

Joanna DOMAŃSKA, Tadeusz CZACHÓRSKI  
Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

## MODEL FORMOWANIA PAKIETÓW W WĘŻLE BRZEGOWYM SIECI OPTYCZNEJ\*

**Streszczenie.** W sieciach całkowicie optycznych, które powstaną w najbliższych latach, sygnał optyczny nie będzie konwertowany na postać elektroniczną w węzłach pośrednich. Trzeba zorganizować komutację przesyłanych w niej pakietów optycznych. Przyjęty standard przewiduje, że będą to pakiety o stosunkowo dużej stałej objętości. W artykule przedstawiono model formowania tych pakietów z pakietów internetowych IP, analizując wpływ procesu formowania na własności ruchu sieciowego.

**Słowa kluczowe:** sieci całkowicie optyczne, samopodobieństwo, teoria kolejek.

## A MODEL OF FORMING OPTICAL PACKETS IN AN EDGE NODE OF ALL-OPTICAL NETWORK

**Summary.** In all-optical networks which will be deployed in the nearest future, the optical signal will not be converted to electronic form in intermediate nodes, hence commutation of optical packets should be designed. According to the established standard, these packets will be of fixed and comparatively large volume. The article presents a model of forming such packets from internet IP packets and studies the influence of this process on statistical features of traffic.

**Keywords:** all-optical networks, self-similarity, queueing theory.

---

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

## 1. Wstęp

Zakłada się, że sieci całkowicie optyczne zrewolucjonizują w najbliższych latach przesyły telekomunikacyjne. Rozwój technologii WDM (ang. Wavelength Division Multiplexing) i DWDM (ang. Dense WDM) w celu jednoczesnego przesyłu wielu wiązek światła o różnej długości fali z wielokrotnia możliwości łącz: dostępne są handlowo systemy przesyłu w jednym łączu 96 wiązek o przepustowości 10 Gb/s każda, a więc łącznie 960 Gb/s; systemy 200-kanalowe pracują już na platformie, możliwy jest też transport 40 Gb/s na jednej długości fali, co daje przepustowość łącza 8 Tb/s; ocenia się, że przy obecnej technologii światłowodowej przepustowość jednego włókna sięgnie 50 Tb/s. Oznacza to znaczne zwiększenie przepustowości łącz. Wąskim gardłem sieci staje się proces konwersji sygnału na formę elektroniczną i na odwrót oraz proces komutacji pakietów w przełącznikach elektronicznych. Trzeba więc stworzyć (pierwsze rozwiązania są już dostępne w handlu) przełączniki optyczne, komutujące pakiety w formie optycznej. Jedną z trudności w ich stosowaniu jest brak pamięci optycznej: nie można zapamiętać pakietów zakodowanych w wiązce światła, można jedynie opóźnić ich przesył o jeden lub kilka taktów pracy sieci, wpuszczając pakiety do odpowiednio długiej pętli opóźniającej światłowodu. Póki więc nie powstaną szybkie pamięci optyczne celem buforowania przychodzących pakietów i nie zostanie zrealizowane optyczne rozpoznawanie nagłówka pakietu, przy projektowaniu sieci całkowicie optycznej wymagane są więc szczególne rozwiązania. Po pierwsze, pakiety powinny przychodzić do węzła możliwie regularnie, by nie powstawało zatłoczenie. Trzeba to zorganizować, bo strumienie transmitowane przez użytkowników ruchu charakteryzują się dużą zmiennością natężenia, a oprócz tego wykazują długoterminową korelację, która bardzo wyraźnie zmienia długości kolejek obserwowanych w konwencjonalnych sieciach. Po drugie, trzeba tak zaprojektować algorytm wyboru trasy pakietów, by wykluczyć ich kolejkowanie, np. jeśli nie można wysłać pakietu w pożądanym kierunku, trzeba go wysłać w innym kierunku, tylko po to, by go nie stracić.

Połączenie technologii w pełni optycznej z aktualnymi rozwiązaniami sieciowymi wymaga stworzenia węzłów brzegowych (elektroniczno-optycznych). Technologia optyczna pod względem rozmiaru pakietu, jak i prędkości przesyłu danych musi współpracować z aktualnymi rozwiązaniami telekomunikacyjnymi, zarówno synchronicznymi, jak i asynchronicznymi.

Niniejszy artykuł opisuje problem formowania pakietów w węzle brzegowym sieci optycznej oraz przedstawia wpływ samopodobieństwa natężenia ruchu na ten proces. W sekcji 2 omówiono koncepcję budowy węzła brzegowego oraz zasadę tworzenia pakietu



optycznego w takim węźle. Sekcja 3 zawiera opis symulacyjnego modelu formowania pakietów optycznych w węźle brzegowym. W sekcji 4 przedstawiono analizę uzyskanych wyników. Sekcja 5 zawiera wnioski wypływające z modelowania.

## 2. Węzeł brzegowy w sieci optycznej

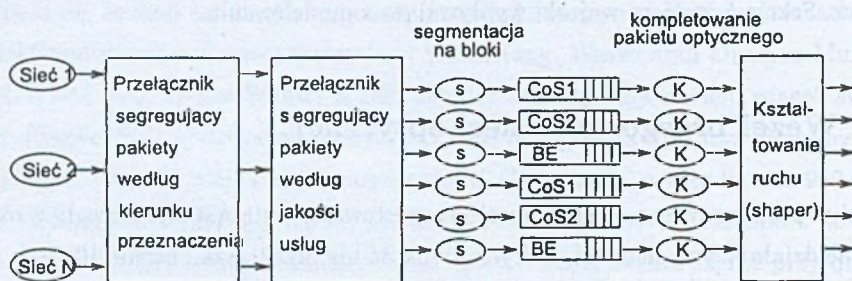
Sieci w pełni optyczne o terabitowej przepustowości będą współpracowały z różnymi aktualnie działającymi sieciami, których prędkość nie przekracza obecnie 10 Gb/s i będą zapewniały tym sieciom przezroczysty transport wewnątrz sieci optycznej. Zakłada się, że przełączniki działające wewnątrz sieci optycznej nie będą mogły z powodów technicznych (bardzo szybkie przełączanie oraz ograniczona możliwość przechowywania pakietów optycznych) realizować złożonych funkcji. Dlatego wszystkie problemy związane ze zmianą zasad transmisji będą musiały być rozwiązane w węzłach brzegowych na wejściu do sieci optycznej.

Węzeł brzegowy (interfejs pomiędzy siecią elektroniczną a optyczną) będzie przystosowywał przychodzące dane do wielkich prędkości uzyskiwanych w sieciach optycznych. Dane będą konwertowane do postaci pakietu optycznego, przesyłane siecią optyczną i opuszczając ją znów konwertowane do oryginalnego formatu. Ważną funkcją węzła brzegowego będzie też kształtowanie (wygładzanie) natężenia przychodzącego ruchu.

Format optycznego pakietu został opracowany podczas realizacji europejskiego projektu KEOPS (Keys in Optical Packet Switching) [5]. Pakiet składa się z dwóch elementów: nagłówka i pola danych. Pomiędzy transmisją tych dwóch elementów wymagany jest okres ciszy na łączu, analogicznie pomiędzy danymi a następnym nagłówkiem. W tym rozwiązaniu przyjęto, że nagłówki i dane są rozdzielone w czasie, aczkolwiek mogą być one przesyłane w tym samym czasie różnymi długościami fali (co ułatwia czytanie nagłówka bez konwersji na formę elektroniczną, jak również jego modyfikację). Przyjęto, że długość pakietu optycznego, wyrażona w jednostkach czasu, jest stała. Oznacza to, że zwiększenie prędkości transmisji powoduje zwiększenie liczby przesyłanych danych. Przykładowo, jeżeli długość pakietu wynosi 500 ns, pakiet taki zawiera dwa separatory (pomiędzy nagłówkiem a danymi oraz danymi a następnym nagłówkiem) po 50 ns, nagłówek 64 ns oraz pole danych 336 ns. Dla prędkości 10 Gb/s odpowiada to 400 bajtom. Rozważane są długości pakietów optycznych pomiędzy 500 ns a 5  $\mu$ s [6].

Schemat budowy węzła brzegowego przedstawia rysunek 1. Ilustruje on podstawowe zadania węzła: pośredniczyć pomiędzy siecią optyczną a klienckimi sieciami (IP, ATM,

SDH itp.), zapewniać mechanizmy różnicujące jakość usług, tworzyć pakiety optyczne, kształtować ruch wejściowy.



Rys. 1. Schemat budowy węzła brzegowego

Fig. 1. A scheme of the edge node

Pakiet musi otrzymać na wejściu do sieci optycznej odpowiednią etykietę; elektroniczne pakiety są klasyfikowane na podstawie klasy usług oraz miejsca przeznaczenia w sieci optycznej. Następnie dokonuje się konwersji adresów z sieci elektronicznej na optyczną.

Interesuje nas tutaj problem zapełniania optycznego pakietu. Pakiet IP może mieć zmienną długość. Istnieją dwa mechanizmy:

- Segmentacja - pakiety elektroniczne są segmentowane do komórek o stałej długości (np. 64 bajty). Takie komórki są umieszczane w buforze, a następnie zapełniają pakiet optyczny. Każda komórka musi mieć nagłówek umożliwiający skompletowanie komórek w pakiety po dotarciu do celu. Zaletą tego rozwiązania jest to, że ponieważ pakiet optyczny jest zapełniany komórkami o stałej długości, łatwo można stwierdzić, kiedy jest pełny.
- Mechanizm zbierający (ang. Assembly Mechanism) - pakiet optyczny jest zapełniany przez przychodzące pakiety o zmiennej długości. Problemem jest tutaj decyzja, kiedy pakiet należy uznać za pełny. Zakłada się, że jeżeli wolnego miejsca w pakiecie optycznym nie wystarczy, aby przyjąć w całości następny przychodzący pakiet, to pakiet optyczny uważa się za pełny.

W niniejszym artykule rozważany jest mechanizm zbierający. Przychodzące pakiety IP są buforowane, agregowane i po zebraniu odpowiedniej liczby pakietów, związanych z rozmiarem optycznego pakietu, są wysyłane siecią optyczną. Jeżeli pakiet optyczny nie został jeszcze zapełniony, a upłynął już maksymalny dopuszczalny czas pomiędzy



wysyłką kolejnych pakietów optycznych, to taki pakiet optyczny uważa się również za pełny i jest on wysyłany.

### 3. Symulacyjny model formowania pakietów optycznych w węźle brzegowym

Do stworzenia symulacyjnego modelu napelniania pakietu optycznego wykorzystano pakiet OMNeT++ [11].

Stworzony model składał się z trzech modułów: źródła generującego pakiety IP o różnej długości, bufora, w którym kompletowano pakiet optyczny, oraz ujścia pakietów optycznych.

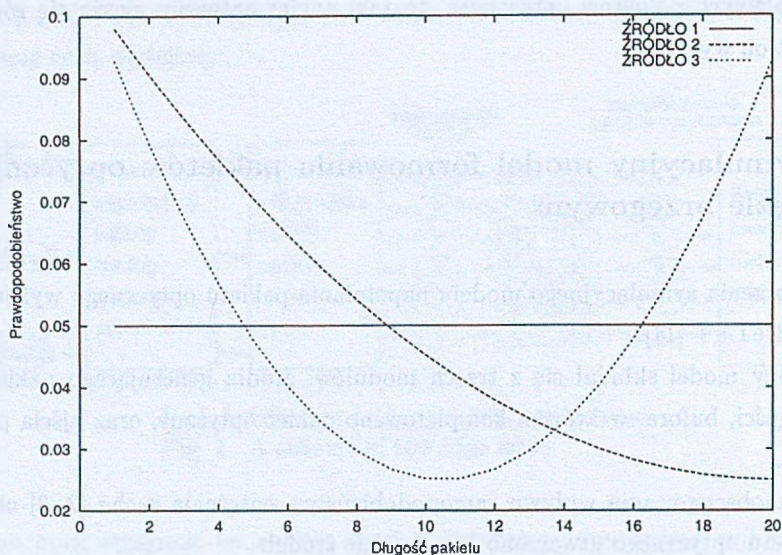
Celem zaobserwowania wpływu samopodobieństwa natężenia ruchu [2, 3] na napelnianie pakietu optycznego utworzono dwa modele źródeł:

- geometryczne, jako dyskretny odpowiednik procesu Poissona,
- źródło samopodobne, oparte na procesie SSMP(5) opisanym m.in. w [2, 4]. W źródle tym prawdopodobieństwo nadejścia pakietu określa stan modulatora – osobnego łańcucha Markowa, w tym przypadku 5-stanowego.

### 4. Analiza uzyskanych wyników

Utworzony model symulacyjny umożliwił analizę rozkładu zapelnienia bufora optycznego (w komórkach), rozkładu zapelnienia wychodzącego pakietu optycznego (w komórkach i pakietach elektronicznych) oraz analizę rozkładu liczby kroków potrzebnych do wysłania pakietu optycznego. Omawiane wyniki uzyskano jako statystykę po przejściu przez węzeł 50 mln pakietów IP. Przyjęto następujące wartości parametrów:

- maksymalna długość pakietu optycznego: 250 bloków,
- długości pakietów elektronicznych: 1..20 bloków, rozpatrzono trzy rozkłady prawdopodobieństwa długości pakietu elektronicznego (patrz rysunek 2),
- zmienny (podany na wykresach) próg czasowy, po którym wysyłany jest pakiet optyczny (nawet jeżeli jest niezapełniony),
- zmienne natężenie ruchu wejściowego ( $E_1(X) = 0.081435101$  oraz  $E_3(X) = 0.5$ ).



Rys. 2. Rozkład długości pakietu elektronicznego

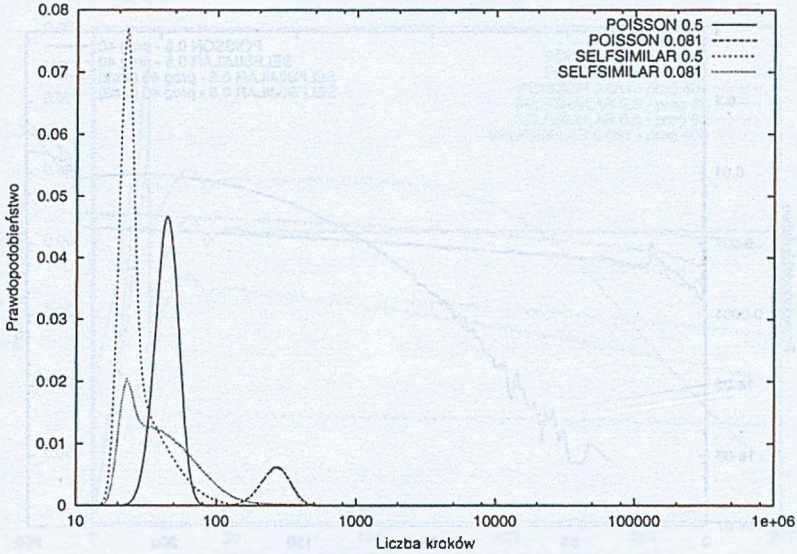
Fig. 2. Distribution of electronic packet length

Na rysunku 3 przedstawiono rozkład liczby kroków (szczelin czasowych) potrzebnych do wysłania pakietu optycznego. W tym przypadku nie ustalono progu czasowego, po którym należy wysłać pakiet optyczny, nawet jeżeli nie jest jeszcze zapełniony. Oczywiście jest różnica w rozkładzie w zależności od natężenia strumienia wejściowego. Natomiast godna podkreślenia jest rozbieżność w rozkładach dla takiego samego natężenia ruchu, a innej jego charakterystyki (ruch poissonowski vs samopodobny). Na wykresie 3 przedstawiono wyniki dla źródła pierwszego (por. rys. 2). Dla pozostałych źródeł wyniki są liczbowo różne, ale ukazują podobny wpływ samopodobieństwa na rozkład liczby kroków potrzebnych do wysłania pakietu optycznego.

Jeżeli nie uwzględnimy progu czasowego, to rozkład liczby komórek w wychodzącym pakiecie optycznym jest niezależny od obciążenia na wejściu oraz od samopodobieństwa strumienia wejściowego. Dopiero po wprowadzeniu progu, po którym należy wysłać pakiet optyczny, nawet jeżeli nie jest jeszcze zapełniony, pojawiają się znaczne różnice rozkładów - patrz rysunek 4.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład liczby pakietów w wychodzącym pakiecie optycznym dla źródła drugiego. Tutaj również można zaobserwować zależność rozkładu nie tylko od obciążenia, ale również od samopodobieństwa strumienia wejściowego. Analo-





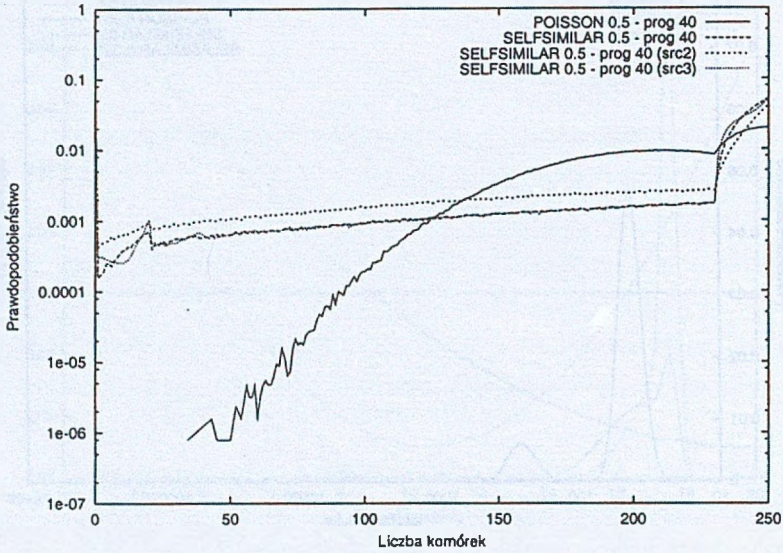
Rys. 3. Rozkład liczby kroków potrzebnych do wysłania pakietu optycznego  
 Fig. 3. Distribution of the steps for optical packet completion

giczne zależności występują w przypadku drugiego i trzeciego rozkładu długości pakietu wejściowego.

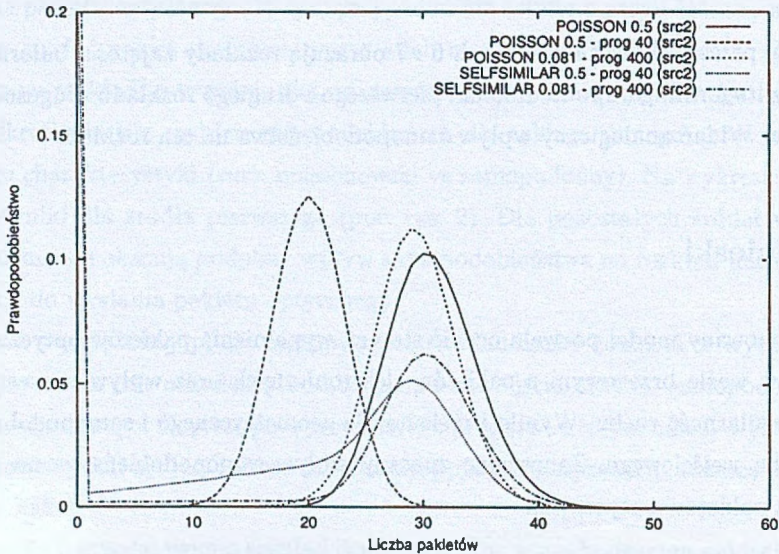
Wykresy przedstawione na rysunkach 6 i 7 obrazują rozkłady zajętości bufora optycznego during its forming odpowiednio dla pierwszego i drugiego rozkładu długości pakietu wejściowego. Widać analogiczny wpływ samopodobieństwa na ten rozkład.

## 5. Wnioski

Zaproponowany model pozwala ocenić stopień wypełnienia pakietów optycznych formowanych w węźle brzegowym z pakietów elektronicznych oraz wpływ procesu formowania na regularność ruchu. Wyniki uzyskano dla geometrycznego i samopodobnego nałożenia ruchu wejściowego. Zauważono znaczny wpływ samopodobieństwa na przebieg formowania pakietów optycznych.

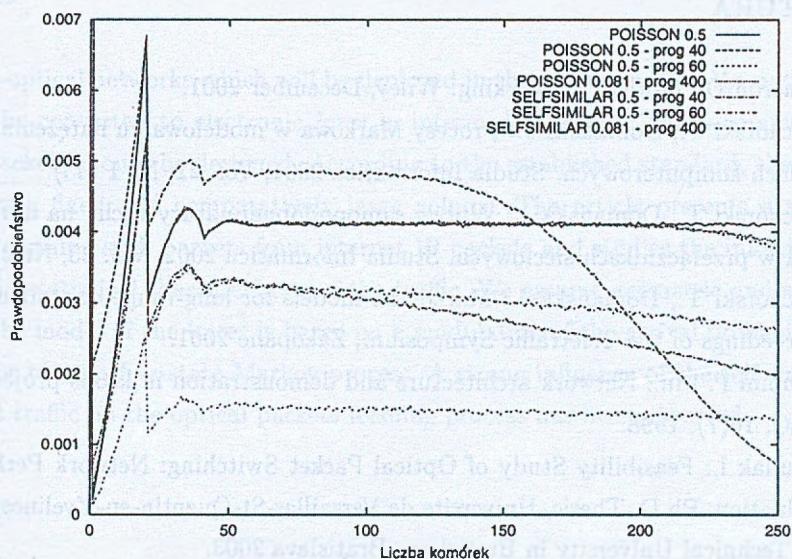


Rys. 4. Rozkład liczby bloków w wychodzącym pakiecie optycznym  
 Fig. 4. Distribution of number of blocks in dispatched optical packet



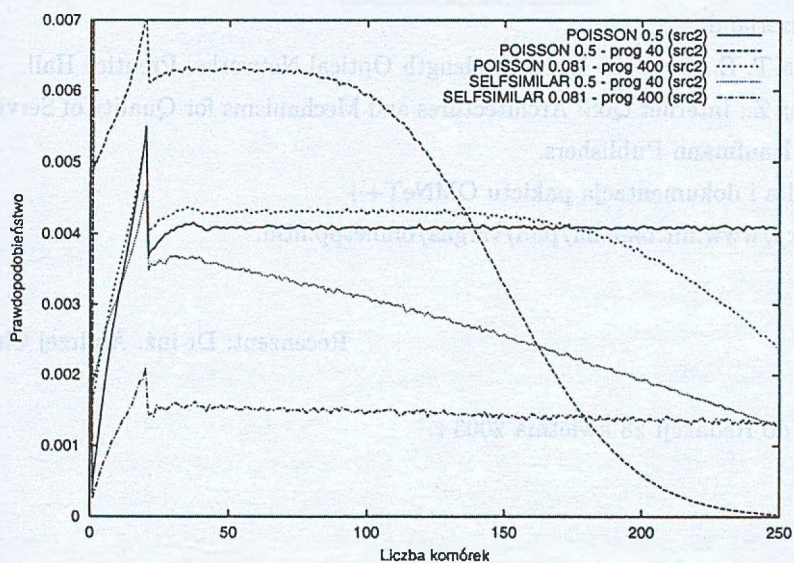
Rys. 5. Rozkład liczby pakietów w wychodzącym pakiecie optycznym  
 Fig. 5. Distribution of number of packets in dispatched optical packet





Rys. 6. Rozkład zajętości bufora optycznego (źródło 1)

Fig. 6. Distribution of optical buffer occupancy (source 1)



Rys. 7. Rozkład zajętości bufora optycznego (źródło 2)

Fig. 7. Distribution of optical buffer occupancy (source 2)

## LITERATURA

1. Cameron D.: Optical Networking. Wiley, December 2001.
2. Czachórski T., Domańska J.: Procesy Markowa w modelowaniu 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 (48).
4. Czachórski T., Domańska J.: Markovian models for long-range dependent traffic. *Proceedings of the Teletraffic Symposium, Zakopane 2001*.
5. Gambini P. i in.: Network architecture and demonstration in keops project. *IEEE JSAC*, 16(7), 1998.
6. Kotuliak I.: Feasibility Study of Optical Packet Switching: Network Performance Evaluation. Ph.D. Thesis, Universite de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines and Slovak Technical University in Bratislava, Bratislava 2003.
7. Ramasvami R., Sivarajan K.: Optical Networks: A practical Approach. Morgan Kaufmann Publishers, October 2001.
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. Stern T. E., Bala K.: Multiwavelength Optical Networks. Prentice Hall.
10. Wang Z.: Internet QoS: Architectures and Mechanisms for Quality of Service. Morgan Kaufmann Publishers.
11. Źródła i dokumentacja pakietu OMNeT++  
<http://www.hit.bme.hu/phd/vargaa/omnetpp.htm>.

Recenzent: Dr inż. Andrzej Chydziański

Wpłynęło do Redakcji 28 kwietnia 2003 r.



## Abstract

In all-optical networks which will be deployed in the nearest future, the optical signal will not be converted to electronic form in intermediate nodes, hence commutation of optical packets should be designed. According to the established standard, these packets will be of a fixed and comparatively large volume. The article presents a simulation model of forming such packets from internet IP packets and studies the influence of this process on statistical characteristics of the traffic. We assume geometric and self-similar traffic. The model of the letter is based on a modulation of the arrival probabilities by a modulator being a five-state Markov process. A strong influence of the self-similarity of the input traffic on the optical packets forming process has been observed.

## Adresy

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

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