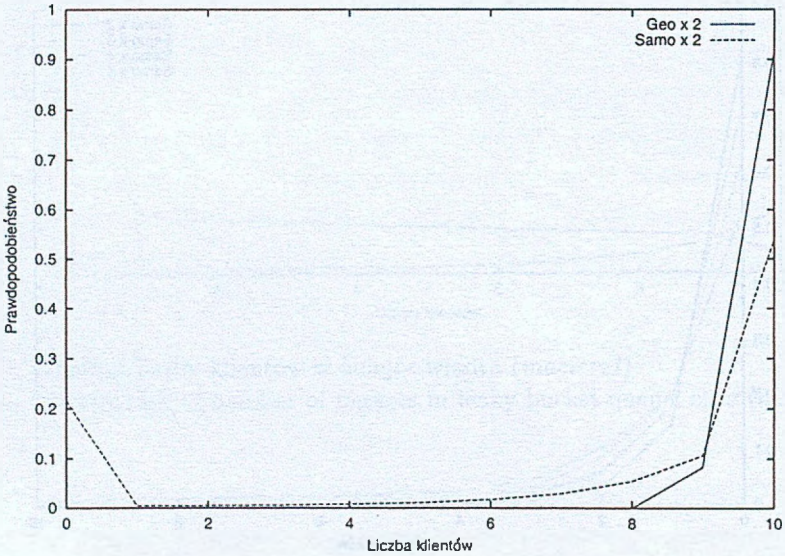

Rys. 5. Rozkład liczby pakietów w przełączniku (*macierz1*)
Fig. 5. Distribution of number of packets in switch queue, case (*macierz1*)



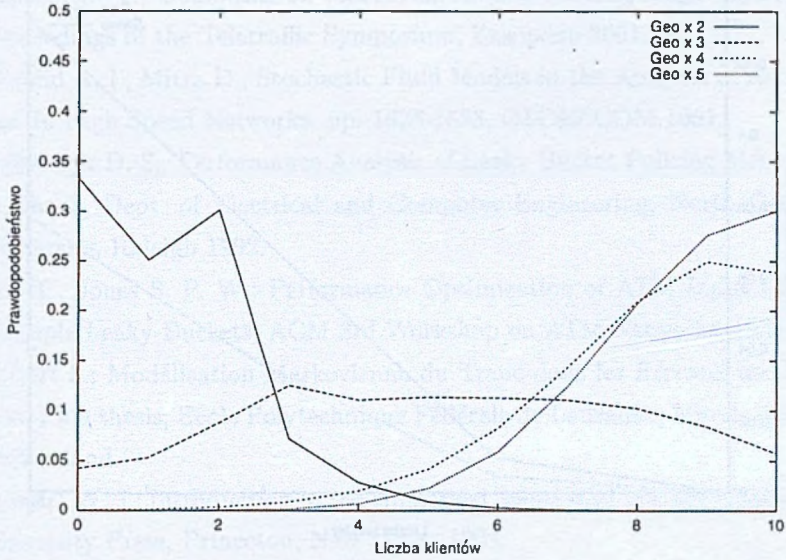

Rys. 6. Rozkład liczby pakietów w przełączniku (*macierz1*)
Fig. 6. Distribution of number of packets in switch queue, case (*macierz1*)



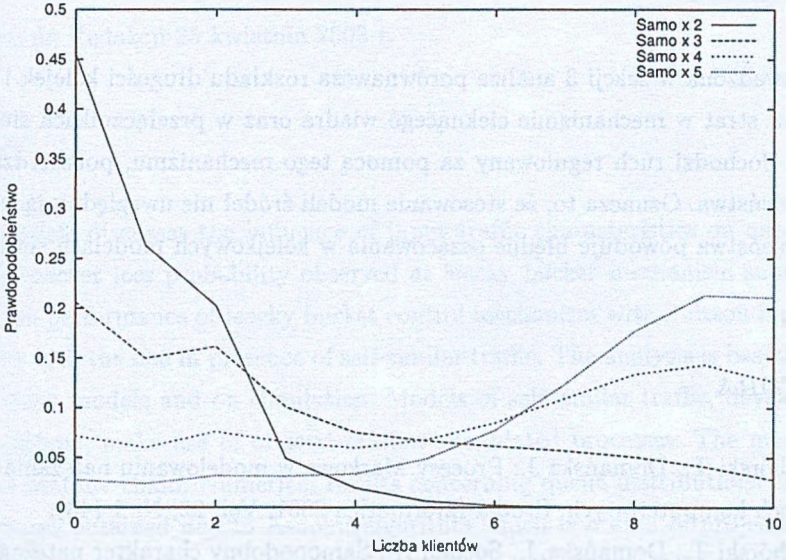

Rys. 7. Prawdopodobieństwo straty pakietu w przełączniku (*macierz1*)
Fig. 7. Distribution of number of packets in switch queue, case (*macierz1*)



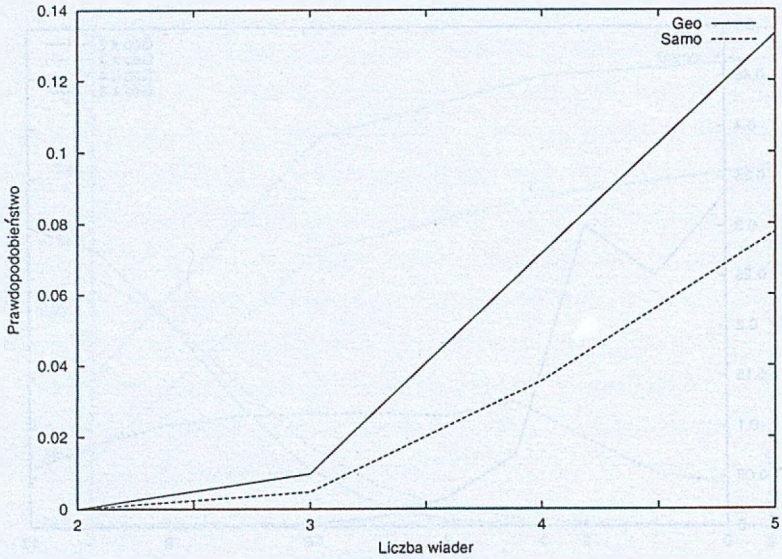

Rys. 8. Rozkład liczby pakietów w kolejce wiadra (*macierz3*)
Fig. 8. Distribution of number of packets in leaky bucket queue, case (*macierz3*)




Rys. 9. Rozkład liczby pakietów w przełączniku (*macierz3*)
Fig. 9. Distribution of number of packets in switch queue, case (*macierz3*)




Rys. 10. Rozkład liczby pakietów w przełączniku (*macierz3*)
Fig. 10. Distribution of number of packets in switch queue, case (*macierz3*)




Rys. 11. Prawdopodobieństwo straty pakietu w przełączniku (*macierz3*)
Fig. 11. Probability of packet loss in switch queue, case (*macierz3*)

## 4. Wnioski

Przeprowadzona w sekcji 3 analiza porównawcza rozkładu długości kolejek i prawdopodobieństw strat w mechanizmie cieknącego wiadra oraz w przełącznikach sieciowych, do których dochodzi ruch regulowany za pomocą tego mechanizmu, potwierdza wpływ samopodobieństwa. Oznacza to, że stosowanie modeli źródeł nie uwzględniających cechy samopodobieństwa powoduje błędne oszacowania w kolejkowych modelach sieci komputerowych.

## LITERATURA

1. Czachórski T., Domańska J.: Procesy Markowa w modelowaniu natężenia ruchu w sieciach komputerowych. Studia Informatica 2001, Vol. 22, Nr 1 (43).
2. Czachórski T., Domańska J., Sochan A.: Samopodobny charakter natężenia ruchu w sieciach komputerowych. Studia Informatica 2001, Vol. 22, Nr 1 (43).
3. Czachórski T., Domańska J.: Wpływ samopodobnej natury ruchu na długości kolejek w przełącznikach sieciowych. Studia Informatica 2002, Vol. 23, Nr 2A (18).

4. Czachórski T., Domańska J.: Markovian models for long-range dependent traffic. Proceedings of the Teletraffic Symposium, Zakopane 2001.
5. Elwalid A. I., Mitra D.: Stochastic Fluid Models in the Analysis of Access Regulation in High Speed Networks. pp. 1626-1633, GLOBECOM 1991.
6. Holtsinger D. S.: Performance Analysis of Leaky Bucket Policing Mechanisms. Ph. D. thesis, Dept. of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, Raleigh 1992.
7. Örs T., Jones S. P. W.: Performance Optimization of ATM Input Control using Multiple Leaky-Buckets. ACM 3rd Workshop on ATM Networks, Ilkley 1995.
8. Robert S.: Modélisation Markovienne du Trafic dans les Réseaux de Communication. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, March 1996, No 1479, Switzerland.
9. Stewart W. J.: Introduction to the Numerical Solution of Markov Chains. Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1994.
10. Tanenbaum A. S.: Computer Networks. Prentice Hall, New Jersey 1996.

Recenzent: Dr inż. Andrzej Chydziński

Wpłynęło do Redakcji 25 kwietnia 2003 r.

Abstract

The article discusses the influence of input traffic characteristics on queue distributions and packet loss probability observed at leacky bucket mechanism supervising the traffic. The performance of leacky bucket control mechanism with Poisson input traffic is compared with the one in presence of self-similar traffic. The analysis is based on discrete time Markov models and on simulation. Models of self-similar traffic, developed earlier by the authors, make use of of semi-Markov modulated processes. The modulator is a five-state Markov chain. Numerical results concerning queue distributions and loss probabilities are obtained due to Arnoldi algorithm which is a kind of projection method, well suited to solve very large systems of equations originating from Markov models. The results confirm strong influence od self-similarity on the performance of leacky bucket mechanism.

Adresy

Tadeusz CZACHÓRSKI: Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN, ul.Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, Polska, tadek@iitis.gliwice.pl

Joanna DOMAŃSKA: Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN, ul.Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, Polska, joanna@iitis.gliwice.pl